

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

М.Н. КРАММ

Сборник лабораторных работ по основам электродинамики

Лабораторный практикум по курсу «Электродинамика» для студентов, обучающихся по направлению 11.03.01 «Радиотехника» и по курсу «Электротехника. Ч. 2» для студентов, обучающихся по направлению 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»

Москва

Издательство МЭИ

2017

УДК 621.396

ББК 32.84

К 777

Утверждено учебным управлением МЭИ

Подготовлено на кафедре основ радиотехники МЭИ

Рецензенты: В.Г. Карташев, докт. техн. наук, проф. МЭИ,

Крамм М.Н.

Сборник лабораторных работ по основам электродинамики. Лабораторный практикум по курсу «Электродинамика» для студентов, обучающихся по направлению 11.03.01 «Радиотехника» и по курсу «Электротехника. Ч. 2» для студентов, обучающихся по направлению 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»: метод. пособие / М.Н. Крамм. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – 85 с.

ISBN

В настоящем сборнике приведены описания лабораторных работ по курсам «Электродинамика» и «Электротехника. Ч. 2». Лабораторные работы выполняются на кафедре Основ радиотехники НИУ «МЭИ», они предназначены для студентов Радиотехнического факультета ИРЭ НИУ «МЭИ», обучающихся по направлениям подготовки 11.03.01 «Радиотехника» и 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии».

УДК

ББК

ISBN

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2016

Содержание

Предисловие	4
Лабораторная работа № 1 ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ.....	5
Лабораторная работа № 2 ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕД	12
Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДА ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ	21
Лабораторная работа №4 ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО РЕЗОНАТОРА, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА БЫСТРЫХ ВОЛН	30
Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ГРЕБЕНЧАТОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ	40
Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ Н-ОБРАЗНОГО МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА	46
Лабораторная работа № 7 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ГИРОМАГНИТНОЙ СРЕДЕ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ НАМАГНИЧИВАНИИ	53
Лабораторная работа № 8 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ	60
Лабораторная работа № 9 ИССЛЕДОВАНИЕ КРУГЛОГО ОБЪЕМНОГО РЕЗОНАТОРА	70
Приложение П.1 Методика выполнения лабораторных работ	80
Приложение П.2 Методика съема пространственных распределений составляющих поля	82
Приложение П.3 Методики измерения длины волны и добротности	83

Предисловие

В настоящем сборнике приведены описания лабораторных работ по основам электродинамики. Лабораторные работы выполняются на кафедре Основ радиотехники НИУ «МЭИ», они соответствуют курсу «Электродинамика» для студентов, обучающихся по направлению 11.03.01 «Радиотехника» и курсу «Электротехника. Ч. 2» для студентов, обучающихся по направлению 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии». Лабораторные работы выполняются на стендах, оснащенных генераторами СВЧ (длина волны 3 см, 10 см), специализированными узлами с элементами волноводов и СВЧ секциями, детекторными секциями, избирательными вольтметрами, персональными компьютерами для обработки и визуализации результатов экспериментов.

В сборнике по каждой лабораторной работе содержатся описания экспериментальных установок, краткие сведения по теории, домашнее и лабораторное задания, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы. В Приложениях описаны методика выполнения лабораторных работ и основные приемы измерений в диапазоне СВЧ, включая снятие пространственных распределений полей, измерение длины волны и добротности.

Лабораторный практикум по основам электродинамики отражает многолетний опыт сотрудников кафедры Основ радиотехники НИУ «МЭИ». Решающий вклад в постановку лабораторных работ внесли Н.Н.Федоров, С.И.Баскаков, В.Ф.Взятышев, В.Г.Карташев, Б.П.Поллак, И.И.Сергеев, Е.А.Филатова, А.Е.Ханамиров, И.И.Чугунов, Л.А.Ягодина. Лабораторный практикум в нынешнем виде реализован с активным плодотворным творческим участием К.Ю.Кожевникова и В.В.Крутских.

Выражаем признательность коллективу кафедры РТП и АС, предоставившей лабораторный стенд «Исследование круглого объемного резонатора».

Лабораторная работа № 1

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

Целью данной работы является исследование электромагнитного поля элементарных вибраторов, включая изучение поляризации излучаемых волн.

1.1. Описание экспериментальной установки

Установка для исследования элементарных электрических вибраторов смонтирована на круглом столе (рис. 1.1). В центре стола расположен передающий вибратор 1, к которому подводится напряжение от СВЧ генератора. Приемный вибратор 2 (вместе с СВЧ детектором) располагается на каретке 3, которая может перемещаться по штанге 4. Штанга 4, в свою очередь, может поворачиваться вокруг оси установки.

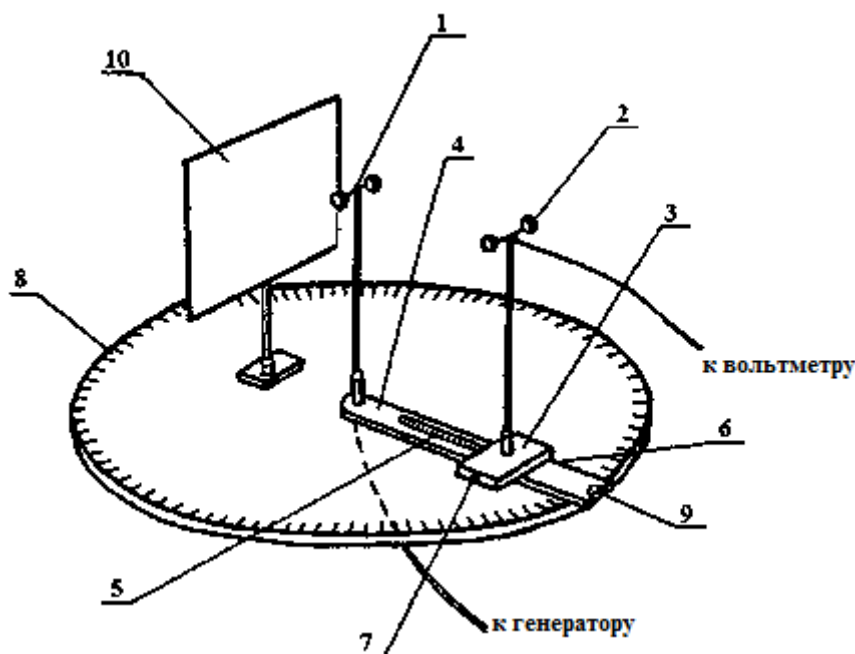


Рис. 1.1. Схема экспериментальной установки

На штанге расположена линейка 5, а на каретке – визир 6. Они позволяют определить расстояние между передающим и приемным вибраторами. Для снятия диаграммы направленности положение каретки на штанге фиксируется с помощью арретира 7, угол поворота приемного вибратора отсчитывается по шкале 8 с помощью визира 9.

В данной установке ось передающего вибратора ориентирована горизонтально, параллельно лабораторному столу. При этом, поворачивая приемный вибратор относительно передающего вибратора и изменяя, тем самым, угол наблюдения θ , можно снять диаграмму направленности в меридиональной плоскости.

Для исследования излучения вибратора, расположенного у металлической поверхности, предусмотрен съемный экран – металлический

лист 10, который может быть установлен на любом расстоянии от передающего вибратора.

На концах вибраторов расположены металлические шарики диаметром 5 мм, расстояние между центрами которых равно 20 мм ($\lambda_0=10$ см). Благодаря наличию шариков, между концами вибратора имеет место сосредоточенная емкость, в результате чего распределение тока по длине вибратора становится приблизительно равномерным.

При исследовании поля в дальней зоне и снятии диаграммы направленности, к передающему вибратору по коаксиальной линии подводится напряжение от клистронного СВЧ генератора (частота колебаний 3000 МГц).

Приемный вибратор также представляет собой диполь, размещенный в общем блоке с СВЧ детектором. Продетектированный сигнал по коаксиальному кабелю подводится к милливольтметру ВЗ-38 или измерителю отношения напряжений В8-7. Приемный вибратор может принимать в пространстве вертикальное или горизонтальное положение, что необходимо для приема сигналов с различной поляризацией. **Детектор приемного вибратора работает в режиме квадратичного детектирования** так, что показания измерительного прибора пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля. Это обстоятельство необходимо учитывать при обработке экспериментальных данных.

Исследование элементарного электрического вибратора на описанной установке усложняется тем, что излучаемый им сигнал отражается от различных предметов, расположенных в лаборатории. Отраженные сигналы интерферируют с основным сигналом и друг с другом, в результате чего создается своеобразный фон, не позволяющий исследовать поле на большом расстоянии от вибратора. Этот фон, например, хорошо заметен при снятии диаграммы направленности вибратора в экваториальной плоскости при максимальном расстоянии между передающим и приемным вибраторами. Наиболее сильный мешающий сигнал получается в результате отражения от поверхности стола. Чтобы уменьшить влияние отражения от стола, на направляющей штанге между передающим и приемным вибраторами установлена наклонная пластина. Благодаря этой пластине поле, отраженное от стола, не попадает к приемному вибратору. Отражения от других предметов устранить не удастся, поэтому при снятии диаграммы направленности приемный вибратор должен располагаться достаточно близко к передающему вибратору так, чтобы основной сигнал был намного больше отраженных.

Не забудьте, что диаграмму направленности можно снимать только в дальней зоне вибратора (антенны). Поэтому выбирайте расстояние не менее 4-5 длин волн от вибратора.

1.2. Элементы теории

Анализ выражений для поля вибратора, приведенных в [1], показывает, что в общем виде зависимость составляющих поля от расстояния r достаточно сложна, однако можно выделить две зоны, где эта зависимость имеет сравнительно простой вид.

При $\beta r \ll 1$ ($r \ll \lambda/(2\pi)$), что соответствует **ближней зоне** электрического вибратора, приближенные значения для составляющих поля можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{H}_\varphi &= \frac{\dot{I}_\vartheta \cdot l}{4\pi \cdot r^2} \sin \theta \\ \dot{E}_r &= -j \frac{\dot{I}_\vartheta \cdot l}{2\pi \cdot r^3 \cdot \omega \cdot \varepsilon_a} \cos \theta \\ \dot{E}_\theta &= -j \frac{\dot{I}_\vartheta \cdot l}{4\pi \cdot r^3 \cdot \omega \cdot \varepsilon_a} \sin \theta \end{aligned} \quad (1.1)$$

При $\beta r \gg 1$ ($r \gg \lambda/(2\pi)$), что соответствует **дальней зоне** электрического вибратора, остаются составляющие поля H_φ и E_θ :

$$\begin{aligned} \dot{H}_\varphi &= j \frac{\dot{I}_\vartheta \cdot l \cdot \beta \cdot e^{-j\beta r}}{4\pi \cdot r} \sin \theta \\ \dot{E}_\theta &= j \frac{\dot{I}_\vartheta \cdot l \cdot \beta^2 \cdot e^{-j\beta r}}{4\pi \cdot \omega \cdot \varepsilon_a \cdot r} \sin \theta = \dot{H}_\varphi Z_c \end{aligned} \quad (1.2)$$

В соответствии с (1.2) амплитуда составляющих поля H_φ и E_θ в дальней зоне изменяется обратно пропорционально расстоянию r .

Диаграммы направленности поля излучения электрического вибратора рассмотрены в [1]. Диаграммы направленности обычно исследуются в двух плоскостях: а) **меридиональной** плоскости, проходящей через ось вибратора; б) **экваториальной** плоскости, перпендикулярной оси вибратора.

Нормированная диаграмма направленности определяется выражением:

$$F(\theta, \varphi) = \frac{|\dot{E}_\theta|}{|\dot{E}_\theta|_{\max}} = \sin \theta, \quad (1.3)$$

где угол θ отсчитывается от оси вибратора, угол φ изменяется в плоскости, перпендикулярной оси вибратора.

Для построения диаграммы направленности передающего электрического вибратора с экраном следует воспользоваться аналитическим выражением

$$F(\theta, \varphi) = \sin \theta \cdot \sin(\beta a \cdot \cos \varphi \cdot \sin \theta) \quad (1.4)$$

Здесь a – расстояние между передающим вибратором и металлическим экраном. Выражение получено с использованием метода зеркальных изображений.

Мощность излучения и сопротивление излучения электрического вибратора определяются следующими выражениями:

$$P_{\text{изл}} = \left| \dot{I}_{\text{э}} \right|^2 \cdot \frac{R_{\text{изл}}}{2} \quad (1.5)$$

$$R_{\text{изл}} = \frac{2\pi}{3} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{\alpha}}{\varepsilon_{\alpha}}} \cdot \left(\frac{1}{\lambda} \right)^2 \quad (1.6)$$

Выражения для составляющих поля магнитного (щелевого) вибратора в ближней и дальней зонах можно получить из (1.1) и (1.2), используя перестановки вида:

$$\dot{\vec{E}} \leftrightarrow \dot{\vec{H}}; \quad \varepsilon_{\alpha} \leftrightarrow -\mu_{\alpha}; \quad \dot{I}_{\text{э}} \leftrightarrow -\dot{I}_{\text{м}}$$

и положить $\dot{I}_{\text{м}} = 2\dot{U}_{\text{щ}}$ (см. [1,2]).

1.3. Домашнее задание

1. Ознакомьтесь с методикой выполнения лабораторных работ (Приложение П.1). Изучите основные положения теории элементарного излучателя (вибратора). Ознакомьтесь с описанием экспериментальной установки (п.2.1). Будьте готовы ответить на вопросы:

- Как ориентированы вектора \vec{E} , \vec{H} и $\vec{P}_{\text{ср}}$ поля, излучаемого передающим вибратором: а) в точке расположения приемного вибратора (применительно к рис.1.1); б) в точке, где расположится приемный вибратор, если штангу с приемным вибратором повернуть на 45° ?
- Как связаны показания измерительного вольтметра с амплитудой напряженности электрического поля?
- Что такое диаграмма направленности вибратора?
- В какой плоскости (меридиональной или экваториальной) можно снять диаграмму направленности применительно к рис.1.1? Почему?
- Как нужно действовать, чтобы снять диаграмму направленности передающего вибратора: а) в меридиональной плоскости; б) в экваториальной плоскости? Как при этом обрабатывать показания вольтметра?

2. Определите ближнюю и дальнюю зоны элементарного электрического вибратора при частоте излучаемых колебаний 400 МГц и 3000 МГц. Учтите, что в воздухе $\lambda = \frac{c}{f}$.

3. Рассчитайте и постройте график зависимости амплитуды составляющей E_θ от расстояния r для поля в ближней зоне электрического вибратора при частоте излучаемых колебаний 400 МГц.

Построение графика проводите на участке изменения r от 1,6 см до 4 см для модуля комплексной амплитуды \dot{E}_θ в нормированном масштабе, приняв за единицу амплитуду \dot{E}_θ в точке $r_0 = 1,6$ см. При этом поль-

$$\text{зуйтесь формулой } \frac{|\dot{E}_\theta|}{|\dot{E}_\theta(r_0)|} = \left(\frac{r_0}{r}\right)^3.$$

4. Рассчитайте и постройте график зависимости амплитуды составляющей E_θ от расстояния r для поля в дальней зоне вибратора при частоте излучаемых колебаний 3000 МГц.

Построение графика проводите на участке изменения r от 10 см до 40 см для модуля комплексной амплитуды \dot{E}_θ в нормированном масштабе, приняв за единицу амплитуду E_θ в точке $r_0 = 10$ см. При этом

$$\text{пользуйтесь формулой } \frac{|\dot{E}_\theta|}{|\dot{E}_\theta(r_0)|} = \frac{r_0}{r}.$$

Наибольшее значение $r = 40$ см определяется максимально возможным расстоянием, которое устанавливается между передающим и приемным вибраторами в лабораторной установке.

5. Рассчитайте и постройте в полярных координатах диаграмму направленности электрического вибратора в экваториальной и меридиональной плоскостях. Учтите, что в экваториальной плоскости

$$\frac{|\dot{E}_\theta(\varphi)|}{|\dot{E}_\theta(\varphi)|_{\max}} = 1, \quad \varphi \in (0, 360^\circ);$$

в меридиональной плоскости

$$\frac{|\dot{E}_\theta(\theta)|}{|\dot{E}_\theta(\theta)|_{\max}} = |\sin(\theta)|, \quad \theta \in (0, 360^\circ).$$

1.4. Лабораторное задание

1. Уясните расположение ортов сферической системы координат в области расположения приемного вибратора и установите штангу с приемным вибратором под углом наблюдения, обеспечивающим максимальную амплитуду регистрируемых колебаний.

2. Включите питание СВЧ генератора и измерительного вольтметра. Установите частоту колебаний 3000 МГц. Снимите зависимость нормированной амплитуды напряженности электрического поля от расстояния между вибраторами в дальней зоне. Методика съема пространствен-

ных распределений составляющих поля представлена в Приложении П.2. Диапазон изменения расстояния и нормировка должны соответствовать домашнему заданию. Учтите, что: а) расстояние между излучающим и приемным вибраторами $r = r_{\text{лин}} + 4$ см, где $r_{\text{лин}}$ – показания измерительной линейки; б) в данном и последующих пунктах экспериментального задания детектирование является **квадратичным**, то есть показания вольтметра пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля.

3. Под руководством преподавателя, поворачивая приёмный вибратор вокруг своей оси, проверьте поляризацию излучаемой волны. Для этого сравните показания вольтметра при вертикальной и горизонтальной ориентации приемного вибратора (запишите в отчет) и сделайте вывод об ориентации вектора \vec{E} в сферической системе координат.

4. Установив расстояние между приёмным и передающим вибраторами около 20 см, снимите диаграмму направленности вибратора в меридиональной плоскости (методика съема пространственных распределений составляющих поля представлена в Приложении П.2.).

5. Установите металлический экран параллельно передающему вибратору на таком минимальном расстоянии от него, при котором амплитуда напряженности электрического при угле наблюдения $\theta = 90^\circ$ близка к нулевой. Измерьте это расстояние, выразите его в долях длины волны.

Примечание. Учтите, что для анализа результата эксперимента действие экрана можно заменить действием зеркального вибратора, расположенного симметрично основному вибратору относительно экрана (метод зеркального изображения). Сдвиг фазы колебаний тока в зеркальном вибраторе (относительно основного вибратора) определяется граничными условиями на поверхности металла и равен 180° для данной ориентации.

6. Для полученных условий снимите диаграмму направленности вибратора в меридиональной плоскости.

7. Установите металлический экран на минимальном расстоянии от передающего вибратора, при котором амплитуда напряженности электрического при угле наблюдения $\theta = 90^\circ$ максимальна. Измерьте это расстояние, выразите его в долях длины волны. Для анализа ситуации воспользуйтесь примечанием к п.5.

8. Для полученных условий снимите диаграмму направленности вибратора в меридиональной плоскости.

1.5. Контрольные вопросы

1. Какой излучатель (вибратор) называется элементарным?
2. Как определяется ближняя и дальняя зона элементарных вибраторов?

3. Как определяется мощность излучения? Сопротивление излучения?
4. Как зависят амплитуды векторов \vec{E} и \vec{H} от расстояния в дальней зоне вибратора?
5. Изобразите ориентацию векторов \vec{E} , \vec{H} и $\vec{P}_{\text{ср}}$ в произвольной точке дальней зоны в меридиональной плоскости.
6. Изобразите ориентацию векторов \vec{E} , \vec{H} и $\vec{P}_{\text{ср}}$ в произвольной точке дальней зоны в экваториальной плоскости.
7. Что такое диаграмма направленности?
8. Получите выражения для составляющих поля щелевого вибратора, если известны выражения для составляющих поля электрического вибратора.
9. В чем состоит принцип перестановочной двойственности?
10. Изобразите силовые линии векторов \vec{E} и \vec{H} для электрического вибратора.
11. Изобразите силовые линии векторов \vec{E} и \vec{H} для магнитного вибратора.
12. Рассчитайте сопротивление излучения вибратора на частоте 3000 МГц, полагая, что длина вибратора равна 20 мм.
13. Рассчитайте амплитуду напряженности электрического и магнитного поля на расстоянии 1 м от вибратора при $\theta = 90^\circ$, полагая, что излучаемая мощность равна 1 Вт. Учтите, что амплитуда колебания равна модулю комплексной амплитуды этого колебания.

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 13.
2. Крамм М.Н. Сборник задач по основам электродинамики. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 256 с. – Глава 8.

Лабораторная работа № 2

ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕД

Целью работы является ознакомление с явлениями, возникающими при падении электромагнитных волн на плоскую границу раздела двух диэлектрических сред.

В работе используется диэлектрическое тело в форме полуцилиндра с одной плоской гранью. С помощью специальной направленной антенны формируется почти параллельный пучок радиоволн миллиметрового диапазона (длина волны в вакууме 8 мм). Такой пучок в первом приближении ведет себя как однородная, плоская волна, распространяющаяся в направлении оси симметрии пучка.

Изучаются зависимости углов и коэффициентов отражения и преломления такого пучка на плоской грани полуцилиндра от угла падения. Опыты проводятся при различных поляризациях электромагнитного поля в случаях падения пучка из воздуха в диэлектрик и из диэлектрика в воздух. При падении из диэлектрика в воздух наблюдается явление полного отражения и постепенное исчезновение этого явления с приближением к границе раздела со стороны воздуха плоской грани призмы, изготовленной из такого же диэлектрика, как полуцилиндр.

2.1. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка для исследования отражения и преломления электромагнитных волн при падении на плоскую границу раздела двух диэлектриков изображена на рис. 2.1.

На станине 6 установлен диэлектрический полуцилиндр 7 и три поворотные остронаправленные антенны: передающая 2, приемная отраженной волны 26 и приемная преломленной волны 11 (обе приемные антенны одинаковы). Полуцилиндр 7 стоит на вращающихся упорах 4 и может быть повернут так, что его плоская грань 8 будет обращена в сторону антенны преломленной волны 11. Между плоской гранью полуцилиндра 8 и упорами 4 может быть установлено металлическое отражающее зеркало.

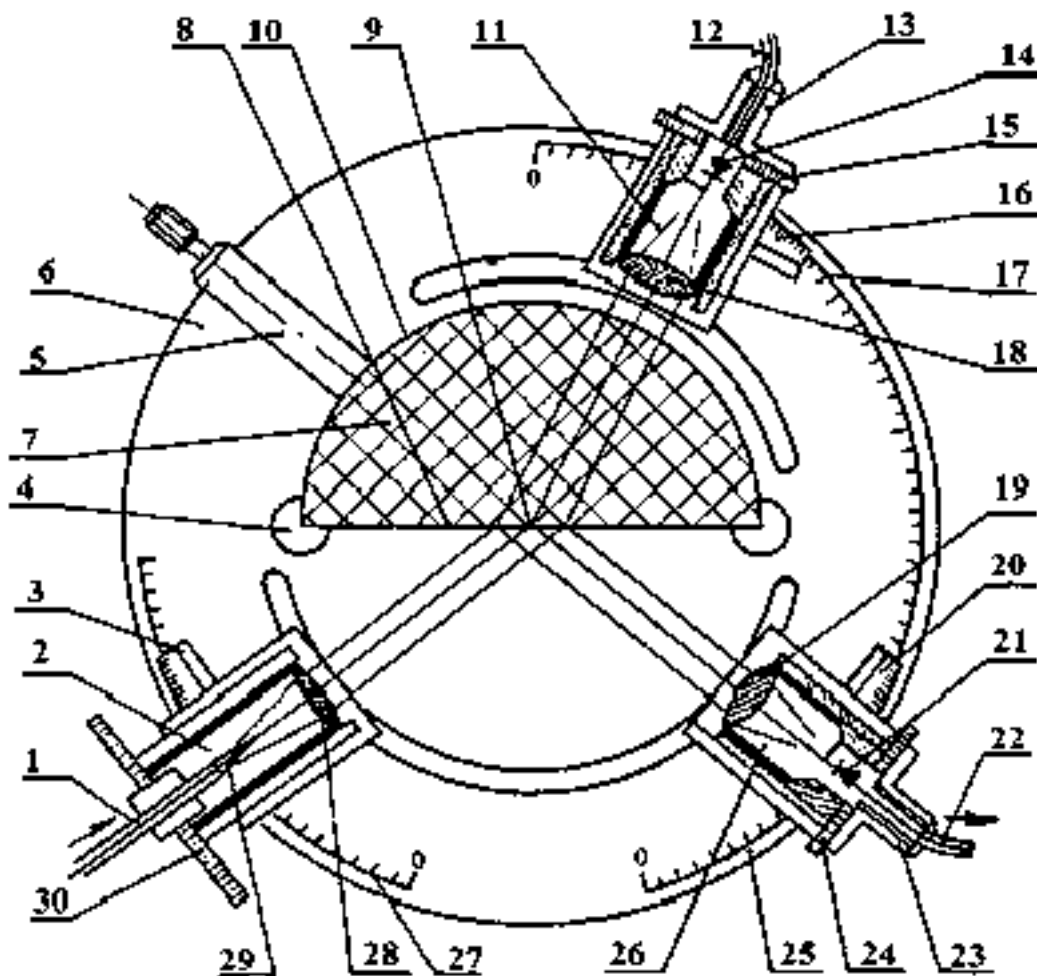


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки

Все антенны вращаются вокруг вертикальной оси симметрии станины 9, совпадающей с осью полуцилиндра и вертикальной средней линией его плоской грани. Направления максимального излучения антенн при их вращении все время проходят через центр плоской грани полуцилиндра. Отсчеты углов падения, отражения и преломления производятся с помощью шкал 27, 25, 17 и прозрачных визиров 3, 20, 16 соответственно. Для удобства отсчета деления на шкалах нанесены через 3° , а на отсчетных визирах – через 1° . Нули всех шкал соответствуют такому положению антенн, когда направления максимального излучения перпендикулярны плоскости полуцилиндра.

Вращение антенн производится с помощью специальных цилиндрических ручек 13 и 23 (у передающей антенны ручка не видна), расположенных в плоскости станины.

Передающая антенна состоит из диэлектрического излучателя 29, являющегося плавным заострением подводящего энергию диэлектрического волновода 1 и линзы из кристаллического кварца 28. Для устранения нежелательных боковых излучений излучатель окружен ребристой трубой из поглощающего материала. Каждая из приемных антенн состо-

ит из фокусирующей кварцевой линзы 19 и 18, детектора в волноводном оформлении 21 и 14. Для улучшения направленности антенн в них также установлены отрезки ребристых труб из поглощающего материала.

Изменение поляризации излучения передающей антенны производится поворотом на 90° диэлектрического волновода вместе с излучателем при помощи кольца 30. При вертикальном расположении широкой грани волновода электрическое поле излучения направлено вертикально, т.е. перпендикулярно плоскости падения (плоскость падения в установке горизонтальна, она проходит через направления максимального излучения антенн). При горизонтальном расположении широкой грани волновода, электрическое поле направлено параллельно плоскости падения.

Изменение поляризационных свойств приемных антенн производится поворотом детектора на 90° с помощью колец 24 и 15. Широкие стенки детекторных волноводов должны быть перпендикулярны направлению электрического поля принимаемой волны. Продетектированный сигнал снимается с антенн коаксиальными кабелями 22 и 12.

Электромагнитные колебания с длиной волны 8 мм подводятся от генератора к установке с помощью прямоугольного диэлектрического волновода 1.

Измерение амплитуды сигналов, снимаемых с детекторов, производится двумя милливольтметрами ВЗ-38, один из которых подключен к детектору в приемной антенне отраженной волны, другой – к детектору в приемной антенне преломленной волны.

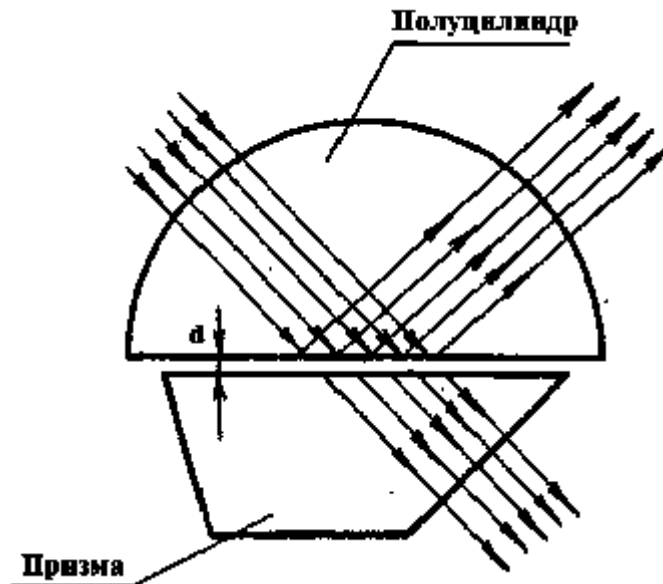


Рис. 2.2. Расположение диэлектрической призмы относительно диэлектрического полуцилиндра

На станине со стороны антенны преломленной волны предусмотрены упоры для установки диэлектрической призмы (на рис. 2.1 не пока-

заны). При этом одна из боковых граней призмы оказывается параллельной плоской грани полуцилиндра (рис.2.2). Расстояние d между ними можно изменять с помощью передвижной каретки 5. Поскольку ось каретки направлена под углом 30° к этим граням, изменение расстояния между гранями ровно вдвое меньше изменения положения каретки, отсчитываемого по ее шкале.

Принцип действия установки. Благодаря совмещению оси цилиндрической поверхности полуцилиндра и оси вращения антенн, условия преломления электромагнитных волн на этой его границе при повороте антенн не изменяются. Следовательно, наблюдаемые изменения амплитуд сигналов, снимаемых с приемных антенн, являются только функцией угла падения на плоскую грань полуцилиндра.

Характеристики использованных в установке детекторов практически квадратичны, т.е. сигнал на их выходе (показание измерительного усилителя) пропорционален квадрату амплитуды напряженности поля принимаемой электромагнитной волны. Следовательно, сигнал на выходе приемной антенны, расположенной по одну сторону от границы раздела с передающей, пропорционален квадрату коэффициента отражения, а сигнал на выходе антенны, расположенной по другую сторону от границы, пропорционален квадрату коэффициента преломления.

Определение модуля коэффициента отражения производится с использованием формулы:

$$R = \sqrt{A_0 / A_M},$$

где A_0 – амплитуда сигнала, отраженного от диэлектрика; A_M – амплитуда сигнала, отраженного от металлического зеркала (коэффициент отражения от металлического зеркала близок к единице).

Абсолютная величина коэффициента преломления устанавливается совмещением результатов измерений в области углов падения, близких к нормальному ($\varphi \approx 0$), с теоретически вычисленным значением.

При изучении падения волны из диэлектрика в воздух полуцилиндр переворачивается на 180° по отношению к положению, показанному на рис. 2.1. При этом волна от передающей антенны входит в диэлектрик через цилиндрическую боковую поверхность перпендикулярно к ней при любом развороте антенны. При углах падения, больших угла полного отражения, сигнал в антенне преломленной волны исчезает, а сигнал в антенне отраженной волны перестает зависеть от угла падения. Если при этом поднести к плоской грани полуцилиндра металлическое зеркало, отраженный сигнал не изменится. Это говорит о том, что отражение является полным.

Если к плоской грани полуцилиндра приблизить диэлектрическую призму (она тоже изготовлена из органического стекла), отражение ста-

новится неполным, и появляется преломленная волна (см. рис. 2.2), Если все антенны при этом установлены под углом 50° , волна, прошедшая через воздушный зазор, падает на выходную грань призмы перпендикулярно ее поверхности и, преломляясь на ней, не изменяет направления распространения. Можно устанавливать угол падения отличным от 50° (в пределах 45° - 60°), но при этом приемную антенну преломленной волны придется подстраивать до максимума сигнала. Изменяя величину воздушного зазора между призмой и полуцилиндром, можно наблюдать переход от полного отражения (при достаточно широком зазоре) до исчезновения отражения (при достаточно малом зазоре).

2.2. Элементы теории

В данной лабораторной работе используются диэлектрики с одинаковой магнитными проницаемостями ($\mu_1 = \mu_2$). Для этого случая углы отражения $\varphi_{\text{отр}}$ и преломления Ψ , как в случае перпендикулярной, так и в случае параллельной поляризации, связаны с углом падения φ соотношениями:

$$\varphi = \varphi_{\text{отр}}; \quad (2.1)$$

$$\frac{\sin(\Psi)}{\sin(\varphi)} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}; \quad (2.2)$$

здесь ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость среды, из которой волна падает; ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которую волна попадает.

В случае перпендикулярной поляризации, при условии $\mu_1 = \mu_2$, выражения для коэффициентов преломления T_{\perp}^E и отражения R_{\perp}^E можно записать в виде [1]:

$$T_{\perp}^E = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos(\varphi)}{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \sin^2(\varphi)}} \quad (2.3)$$

$$R_{\perp}^E = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos(\varphi) - \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \sin^2(\varphi)}}{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \sin^2(\varphi)}} \quad (2.4)$$

В случае параллельной поляризации, при условии $\mu_1 = \mu_2$, выражения для T_{\parallel}^E и R_{\parallel}^E можно записать в виде:

$$T_{\parallel}^E = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2} \cdot \cos(\varphi)}{\varepsilon_2 \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \sin^2(\varphi)}} \quad (2.5)$$

$$R_{\parallel}^E = \frac{\varepsilon_2 \cdot \cos(\varphi) - \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \sin^2(\varphi)}}{\varepsilon_2 \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \sin^2(\varphi)}} \quad (2.6)$$

В работе исследуются явления полного преломления и полного внутреннего отражения ([1], с. 119-123). Угол полного преломления φ_B (угол Брюстера) в нашем случае, когда $\mu_1 = \mu_2$, существует только для параллельной поляризации:

$$\varphi_B = \arcsin \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} \right) \quad (2.7)$$

Угол полного внутреннего отражения $\varphi_{\text{пво}}$ существует при $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ и определяется формулой:

$$\varphi_{\text{пво}} = \arcsin \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \right) \quad (2.8)$$

При углах падения, больших угла полного внутреннего отражения, коэффициент отражения равен по модулю единице. Строгое решение электродинамической задачи показывает, что в этом случае вместо преломленной однородной плоской волны, распространяющейся под некоторым углом к границе раздела, наблюдается неоднородная плоская волна, распространяющаяся вдоль границы раздела. Амплитуда электромагнитного поля этой волны экспоненциально убывает при увеличении расстояния d от границы раздела:

$$E(d) = E_0 \cdot \exp(-kd) \quad (2.9)$$

Волны, амплитуды которых экспоненциально убывают при удалении от плоской границы, называют поверхностными.

Коэффициент k в (2.9) определяется соотношением:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \sin^2(\varphi) - 1}. \quad (2.10)$$

Можно показать, что если в поле этой поверхностной волны окажется какое-либо тело, амплитуда отраженной волны уменьшится, и часть энергии будет проходить через границу. В частности, если это тело будет выполнено из такого же диэлектрика и будет иметь плоскую границу, то в нем пойдет плоская волна под таким же углом, как падающая. Амплитуда этой волны зависит от величины воздушного зазора d (см.рис.2.2). Для коэффициента преломления справедливо соотношение:

$$T_E(d) = \left[1 + \frac{\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \cdot \text{sh}^2(kd)}{4 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \sin^2(\varphi) - 1 \right) \cdot (1 - \sin^2(\varphi))} \right]^{-1/2} \quad (2.11)$$

При стремлении зазора между границами раздела к нулю, коэффициент преломления стремится к единице, а коэффициент отражения – к

нулю. Такой результат очевиден, поскольку граница раздела при этом практически исчезает.

При больших значениях d зависимость $T_E(d)$ становится экспоненциальной:

$$T_E(d) = 4 \sqrt{\frac{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \sin^2(\varphi) - 1\right) \cdot (1 - \sin^2(\varphi))}{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} - 1}} e^{-kd} \quad (2.12)$$

Экспоненциальный характер зависимости (2.12) связан с экспоненциальным спаданием поля (2.9).

2.3. Домашнее задание

При выполнении задания считайте, что длина волны используемых в работе электромагнитных колебаний $\lambda_0 = 8$ мм. Применяемый в работе диэлектрик – органическое стекло, диэлектрическая проницаемость которого $\varepsilon = 2,6$, для воздуха примите $\varepsilon = 1$.

1. Ознакомьтесь с методикой выполнения лабораторных работ (Приложение П.1). Изучите основные положения теории отражения и преломления электромагнитных волн на плоской границе раздела сред. Ознакомьтесь с описанием экспериментальной установки (п.2.1). Будьте готовы ответить на вопросы:

- Как устанавливается нужная поляризация в передающей и приемной антеннах?
- Как устанавливается нужный угол падения?
- Как регистрируются угол отражения и угол преломления?
- Как проводится обработка результатов измерений при определении модуля коэффициента отражения?
- Как перейти от исследования падения из воздуха в диэлектрик к исследованию падения из диэлектрика в воздух?

2. Рассчитайте и постройте график зависимости угла преломления от угла падения для случаев падения из диэлектрика в воздух и из воздуха в диэлектрик. Углы откладывайте в градусах; учтите, что угол падения $\varphi \in (0, 90^\circ)$.

3. Рассчитайте угол Брюстера и угол полного отражения во всех возможных ситуациях.

4. Рассчитайте и постройте зависимость модуля коэффициента отражения от угла падения для случаев: а) падение из воздуха в диэлектрик при перпендикулярной поляризации волны; б) падение из диэлектрика в воздух при параллельной поляризации волны.

5. Рассчитайте и постройте зависимости модуля коэффициентов отражения и преломления от угла падения для данных, указанных в табл.

2.1. Номер задания соответствует номеру лабораторного занятия.

Таблица 2.1. Данные домашнего задания

Задание	Номер занятия			
	1	2	3	4
Вид поляризации	Параллельная	Перпендикулярная	Параллельная	Перпендикулярная
Параметры сред	$\varepsilon_1 = 1$ $\varepsilon_2 = 2,6$	$\varepsilon_1 = 2,6$ $\varepsilon_2 = 1$	$\varepsilon_1 = 1$ $\varepsilon_2 = 2,6$	$\varepsilon_1 = 2,6$ $\varepsilon_2 = 1$

2.4. Лабораторное задание

1. Снимите зависимости углов преломления и отражения, а также модуля коэффициента отражения от угла падения из воздуха в диэлектрик при заданной поляризации волны (см. табл. 2.1). Для регистрации углов преломления и отражения добивайтесь таких положений приемных антенн, при которых амплитуда сигнала с выхода детектора максимальна. По измеренной амплитуде сигнала с выхода детектора отраженной волны определяйте модуль коэффициента отражения. Учтите, что нормировка при экспериментальном определении коэффициента отражения описана в разделе 2.1. «Описание экспериментальной установки», подраздел «Принцип действия».

2. Измените поляризацию волны и снова снимите зависимость модуля коэффициента отражения от угла падения из воздуха в диэлектрик.

3. Снимите зависимость угла преломления и модуля коэффициента отражения от угла падения из диэлектрика в воздух при заданной поляризации волны (см. табл. 2.1). При определении коэффициента отражения для нормировки используйте показания вольтметра в секции отраженной волны, полученные при нескольких значениях угла падения, превышающего угол полного отражения (усредните).

4. **Дополнительное задание (выполняется по указанию преподавателя).** Экспериментально снимите зависимости коэффициентов отражения и преломления от величины воздушного зазора (см. рис. 2.2) при параллельной поляризации для угла падения $\varphi = 50^\circ$ в случае падения из диэлектрика в воздух. Для этих же условий с помощью ПК рассчитайте зависимость коэффициента преломления от величины воздушного зазора.

2.5. Контрольные вопросы

1. Дайте определение коэффициента отражения и коэффициента преломления.

2. Дайте определение угла Брюстера и угла полного отражения.

3. Изобразите ориентацию векторов \vec{E} , \vec{H} и \vec{P}_{cp} в падающей, отра-

женной и преломленной волнах в случае: а) перпендикулярной поляризации; б) параллельной поляризации.

4. При какой поляризации наблюдается явление полного преломления в случае сред с одинаковыми магнитными проницаемостями?

5. Назовите условие полного внутреннего отражения.

6. В каких случаях фаза волны при отражении: а) не изменяется; б) изменяется на 180° ?

7. Как связаны между собой коэффициенты отражения и преломления по электрическому и магнитному полю?

8. Как формулируются граничные условия для векторов поля на границе раздела двух сред?

9. На границу раздела двух сред падает волна с круговой поляризацией. Каков в общем случае характер поляризации отраженной и преломленной волн?

10. Плоская электромагнитная волна нормально падает на поверхность идеального металла. Чему равняются коэффициенты отражения по вектору \vec{E} и по вектору \vec{H} ?

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 6.

2. Крамм М.Н. Сборник задач по основам электродинамики. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 256 с. – Глава 5.

Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДА ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Целью работы является исследование поля волны H_{10} в прямоугольном волноводе.

3.1. Описание экспериментальной установки

На рис. 3.1 изображена схема установки для исследования поля волны H_{10} в волноводе прямоугольного сечения размером 72x34 мм, которая состоит из измерительной волноводной линии и секций, соединенных фланцами.

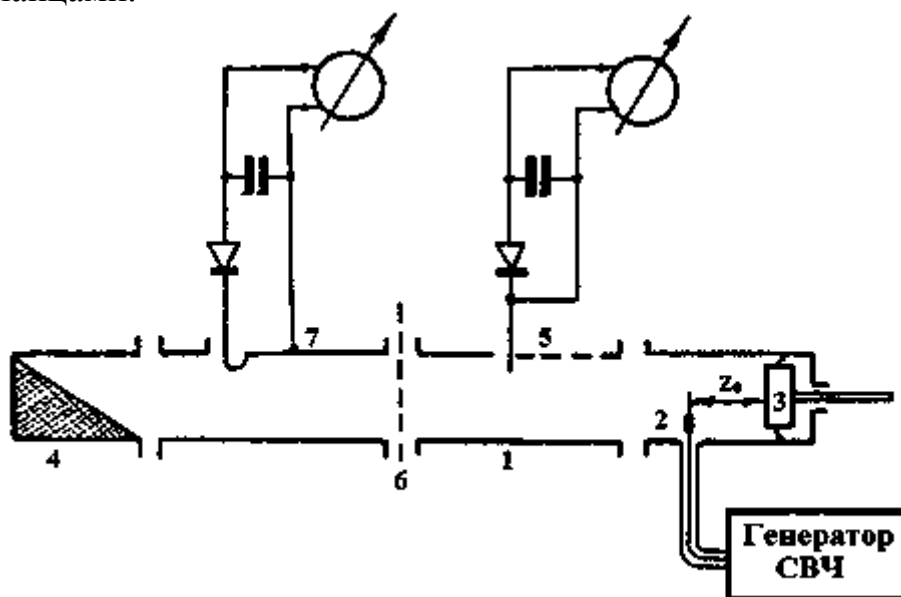


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки

Источником колебаний в данной работе служит генератор СВЧ, работающий в 10-сантиметровом диапазоне волн. СВЧ колебания по коаксиальному кабелю поступают к штырю 2, являющемуся возбудителем поля в волноводе. Подвижный поршень 3 используется для согласования выходного сопротивления возбуждающего устройства (штыря) с волноводом. Режим согласования обеспечивает наиболее интенсивное возбуждение волновода. На конец волновода может подключаться закорачивающий металлический поршень (для создания режима стоячей волны) или поглощающая нагрузка 4 (для создания режима бегущей волны). Нагрузка 4 представляет собой отрезок волновода, куда вставлено несколько поглощающих пластинок, расположенных параллельно электрическим силовым линиям поля волны H_{10} . Отрезок волновода 1 с продольной щелью в широкой стенке, вдоль которой перемещается измерительная головка с зондом 5, проходящим внутри волновода, является волно-

водной измерительной линией. Зонд линии соединен с СВЧ детектором. Продетектированный сигнал по коаксиальному кабелю подводится к милливольтметру ВЗ-38, благодаря чему оказывается возможным измерять относительные значения амплитуды напряженности электрического поля в волноводе. Так как режим детектирования – квадратичный, то показания милливольтметра пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля в точке расположения зонда. В одном из фланцевых соединений сделан специальный зазор b для введения в волновод фильтров – металлических решеток, пластины которых идут параллельно широкой или узкой стенке волновода.

Поперечная измерительная линия 7 служит для изучения распределения напряженностей электрического и магнитного полей в поперечном сечении волновода. Так как в широкой стенке прямоугольного волновода с волной типа H_{10} нельзя прорезать поперечную щель, не нарушив распределения поля в волноводе, зонд поперечной линии движется вместе с притертой крышкой в верхней стенке.

Для измерения напряженности электрического поля в качестве зонда используется небольшой штырь, вводимый в волновод, а для измерения напряженности магнитного поля – небольшая петля. Конструктивно электрический и магнитный зонды выполнены в виде отдельных детекторных головок, вставляемых в отверстие в притертой крышке по мере необходимости.

3.2. Элементы теории

Полый металлический волновод представляет собой трубу с хорошо проводящими стенками. Схематически прямоугольный волновод показан на рис.3.2.

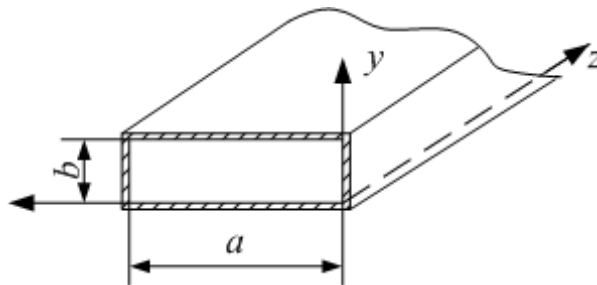


Рис. 3.2. Прямоугольный металлический волновод

В полой металлическом волноводе могут существовать волны типа E_{mn} и H_{mn} (волны E-типа и H-типа). Для волны E-типа $\dot{E}_z \neq 0$, $\dot{H}_z = 0$ (ось z совмещена с продольной осью волновода). В случае волны H-типа $\dot{H}_z \neq 0$, $\dot{E}_z = 0$. Волна конкретного типа в волноводе может распространяться, если $\frac{\lambda_0}{\sqrt{\mu\epsilon}} < \lambda_{кр}$ или $f > f_{кр}$, где $\lambda_0 = c/f$ – длина волны генератора; ϵ и μ – относительные диэлектрическая и магнитные проницаемости сре-

ды, заполняющей волновод; $\lambda_{кр}$ критическая длина волны, которая определяется типом волны и размерами поперечного сечения волновода; $f_{кр} = \frac{c}{\sqrt{\mu\varepsilon} \lambda_{кр}}$ – критическая частота для волны данного типа. Для

волн Е-типа и Н-типа в прямоугольном волноводе

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (3.1)$$

где a – ширина волновода, b – высота волновода (по умолчанию принимается, что $a > b$, см. рис. 6.1)); при проведении расчетов $\lambda_{кр}$ удобно записывать в виде:

$$\lambda_{кр} = \frac{2a}{\sqrt{m^2 + \left(n\frac{a}{b}\right)^2}} = \frac{2b}{\sqrt{n^2 + \left(m\frac{b}{a}\right)^2}} \quad (3.2)$$

Волной основного типа называют волну с наибольшей критической длиной волны в данном волноводе. В прямоугольном волноводе волной основного типа является волна H_{10} (так как по умолчанию $a > b$). Одноволновым режимом называют режим работы волновода, когда может распространяться только основной тип волны. В прямоугольном волноводе условие единственности распространения волны H_{10} может быть записано в виде:

$$a < \frac{\lambda_0}{\sqrt{\mu\varepsilon}} < 2a, \quad 2b < \frac{\lambda_0}{\sqrt{\mu\varepsilon}}.$$

Фазовая скорость волны в волноводе:

$$v_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{\mu\varepsilon} \sqrt{1 - \frac{1}{\mu\varepsilon} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}}. \quad (3.3)$$

Длина волны в волноводе:

$$\lambda_{в} = \frac{v_{\phi}}{f} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\mu\varepsilon} \sqrt{1 - \frac{1}{\mu\varepsilon} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}}. \quad (3.4)$$

Составляющие поля бегущей волны в волноводе изменяются вдоль оси распространения z по закону $\exp(-jh_z z) = \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda_{в}} z\right)$, где

$$h = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \frac{1}{\mu\epsilon} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2}$$

– продольное волновое число. Если $\frac{\lambda_0}{\sqrt{\mu\epsilon}} > \lambda_{кр}$, то продольное волновое число становится мнимым: $h = -j\alpha_z$. При этом данный тип волны затухает, и составляющие поля убывают вдоль оси z по закону $\exp(-\alpha_z z)$, где

$$\alpha_z = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\frac{1}{\mu\epsilon} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2 - 1}. \quad (3.5)$$

Составляющие поля волны типа H_{10} в прямоугольном волноводе:

$$\begin{aligned} \dot{E}_y &= -j \frac{\omega \mu_a}{g} C_2 \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) \cdot e^{-jhz} \\ \dot{H}_x &= j \frac{h}{g} C_2 \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) \cdot e^{-jhz} \\ \dot{H}_z &= C_2 \cos\left(\frac{\pi}{a} x\right) \cdot e^{-jhz} \end{aligned} \quad (3.6)$$

где $g = \pi/a$. Остальные составляющие волны типа H_{10} равны нулю.

Комплексная амплитуда вектора плотности поверхностного тока на стенках волновода или на металлической поверхности диафрагмы, введенной в поперечное сечение волновода:

$$\dot{J}_{пов} = \left[\bar{1}_n \dot{H} \right], \quad (3.7)$$

где $\bar{1}_n$ – вектор единичной нормали, направленный из металла внутрь волновода; \dot{H} – комплексная амплитуда магнитного поля у стенки волновода. Если линии поверхностного тока параллельны кромкам щели, то такая щель практически не излучает, максимальная интенсивность излучения достигается, если линии поверхностного тока перпендикулярны кромкам щели (щелью называют прямоугольное отверстие, длина которого значительно превосходит ширину).

Волну в волноводе можно возбудить:

а) проводником (штырем) с током, расположив его вдоль направления вектора напряженности электрического поля в тех местах, где это поле должно иметь максимальное значение;

б) рамкой (петлей) с током, поместив ее в волноводе там, где напряженность магнитного поля должна быть максимальна. Плоскость

рамки необходимо ориентировать перпендикулярно магнитным силовым линиям;

в) щелью, которую необходимо прорезать перпендикулярно силовым линиям тока, протекающего по стенкам волновода. На щели с помощью внешнего источника должно быть создано электрическое поле, силовые линии которого продолжали бы линии тока.

При извлечении энергии из волновода или при регистрации составляющих поля в волноводе пользуются штырем (электрический зонд), петлей (магнитный зонд) или щелью, располагая их по тем же правилам, что и для возбуждения волновода.

Обычно волновод на одном конце закрывается проводящей стенкой (подвижным поршнем). Благодаря этому, передача энергии происходит только в одну сторону. Величина мощности, отдаваемой источником в волновод (интенсивность возбуждения), зависит от расстояния z_0 между возбуждающим элементом и поршнем. **Наибольшая интенсивность возбуждения** при возбуждении штырем с током, перпендикулярным широкой стенке, получается, если расстояние $z_0 = (2m + 1)\lambda_B/4$, где m – целое число. Минимальной интенсивности соответствует расстояние $z_0 = (2m)\lambda_B/4$.

3.3. Домашнее задание

1. Ознакомьтесь с методикой выполнения лабораторных работ (Приложение П.1). Изучите основные положения теории распространения электромагнитных волн в прямоугольном металлическом волноводе. Ознакомьтесь с описанием экспериментальной установки (п.3.1). Будьте готовы ответить на вопросы:

- Какие составляющие векторов \vec{E} и \vec{H} существуют в волне типа H_{10} ? Как идут силовые линии этих векторов применительно к рис.3.2?
- Каково назначение подвижного поршня?
- Как измеряется длина волны в волноводе?
- Как измерить зависимость нормированной амплитуды напряженности электрического или магнитного поля от поперечной координаты x ? Как при этом обрабатывать показания милливольтметра?

2. Определите, какие типы волн могут распространяться в заполненном воздухом прямоугольном волноводе при длине волны генератора λ_0^* (см. табл. 3.1). Номер задания соответствует номеру занятия, размеры поперечного сечения даны в описании установки.

3. Определите диапазон длин волн, в котором волновод может быть применен при условии, что распространяется только основной тип волны H_{10} . Рассчитайте длину волны типа H_{10} в волноводе λ_B , если гене-

ратор СВЧ работает на частоте 3000 МГц, ширина $a = 72$ мм, волновод заполнен воздухом.

4. Повторите п.3 задания при условии, что волновод заполнен диэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого равна ε (см. табл. 3.1).

5. Запишите формулы для составляющих поля волны H_{10} . Рассчитайте и постройте графики зависимости нормированной амплитуды (не путайте с комплексной амплитудой) всех трех составляющих поля волны типа H_{10} от координаты x . Для нормировки используйте максимальные значения амплитуды соответствующих составляющих. При этом для волны H_{10} :

$$\frac{|\dot{E}_y|}{|\dot{E}_y|_{\max}} = \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right); \quad \frac{|\dot{H}_x|}{|\dot{H}_x|_{\max}} = \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right); \quad \frac{|\dot{H}_z|}{|\dot{H}_z|_{\max}} = \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right); \quad x \in (0, a).$$

6. Рассчитайте и постройте график зависимости $\frac{|\dot{E}_y|}{|\dot{E}_y|_{\max}}$ от разности $(z - z_1)$ в режиме стоячей волны, полагая, что в точке $z = z_1$ находится короткозамыкающий металлический поршень. Расчет проведите в диапазоне значений $-\lambda_B \leq (z - z_1) \leq 0$ в условиях п.3. Используйте формулу:

$$\frac{|\dot{E}_y(z - z_1)|}{|\dot{E}_y|_{\max}} = \left| \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_B}(z - z_1)\right) \right|.$$

7. Изобразите картину поля и картину распределения токов в стенках волновода в случае волны типа H_{10} . Изобразите на картине токов щели, являющиеся неизлучающими, и щели, являющиеся излучающими (подпишите).

Таблица 3.1. Данные домашнего задания

Задание	Номер занятия			
	1-е занятие	2-е занятие	3-е занятие	4-е занятие
$\lambda_0^*, м$	0,07	0,075	0,066	0,10
ε	2,0	2,6	3,8	6,0

3.4. Лабораторное задание

1. Убедитесь, что конфигурация лабораторной установки соответствует рис.3.1. Обратите внимание, что при наличии поглощающей нагрузки отраженной волной можно пренебречь, и в волноводе реализуется режим бегущей волны, когда амплитуда составляющих поля практически не изменяется вдоль оси волновода, а изменяется только фаза. Включите

генератор СВЧ с частотой колебаний 3 ГГц. Перемещая подвижный поршень 3, добейтесь максимальной интенсивности возбуждения поля в волноводе. Интенсивность возбуждения оценивайте по уровню сигнала, снимаемого с измерительной линии.

2. Снимите и постройте зависимость интенсивности возбуждения волновода от расстояния z_0 между поршнем и возбуждающим штырем (рис.3.1). При этом учитывайте, что за интенсивность можно принять показания милливольтметра, подключенного к измерительной линии, которые пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля. Вернитесь к положению поршня, обеспечивающему максимальную интенсивность. **Учтите**, что $z_0 = z_{\text{лин}} + 30 \text{ мм}$, где $z_{\text{лин}}$ – показания измерительной линейки на узле перемещения поршня (рис.3.1).

3. Изучите структуру поля волны типа H_{10} в прямоугольном волноводе. Для этого в волновод последовательно введите диафрагму с вертикальными щелями, затем диафрагму с горизонтальными щелями. С помощью зонда-штыря в поперечной измерительной линии определите, изменилась ли интенсивность поля за диафрагмой. Сделайте заключение об ориентации вектора напряженности электрического и магнитного поля. Сделайте вывод, какая диафрагма пропускает волну типа H_{10} , а какая отражает.

4. С помощью измерительной линии измерьте длину волны в волноводе, запишите найденное значение и сравните его с расчетным значением. Методика измерения длины волны в волноводе приведена в Приложении П.3. Измерения производятся тогда, когда в волноводе обеспечивается существование режима стоячей волны. Чтобы добиться этого, в щель между продольной и поперечной секциями поместите отражающую диафрагму.

5. Зафиксируйте и измерьте положение минимума напряженности электрического поля в центральной области линейки измерительной линии. Обозначьте полученную координату зонда как z_1 . Снимите зависимость показаний измерительного вольтметра от координаты зонда измерительной линии в пределах одной длины волны λ_B , начиная с z_1 (показания вольтметра и значения координаты зонда также понадобятся ниже в п.7). Методика съема пространственных распределений составляющих поля представлена в Приложении П.2. Полагая детектирование приближенно квадратичным, на основании проведенных измерений определите

зависимость $\frac{|\dot{E}_y|}{|\dot{E}_y|_{\text{max}}}$ от $(z - z_1)$ и нанесите полученные точки на рассчитанный дома в п.6 график аналогичной зависимости для стоячей волны в пределах $(z_1 - \lambda_B) \leq z \leq z_1$.

6. Извлеките из волновода отражающую диафрагму. Исследуйте распределение поля в поперечном сечении волновода, для чего с помощью поперечной измерительной линии (поз.7 на рис.3.1) снимите зависимости нормированной амплитуды составляющих H_x и H_z вектора напряженности магнитного поля от координаты x . Детектирование считайте квадратичным. В волноводе, как и раньше, сохраняйте режим бегущей волны. Полученные точки нанесите на графики, полученные в п.5 домашнего задания.

Примечание. Переход от исследования составляющей H_x к исследованию составляющей H_z производят поворотом магнитного зонда (петля) в секции 7. Вспомните, что максимальная амплитуда ЭДС, индуцированной в петле, достигается, если петля ориентирована перпендикулярно вектору \vec{H} . Для исследования составляющей H_x устанавливают зонд в центре широкой стенки ($x = a/2 = 36\text{мм}$) и поворотом петли добиваются максимально возможных показаний милливольтметра. Для исследования составляющей H_z при этом же положении зонда показания милливольтметра должны быть минимальны.

7. **Дополнительное задание (выполняется по указанию преподавателя).** Используя полученные в п.5 лабораторного задания показания измерительного вольтметра и соответствующие им значения координаты зонда измерительной линии, рассчитайте и постройте зависимость

$$\sqrt{\frac{U(z - z_1)}{U_{\max}}} \text{ от } \left| \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda_B} (z - z_1) \right) \right|.$$

Проанализируйте эту зависимость и сделайте вывод, является ли детектирование квадратичным, либо вывод – в каком диапазоне напряжений детектирование является квадратичным. Учтите, что при квадратичном детектировании показания вольтметра пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля.

3.5. Контрольные вопросы

1. Почему волна типа H_{10} является волной основного типа в прямоугольном волноводе?
2. Объясните смысл неравенств для длины волны генератора, при выполнении которых в волноводе обеспечивается одноволновый режим.
3. Какие составляющие векторов \vec{E} и \vec{H} отличны от нуля для волны: а) типа H_{10} ; б) типа H_{01} ?
4. Как с помощью экспериментальной установки определить фазовую скорость волны типа H_{10} . Как зависит фазовая скорость от размеров поперечного сечения при неизменной частоте генератора?
5. Почему диафрагма с щелями, параллельными координатной оси u , препятствует распространению волны типа H_{10} в прямоугольном вол-

новоде?

6. Почему наиболее интенсивное возбуждение волновода **получается при** расстоянии между поршнем и штырем, примерно кратным нечетному числу четвертой длины волны в волноводе?

7. Как влияют размеры волновода на длину волны в волноводе при неизменной частоте электромагнитных колебаний?

8. Какая волна в прямоугольном волноводе является основной для волн электрического типа и почему? (Положить, что волны магнитного типа не возбуждаются.)

9. Как можно возбудить штырем с электрическим током волну E_{11} (или волну H_{01}) в прямоугольном волноводе?

10. Как можно возбудить волну H_{10} рамкой с электрическим током в прямоугольном волноводе? Каково должно быть расстояние между поршнем и рамкой, чтобы интенсивность возбуждения была наибольшей?

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 8.

2. Крамм М.Н. Сборник задач по основам электродинамики. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 256 с. – Глава 6.

Лабораторная работа №4 ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО РЕЗОНАТОРА, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА БЫСТРЫХ ВОЛН

Целью работы является исследование свойств электромагнитного поля для колебаний типа Н в объемном резонаторе, созданном на базе прямоугольного волновода.

4.1. Описание экспериментальной установки

Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.1. Источником энергии является генератор СВЧ, работающий в трехсантиметровом диапазоне. Атенюатор позволяет вводить затухание в тракт, чтобы регулировать уровень сигнала. Вентиль, совместно с аттенюатором, обеспечивает развязку между генератором и резонатором.

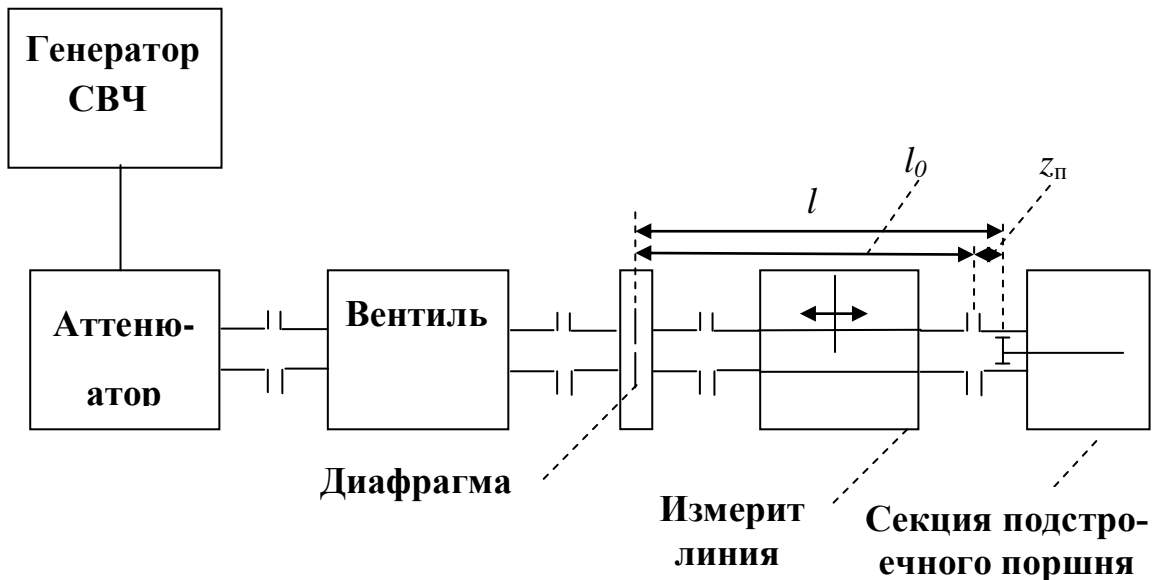


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки

Колебания в резонаторе возбуждаются с помощью диафрагмы с прямоугольным отверстием (щелью), которая ориентирована вдоль линий вектора напряженности магнитного поля в возбуждаемом колебании. Резонатор образован отрезком прямоугольного волновода между возбуждающей диафрагмой и подстроечным поршнем. При этом длина резонатора:

$$l = l_0 + z_{\text{п}}, \quad (4.1)$$

где l_0 – длина части резонатора без секции с поршнем, $z_{\text{п}}$ – продольная координата поршня в подстроечной секции. Перемещая поршень, можно изменять резонансную частоту в резонаторе (если число вариаций поля

вдоль оси z не равно нулю, это условие выполняется для всех колебаний типа Н). Отрезок прямоугольного волновода в резонаторе конструктивно является частью измерительной линии, в которой электрический зонд (штырь) может перемещаться вдоль продольной щели, прорезанной в центре широкой стенки. Зонд соединен с детекторной головкой, которая подключена к измерительному вольтметру. Поскольку штырь электрического зонда ориентирован вертикально, то с помощью измерительной линии можно снимать продольное распределение амплитуды напряженности электрического поля в резонаторе $|\dot{E}_y(z)|$.

Для измерения добротности резонатора используют то обстоятельство, что объемный резонатор по своим частотно-избирательным свойствам в окрестности резонансной частоты $f_{\text{рез}}$ аналогичен одиночному колебательному контуру. При этом, например, амплитуда составляющей электрического поля зависит от частоты вблизи $f_{\text{рез}}$ по закону:

$$E_m = \frac{E_{m \text{ рез}}}{\sqrt{1 + \left(2Q \frac{f_0 - f_{\text{рез}}}{f_0}\right)^2}}. \quad (4.2)$$

где f_0 – частота генератора СВЧ, Q – добротность резонатора. Так как в данной работе расстройка $f_0 - f_{\text{рез}}$ изменяется за счет изменения длины резонатора, то для получения малой расстройки длина резонатора также изменяется в малых пределах при постоянной частоте генератора. При этом резонансную частоту можно разложить в степенной ряд по длине резонатора:

$$\frac{f_{\text{рез}} - f_0}{f_0} \approx -\frac{(l - l_0)A}{l_0}, \quad (4.3)$$

где $f_0 = f_{\text{рез}}$ при $l = l_0$, т.е. l_0 – длина резонатора, соответствующая резонансу на частоте f_0 ; множитель A для колебания типа H_{mp} при ширине резонатора a определяется по формуле:

$$A = \frac{1}{1 + \left(\frac{m \cdot l_0}{p \cdot a}\right)^2}. \quad (4.4)$$

С учетом приближения (4.3) резонансная зависимость (4.2) может быть записана в виде:

$$E_m = \frac{E_{m \text{ рез}}}{\sqrt{1 + \left(2QA \frac{l - l_0}{l_0}\right)^2}}. \quad (4.5)$$

Учтите, что при вращении винта поршня на один оборот длина резонатора изменяется на 0,5 мм. Если при перестройке поршня резонатора амплитуда поля уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с резонансным значением (или амплитуда напряжения на выходе квадратичного детектора уменьшается в 2 раза), то длина резонатора l^* удовлетворяет условию $\frac{|l^* - l_0|}{l_0} = \frac{1}{2QA}$, откуда добротность

$$Q = \frac{l_0}{2A|l^* - l_0|} \quad (4.6)$$

4.2. Элементы теории

Объемный резонатор представляет собой замкнутую полость, ограниченную металлическими стенками, внутри которой могут существовать электромагнитные колебания. Обычно объемные резонаторы получают на базе прямоугольного или круглого металлического волновода, располагая на концах отрезка волновода плоские металлические торцевые поверхности (рис.4.1).

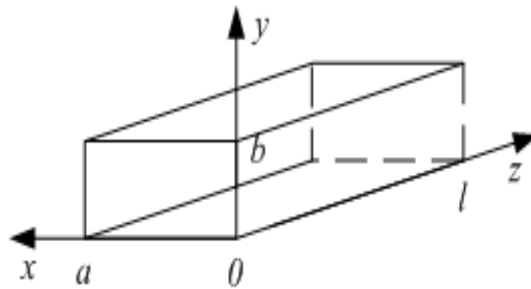


Рис. 4.1. Прямоугольный объемный резонатор

Если в волноводе может распространяться волна типа H_{mn} (или E_{mn}), то в резонаторе могут существовать колебания типа H_{mnp} (или E_{mnp}). причем условие существования колебаний имеет вид:

$$l = p \lambda_g / 2 \quad (4.7)$$

где l – длина резонатора, λ_g – длина волны в исходном волноводе, p – положительное целое число (для колебаний E-типа индекс p может быть равен нулю, для колебаний H-типа $p \neq 0$). Резонанс для колебаний типа

E_{mnp} ($p = 0$) существует на критической частоте для волны типа E_{mn} в исходном волноводе: $f_{\text{рез}} = f_{\text{кр}(mn)}$.

Резонансная частота колебаний типа H_{mnp} или E_{mnp} в прямоугольном резонаторе определяется в общем случае выражением

$$f_{\text{рез}} = \frac{c}{2\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2}, \quad (4.8)$$

здесь $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме; μ и ε – относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости среды, заполняющей резонатор; a , b и l – ширина, высота и длина резонатора, соответственно.

Колебаниями основного типа в прямоугольном и круглом резонаторах называют колебания, имеющие наименьшую резонансную частоту.

Комплексные амплитуды проекций векторов поля для колебания типа E_{mnp} в прямоугольном резонаторе:

$$\begin{aligned} \dot{E}_x &= -C_3 \frac{p\pi}{l} \frac{m\pi}{g^2} \frac{m\pi}{a} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right); \\ \dot{E}_y &= -C_3 \frac{p\pi}{l} \frac{p\pi}{g^2} \frac{n\pi}{b} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right); \\ \dot{E}_z &= C_3 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right); \\ \dot{H}_x &= jC_3 \frac{\omega_{\text{рез}} \varepsilon_a}{g^2} \frac{n\pi}{b} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right); \\ \dot{H}_y &= -jC_3 \frac{\omega_{\text{рез}} \varepsilon_a}{g^2} \frac{m\pi}{a} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right); \\ \dot{H}_z &= 0. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Здесь

$$g = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} = \frac{\pi}{a} \sqrt{m^2 + n^2 \left(\frac{a}{b}\right)^2}.$$

Комплексные амплитуды проекций векторов поля для колебания типа H_{mnp} в прямоугольном резонаторе:

$$\begin{aligned} \dot{E}_x &= C_M \frac{\omega_{\text{рез}} \mu_a}{g^2} \frac{n\pi}{b} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right); \\ \dot{E}_y &= -C_M \frac{\omega_{\text{рез}} \mu_a}{g^2} \frac{m\pi}{a} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right); \\ \dot{E}_z &= 0; \\ \dot{H}_x &= jC_M \frac{p\pi}{l} \frac{m\pi}{g^2} \frac{m\pi}{a} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right); \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\dot{H}_y = jC_m \frac{p\pi}{l} \frac{n\pi}{g^2} \frac{n\pi}{b} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right);$$

$$\dot{H}_z = -jC_m \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right).$$

Здесь коэффициент g определяется так же, как и для колебания типа E_{mnp} .

Комплексная амплитуда вектора плотности тока смещения $\dot{J}_{см} = j\omega\epsilon_a \dot{E}$.

Комплексная амплитуда вектора плотности поверхностного электрического тока на стенке резонатора $\dot{J}_{пов} = [\bar{1}_n \dot{H}]$, где \dot{H} – вектор магнитного поля на стенке; $\bar{1}_n$ – вектор единичной нормали к поверхности металла, направленный внутрь резонатора.

Энергия, запасенная в резонаторе:

$$W_{зап} = \frac{\epsilon_a}{2} \int_V |\dot{E}|^2 dV = \frac{\mu_a}{2} \int_V |\dot{H}|^2 dV, \quad (4.11)$$

где интегрирование ведется по объему резонатора.

Средняя мощность потерь в стенках резонатора:

$$P_{ср пот мет} = \sqrt{\frac{\omega_{рез}\mu_0}{8\sigma_m}} \int_S |\dot{H}_\tau|^2 dS, \quad (4.12)$$

где σ_m – удельная проводимость металла стенки (считается, что относительная магнитная проницаемость металла равна единице); $|\dot{H}_\tau|$ – амплитуда (модуль комплексной амплитуды) касательной составляющей магнитного вектора на поверхности металла; интегрирование ведется по замкнутой поверхности стенок резонатора.

Средняя мощность потерь в диэлектрике, заполняющем резонатор:

$$P_{ср пот диэл} = \frac{\sigma_d}{2} \int_V |\dot{E}|^2 dV, \quad (4.13)$$

где $\sigma_d = \omega_{рез}\epsilon\epsilon_0 \operatorname{tg}(\delta)$ – удельная проводимость диэлектрика; ϵ и $\operatorname{tg}(\delta)$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь диэлектрика; интегрирование ведется по объему резонатора.

Собственная добротность резонатора:

$$Q = \omega_{рез} W_{зап} / P_{ср пот}, \quad (4.14)$$

где $P_{ср пот} = P_{ср пот мет} + P_{ср пот диэл}$. Собственная добротность может быть записана в виде:

$$Q = [(1/Q_{мет}) + (1/Q_{диэл})]^{-1}. \quad (4.15)$$

Здесь

$$Q_{мет} = \omega_{рез} W_{зап} / P_{ср пот мет}$$

– добротность резонатора за счет потерь в металлических стенках;

$$Q_{\text{диэл}} = \omega_{\text{рез}} W_{\text{зап}} / P_{\text{ср пот диэл}} = 1/\text{tg}(\delta).$$

Добротность $Q_{\text{мет}}$ для колебания типа $H_{\text{мор}}$ в прямоугольном резонаторе, обусловленная потерями в металлических стенках резонатора:

$$Q_{\text{мет}} = \sqrt{\frac{\omega_{\text{рез}} \mu_0 \sigma_{\text{м}}}{8}} \frac{al^3 \left(m^2 + \left(\frac{pa}{l} \right)^2 \right)}{(pa)^3 \left(1 + \frac{l}{2b} \right) + m^2 l^3 \left(1 + \frac{a}{2b} \right)} \quad (4.16)$$

Нагруженная добротность резонатора:

$$Q_{\text{нагр}} = \omega_{\text{рез}} \frac{W_{\text{зап}}}{P_{\text{ср пот}} + P_{\text{ср нагр}}} = \frac{Q}{1 + K_{\text{св}}}, \quad (4.17)$$

где $P_{\text{ср нагр}}$ – средняя мощность, поглощаемая во внешних устройствах, с которыми связан резонатор; $P_{\text{ср пот}}$ – средняя мощность потерь в самом

резонаторе; $K_{\text{св}} = \frac{P_{\text{ср нагр}}}{P_{\text{ср пот}}}$ – коэффициент связи резонатора с внешними

устройствами. В колебательном контуре (курс теории цепей) также вводятся понятия собственной и нагруженной добротности, а коэффициент связи определяется аналогично и рассчитывается, как отношение резонансного сопротивления к шунтирующему контур сопротивлению.

При этом полоса пропускания по уровню амплитуды $0,707 = 1/\sqrt{2}$ или на выходе квадратичного детектора по уровню 0,5:

$$\Pi = f_{\text{рез}} / Q_{\text{нагр}}. \quad (4.18)$$

4.3. Домашнее задание

1. Ознакомьтесь с методикой выполнения лабораторных работ (Приложение П.1). Изучите основные положения теории прямоугольного объемного резонатора. Ознакомьтесь с описанием экспериментальной установки (п.4.1). Будьте готовы ответить на вопросы:

- Каков смысл индексов m , n , p в обозначении типа колебания в объемном резонаторе?
- Какие составляющие поля у колебания типа H_{10p} ? Как амплитуда составляющей вектора \vec{E} зависит от координаты x ? От координаты z ?
- Как в лабораторной работе ориентирована щель в диафрагме, возбуждающей колебания типа H_{10p} ?
- Как в данной работе проводится настройка резонатора на колебание типа H_{10p} для заданного значения индекса p ?
- Распределение какой составляющей электромагнитного поля можно снять с помощью измерительной линии?

- Как в лабораторной работе можно менять связь резонатора с генератором СВЧ?
- Как в лабораторной работе измеряется добротность объемного резонатора?

2. Рассчитайте длину резонатора для возбуждения колебаний типа $H_{10(10)}$, $H_{10(11)}$ и $H_{10(12)}$ в резонаторе с размерами поперечного сечения 23мм x 10мм на частоте 11,5 ГГц. Учтите, что для данных типов колебаний индексы $m=1$; $n=0$, а $p=10, 11$ и 12 , соответственно. Для каждого значения длины резонатора определите координату подстроечного поршня по формуле $z_{\Pi} = l - l_0$, где $l_0 = 157,0$ мм. Полученные значения сведите в таблицу 4.1, оставив 2 строчки для экспериментальных значений z_{Π} и l .

3. Определите, какому неравенству должна удовлетворять частота генератора, чтобы в резонаторе с размерами поперечного сечения 23мм x 10мм могли возбуждаться колебания: а) типа E_{11P} ; б) типа H_{01P} (считайте, что длину резонатора можно менять в зависимости от выбранного типа).

4. В пределах изменения координаты z от 53 мм до 103 мм рассчитайте значения z , соответствующие положению минимумов и максимумов распределения амплитуды напряженности электрического поля на частоте 11,5 ГГц, тип колебания $H_{10(10)}$. Полученные значения координаты z сведите в таблицу 4.2 (отдельные строчки для координат минимумов и максимумов), оставьте 2 строчки для экспериментальных значений.

5. Для условий п.1 рассчитайте и постройте график зависимости нормированной амплитуды напряженности электрического поля от координаты z в пределах от 53 мм до 103 мм. Нормировку проводите по максимальной амплитуде напряженности электрического поля. По горизонтальной оси откладывайте $z - z_1$, где $z_1 = 51,2$ мм – координата, соответствующая нулевой отметке на линейке измерительной линии. При построении учитывайте точки, полученные в п.3. Используйте следующую расчетную формулу:

$$\frac{|\dot{E}_y(z)|}{|\dot{E}_y|_{\max}} = \left| \sin\left(\frac{p\pi}{l} z\right) \right|.$$

6. Рассчитайте собственную добротность резонатора за счет потерь в стенках для колебаний типа $H_{10(10)}$ и $H_{10(11)}$ при выполнении условий п.1. Считайте, что стенки резонатора покрыты слоем серебра (удельная проводимость $\sigma = 6,1 \cdot 10^7$ См/м). Результаты расчета занесите в таблицу 4.3, где предусмотрите строчки для рассчитанных значений собственной добротности и экспериментальных значений нагруженной добротности и нагруженной полосы пропускания.

7. Изобразите картины поля в продольном (плоскость XOZ) и поперечном сечениях и картины токов (в объеме) для колебаний типа, заданных в таблице 4.1.

8. Определите, как должна ориентироваться поперечная диафрагма в торце прямоугольного резонатора для возбуждения колебания типа H_{10P} . Запишите объяснение ориентации диафрагмы.

9. Запишите формулу для определения коэффициента связи резонатора с внешними устройствами, если известны собственная и нагруженная добротность резонатора.

Таблица 4.1. Данные домашнего задания

	Номер занятия			
	1-е занятие	2-е занятие	3-е занятие	4-е занятие
Тип колебания	H_{102} E_{110}	H_{101} E_{111}	H_{011} E_{112}	H_{012} E_{210}

4.4. Лабораторное задание

1. Включите генератор СВЧ и вольтметр, дайте им прогреться 15 минут. Убедитесь, что нажата кнопка Π , а на генераторе выставлена частота 11,51 ГГц, которая с учетом погрешности прибора соответствует рабочей частоте 11,50 ГГц. Проверьте, что на стрелочном индикаторе генератора установлен уровень примерно 25 мкА (определяется ручкой “Уров. мощности”). Убедитесь, что СВЧ колебания подаются от генератора по коаксиальному кабелю к резонатору. На вольтметре установите предел измерений «10 мВ». Переключатель коэффициента усиления установите в положение « $K=1$ ». Если стрелка на вольтметре «зашкаливает», увеличьте ослабление аттенюатора.

Установите поршень резонатора в положение $z_{\Pi} = 0.00$ мм. На аттенюаторе установите ослабление 0. Установите зонд измерительной линии в положение на шкале линии $z_{Л} = z - z_1 = 3$ мм (см. п.4 расчетного задания).

2. Перемещая поршень резонатора, добейтесь возбуждения колебания типа $H_{10(10)}$. Если стрелка измерительного вольтметра «зашкаливает», подберите ослабление аттенюатора, чтобы при установленном пределе измерения вольтметра «10 мВ», а стрелка вольтметра находилась на второй половине шкалы. Запишите полученные значения координаты поршня z_{Π} и длины резонатора l в таблицу 4.1 из домашней подготовки. Сравните установленную длину резонатора с расчетным значением. При наличии заметных расхождений проанализируйте ситуацию и определите причину ошибки.

3. Снимите зависимость нормированной амплитуды напряженности электрического поля от координаты z с шагом 2 мм. Условия съема и

нормировки должны соответствовать п.4 расчетного задания. Методика съема пространственных распределений составляющих поля приведена в Приложении П.2. Учтите, что в **данном и последующих пунктах** экспериментального задания детектирование является **квадратичным**, то есть показания вольтметра пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля. Полученные точки нанесите на график, построенный при выполнении п.5 расчетного задания. При этом по горизонтали, как в п.5 расчетного задания, откладываете координаты по линейке измерительной линии: $z_{\text{лин}} = z - z_1$, где $z_1 = 52,15$ мм – координата в резонаторе, соответствующая нулевой отметке на линейке измерительной линии

Отдельно зафиксируйте координаты z точек минимальной и максимальной амплитуды ($z = z_{\text{лин}} + z_1$). Занесите эти координаты в таблицу 4.2 из домашней подготовки.

4. Установите зонд измерительной линии в положение одного из максимумов. Исследуйте АЧХ резонатора. Для этого при фиксированной, как и ранее, частоте генератора СВЧ, снимите нормированную зависимость показаний вольтметра (в мВ) от изменения длины резонатора, т.е. зависимость U_m от $(l - l_0)$, где l_0 – длина резонатора, соответствующая резонансу на частоте генератора, $(l - l_0) = (z_{\Pi} - z_{\Pi \text{рез}})$, z_{Π} – текущая координата поршня, $z_{\Pi \text{рез}}$ – координата поршня при резонансе. При съеме резонансной кривой аккуратно вращайте винт поршня в одном направлении, проходя положение резонанса. Постройте снятую кривую и по графику определите изменение длины резонатора в пределах полосы пропускания. Учтите, что уровень $1/\sqrt{2}$ для отсчета границ полосы пропускания соответствует измерению амплитуды колебаний, а в установке показания приборов пропорциональны квадрату амплитуды колебаний. Вычислите нагруженную добротность резонатора и полосу пропускания для колебания $H_{10(10)}$ (методика приведена в описании экспериментальной установки). Результаты занесите в таблицу 4.3 из домашней подготовки.

5. Пользуясь измеренной нагруженной добротностью и собственной добротностью резонатора, рассчитанной дома, найдите коэффициент связи резонатора с внешними устройствами $K_{\text{св}}$ для колебания $H_{10(10)}$ (см. п.9 расчетного задания).

6. Выполните п.2 экспериментального задания для колебания типа $H_{10(11)}$. Перемещая зонд измерительной линии, зафиксируйте координаты z точек минимальной и максимальной амплитуды. Сравните эти координаты с координатами, полученными в таблице 4.2 из домашней подготовки. Объясните полученный результат в отчете.

7. Повторите п.4 и п.5 экспериментального задания для колебаний типа $H_{10(11)}$.

Дополнительное задание (выполняется по указанию преподавателя).

8. Выполните п.2 экспериментального задания для колебания типа $H_{10(12)}$.

4.5. Контрольные вопросы

1. При каком типе колебаний резонансная частота прямоугольного объемного резонатора не зависит от его длины?

2. Как изменится резонансная частота прямоугольного объемного резонатора при колебаниях типа H_{101} в случае уменьшения его ширины?

3. Какие граничные условия накладываются при определении поля электрического и магнитного типов в прямоугольном объемном резонаторе?

4. Как зависят от координат x , y , z компоненты электромагнитного поля внутри резонатора для колебаний типа E_{110} , H_{101} , $H_{10(10)}$?

5. Нарисуйте картину поля и картину токов колебаний типа E_{110} , H_{101} , H_{102} .

6. Нарисуйте зависимость амплитуды поля в резонаторе от частоты при возбуждении поля элементарным вибратором.

7. Каким образом выводятся расчетные формулы для собственной добротности объемных резонаторов?

8. Как связана нагруженная добротность с собственной добротностью резонатора?

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 12.

2. Крамм М.Н. Сборник задач по основам электродинамики. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 256 с. – Глава 7.

Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ГРЕБЕНЧАТОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ

Целью работы является исследование электромагнитного поля поверхностной волны и замедляющих свойств гребенчатой структуры.

5.1. Описание экспериментальной установки

Все измерения в данной работе проводятся в трехсантиметровом диапазоне волн. Экспериментальная установка, используемая для исследования гребенчатых структур, изображена на рис. 5.1. Источником колебаний в данной работе служит генератор СВЧ. Электромагнитные колебания от генератора по коаксиальному кабелю 1 поступают к рупору 2, являющемуся возбудителем поверхностных волн. Объектами исследования являются сменные гребенки 3, которые помещены на станину 4, выполненную из металла с большой проводимостью.

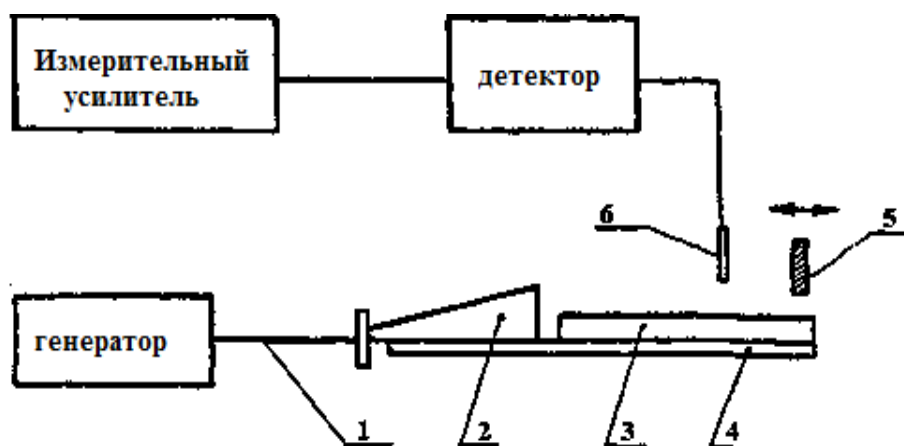


Рис. 5.1. Схема экспериментальной установки

Фрагмент гребенчатой структуры и ее геометрические параметры показаны на рис.5.2. Поверхностная волна распространяется вдоль координаты z . Амплитуда поля поверхностной волны экспоненциально убывает при удалении от поверхности гребенки (вдоль координаты x , при $x > l$, где l – глубина паза гребенки). Амплитуда СВЧ поля над замедляющей структурой измеряется с помощью зонда 6, который перемещается в вертикальной плоскости микрометрическим винтом. Зонд через коаксиальный кабель соединен со вспомогательным волноводом, который оканчивается детекторной головкой. Отсюда принятый и протектированный сигнал поступает на вольтметр ВЗ-38. Из-за квадратичного закона детектирования показания вольтметра пропорциональны квадрату амплитуды вертикальной компоненты электрического поля $|\dot{E}_x|$.

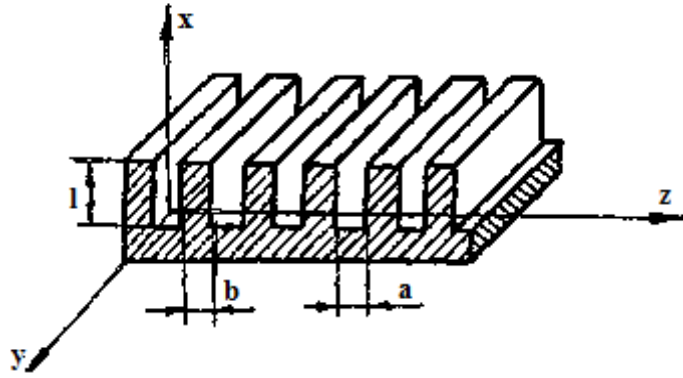


Рис. 5.2. Гребенчатая замедляющая структура.

Для измерения длины волны над гребенкой λ_Γ служит подвижная металлическая пластина – короткозамыкатель 5, перемещение которого вдоль оси z измеряется по шкале с нониусом. За счет отражения поверхностной волны от короткозамыкателя в области между рупором и короткозамыкателем возникает стоячая волна, в которой амплитуда $|\dot{E}_x|$ изменяется по закону:

$$|\dot{E}_x| = |\dot{E}_x|_{\max} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_\Gamma}(z - z_\Pi)\right),$$

где z_Π – координата пластины короткозамыкателя. Изменяя положение короткозамыкателя, можно регистрировать положение минимумов зависимости $|\dot{E}_x(z_\Pi)|$ и, в результате, измерять длину волны над гребенкой (подробнее про измерение длины волны см. в Приложении П.3). При известной длине волны над гребенкой λ_Γ и длине волны генератора $\lambda_0 = c/f$, в работе определяют коэффициент замедления поверхностной волны $K_{\text{зам}}$ (см. раздел 5.2 «Элементы теории»).

5.2. Элементы теории

Исследование поля гребенчатой замедляющей структуры требует использования решения уравнений электродинамики, записанных для гребенчатого волновода (см. [1], с. 310–313, 320–324). Теория такого волновода сложна, поэтому при проведении инженерных расчетов вводят некоторые упрощения:

- протяженность волновода вдоль оси y полагается бесконечной;
- поле волны электрического типа над гребенчатым волноводом (область 1, $x \geq l$ на рис. 5.2) определяется преимущественно основной гармоникой, составляющие поля которой можно записать в виде:

$$\dot{E}_z = A_0 \cdot e^{-px} \cdot e^{-jhz}; \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned}\dot{E}_x &= -j A_0 \cdot \frac{h}{p} \cdot e^{-px} \cdot e^{-jhz} ; \\ \dot{H}_y &= -j \frac{\omega \cdot \varepsilon_0}{p} \cdot A_0 \cdot e^{-px} \cdot e^{-jhz} ;\end{aligned}$$

Здесь A_0 – амплитудный коэффициент, p – поперечное волновое число, $p \geq 0$:

$$p = \beta \operatorname{tg}(\beta l) ; \quad (5.2)$$

h – продольное волновое число:

$$h = \sqrt{\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 + p^2} = \sqrt{\beta^2 + p^2} ; \quad (5.3)$$

$\beta = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = 2\pi f / c = 2\pi / \lambda_0$, λ_0 – длина волны генератора.

Уравнение (5.2) называют характеристическим уравнением гребенчатой системы. Волны магнитного типа в гребенчатом волноводе не существуют. Поле в канавках "гребенки" (при $0 \leq x < l$) можно определить, пользуясь выражениями:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{z\text{гр}} &= B_0 \sin \beta x ; \\ \dot{H}_{y\text{гр}} &= -j \frac{\beta}{\omega \mu_0} \cdot B_0 \cos \beta x.\end{aligned} \quad (5.4)$$

При исследовании поля в канавках гребенки, его можно рассматривать как поле стоячей волны в двухплоскостной линии, которая образована ребрами "гребенки", короткозамкнутыми на конце. При сравнении результатов расчета с результатами эксперимента необходимо помнить, что использование в расчетах основной гармоники поля над гребенчатым волноводом возможно, если мал период структуры ($a + b$) (см. рис.5.2), и влияние более высоких гармоник на структуру медленной волны невелико.

Приближенное решение дает результаты, достаточно близкие к истинным значениям. Практически, "гребенка" с бесконечно малым шагом неосуществима. В общем случае, когда расстояние между соседними ребрами соизмеримо с длиной волны и толщина ребер не мала, расчет поля в ребристой структуре существенно усложняется.

Важным параметром замедляющих структур является коэффициент замедления:

$$K_{\text{зам}} = \frac{v_{\Phi}}{c} = \frac{\beta}{h} = \frac{\lambda_{\text{гр}}}{\lambda_0} . \quad (5.5)$$

В соответствии с (5.2) и (5.3)

$$K_{\text{зам}} = \frac{\beta}{\sqrt{\beta^2 + p^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\operatorname{tg} \beta l)^2}} = |\cos \beta l| \quad \text{при } p \geq 0 . \quad (5.6)$$

5.3. Домашнее задание

1. Ознакомьтесь с методикой выполнения лабораторных работ (Приложение П.1). Изучите основные положения теории распространения поверхностной электромагнитной волны в гребенчатой замедляющей структуре. Ознакомьтесь с описанием экспериментальной установки (п.5.1). Будьте готовы ответить на вопросы:

- Какие составляющие векторов \vec{E} и \vec{H} существуют в исследуемой волне применительно к гребенчатой структуре, фрагмент которой показан на рис.5.2 ?
- Как рассчитать фазовую скорость и длину поверхностной волны?
- С помощью какого узла экспериментальной установки формируется поле поверхностной волны?
- Как экспериментально определяется длина поверхностной волны? Коэффициент замедления?
- По какому закону изменяется амплитуда поля поверхностной волны при удалении от гребенки в направлении нормали к ее поверхности?

2. Постройте график зависимости коэффициента замедления фазовой скорости как функции глубины паза гребенки. В данном и последующих расчетах считайте частоту колебаний генератора равной 9,7 ГГц. Расчет проводите по приближенным формулам для бесконечно частой гребенки в области $l \in (0, \lambda_0/4)$, где $\lambda_0 = c/f$ – длина волны генератора.

3. Рассчитайте длину волны в четырех различных гребенчатых структурах. Параметры гребенок: $a = 1$ мм, $b = 1,15$ мм, l возьмите из табл. 5.1. Каждая бригада рассчитывает один из вариантов задания из табл. 5.1.

Таблица 5.1. Данные домашнего задания

№ гребенки	Номер занятия			
	1-е занятие	2-е занятие	3-е занятие	4-е занятие
1	2.0 мм	2.0 мм	2.0 мм	2.0 мм
2	4.0 мм	4.0 мм	4.0 мм	4.0 мм
3	6.0 мм	6.0 мм	6.0 мм	6.0 мм
4	6.5 мм	7.0 мм	5.0 мм	3.0 мм

4. Рассчитайте величины h и p для поверхностной волны над гребенками 2, 3, 4. Результаты расчетов сведите в таблицу 5.2, в которой предусмотрите строчку для экспериментальных значений этих величин.

5. Рассчитайте и постройте графики, характеризующие закон убы-

вания нормированной амплитуды составляющей \dot{E}_x поля поверхностной волны от координаты x для гребенок 2 и 3. Нормировку проведите по $|\dot{E}_{x0}|$ – амплитуде составляющей \dot{E}_x на расстоянии $l_0 = 3$ мм от поверхности гребенки. Используйте формулу для нормированной амплитуды E_x :

$$\frac{|\dot{E}_x(x')|}{|\dot{E}_{x0}|} = e^{-p \cdot x'},$$

где $x' = x - (l + l_0)$ – смещенная координата x , равная нулю на расстоянии $l_0 = 3$ мм от поверхности гребенки (см. рис. 5.2). По горизонтали на графиках откладывайте величину x' в пределах от 0 мм до 10 мм. Для обеих гребенок первый график данной зависимости постройте в линейном масштабе, а второй график – в логарифмическом масштабе по вертикальной оси.

5.4. Лабораторное задание

1. Проведите измерения длин поверхностных волн, существующих над гребенкой 1, а затем над гребенками 2 и 3. Для этого по нониусу короткозамыкателя необходимо измерить расстояние, отделяющее друг от друга два соседних минимума амплитуды напряженности электрического поля. Последнее расстояние будет равняться половине длины волны над гребенкой. По результатам эксперимента определите коэффициент замедления. Полученные значения коэффициента замедления покажите точками на графике, построенном в п.2 домашнего задания.

Примечание. В связи с эффектами интерференции (продумайте, какие волны могут интерферировать) возможно появление дополнительных минимумов амплитуды поля. Поэтому, перемещая короткозамыкатель, необходимо измерить положение нескольких последовательных минимумов и определить регулярную составляющую для половины длины волны.

2. Установите зонд на расстоянии 3 мм от поверхности гребенки (координата $x' = 0$). Удаляя зонд от гребенки с помощью микрометрического винта, снимите зависимость нормированной амплитуды составляющей \dot{E}_x от координаты x' для гребенчатой структуры 3. Пределы изменения координаты x' от 0 мм до 7 мм и условие нормировки должны соответствовать п. 5 домашнего задания. Учтите, что режим детектирования близок к **квадратичному**, то есть показания вольтметра пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля. Полученные экспериментальные точки нанесите на графики п.5 расчетного задания.

3. Найдите параметры p и h поверхностных волн для гребенчатой структуры 3. Для этого используйте экспериментальные данные, полу-

ченные при выполнении пунктов 1 и 2 экспериментального задания. Результаты занесите в табл.5.2.

4. По указанию преподавателя повторите пп. 2 и 3 экспериментального задания для гребенки 2.

5.5. Контрольные вопросы

1. Какие волны называются поверхностными?
2. Напишите и поясните смысл характеристического уравнения замедляющей гребенчатой системы?
3. Возможны ли поверхностные волны над гребенкой с глубиной паза 40 мм, если длина волны $\lambda_0 = 6$ см?
4. Какова структура поля: а) в канавках гребенки; б) над поверхностью гребенки? Изобразите примерную картину силовых линий электромагнитного поля.
5. Изобразите зависимость поперечного волнового числа p : а) от частоты колебаний; б) от глубины паза l .
6. Изобразите зависимость коэффициента замедления от длины волны генератора.
7. Получите выражение для среднего значения вектора Пойнтинга для поверхностной волны над гребенкой.
8. Как нужно было бы изменить блок-схему экспериментальной установки для того, чтобы короткозамыкатель мог оставаться неподвижным?
9. Что нужно изменить в экспериментальной установке, чтобы снять распределение составляющей поля H_y вдоль оси x ?
10. Каковы технические применения замедляющих систем?

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 15, раздел 15.2.

Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ Н-ОБРАЗНОГО МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Целью работы является изучение закономерностей распространения поверхностных волн на примере Н-образного металлодиэлектрического волновода.

6.1. Описание экспериментальной установки

Н-образный металлодиэлектрический волновод представляет собой диэлектрическую пластину, ограниченную с двух сторон металлическими плоскостями, как показано на рис. 6.1.

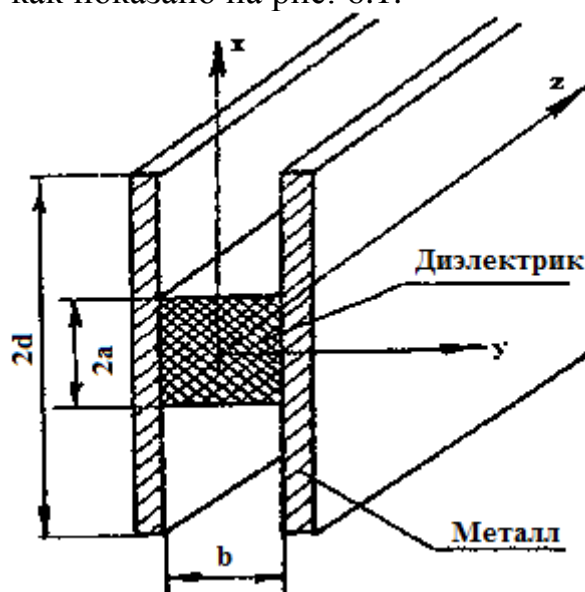


Рис. 6.1. Н-образный металлодиэлектрический волновод

Схема лабораторной установки изображена на рис. 6.2.

Источником колебаний служит генераторная секция трехсантиметрового диапазона 3, подсоединенная к возбудителю нужного типа волны 4.

Исследуемый Н-образный волновод 5 расположен на станине измерительной волноводной линии. Для измерения распределения поля вдоль линии служит изогнутый зонд 6, регистрирующий составляющую поля H_z . Зонд перемещается вдоль волновода с помощью каретки измерительной линии. Сигнал с зонда поступает на детектор 7 и после детектирования — на измерительный милливольтметр 8. Снятие распределения поля в поперечном сечении проводится с помощью зонда-петли 9, которая установлена в отверстии подвижной металлической пластины и ориентирована перпендикулярно оси $X H_x$. Данная пластина обеспечивает режим стоячей волны в волноводе и может перемещаться в поперечной плоскости (плоскость XOY) в направлении оси X (см.рис.6.1). Все измерения производятся при небольшом уровне мощности сигнала, поэтому

оба детектора работают в квадратичном режиме и, в результате, показания измерительного усилителя пропорциональны квадрату амплитуды измеряемой напряженности поля.

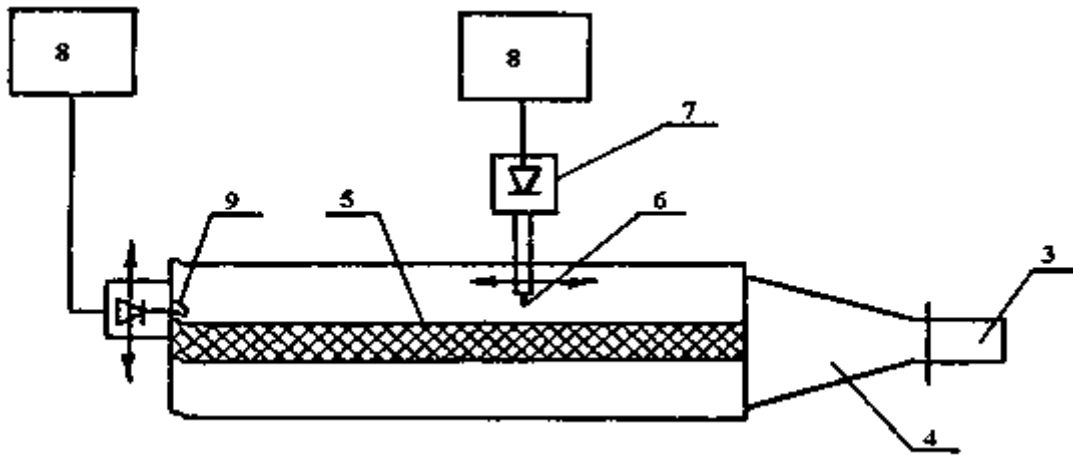


Рис. 6.2. Схема экспериментальной установки

Перемещая зонд 6 измерительной линии в режиме стоячей волны, измеряют длину волны в Н-образном волноводе (прочтите методику измерения длины волны в Приложении П.3). При известных длине волны в волноводе $\lambda_{\text{в}}$ и длине волны генератора $\lambda_0 = c/f$, в работе определяют коэффициент замедления поверхностной волны $K_{\text{зам}}$ (см. раздел 6.2 «Элементы теории»).

6.2. Элементы теории

В Н-образном волноводе могут распространяться волны различных типов. В данной лабораторной работе исследуются наиболее простые волны магнитного типа H_{m0} , составляющие поля которых не зависят от координаты y и вектор \vec{E} перпендикулярен металлическим пластинам. При этом конфигурация поля и продольное волновое число в Н-образном волноводе оказываются такими же, как для безграничной диэлектрической пластине толщиной $2a$.

Различные типы волн в диэлектрической пластине (см., например, [1]) подразделяются на четные, поперечные составляющие поля, которые являются четной функцией координаты x , и нечетные, поперечные составляющие поля которых описываются нечетной функцией. Например, на рис. 6.3 показано распределение нормированной поперечной составляющей H_x (аналогично для E_y) вдоль координаты x для волн H_{10} и H_{20} . Вне диэлектрической пластины, т.е. при $|x| > a$, поле убывает по экспоненциальному закону e^{-px} , а внутри пластины поперечные составляющие H_x и E_y изменяются по закону $\cos(gx)$ (для четных волн) или

$\sin(gx)$ (для нечетных волн). Число вариаций поля внутри диэлектрической пластины определяет индекс волны m .

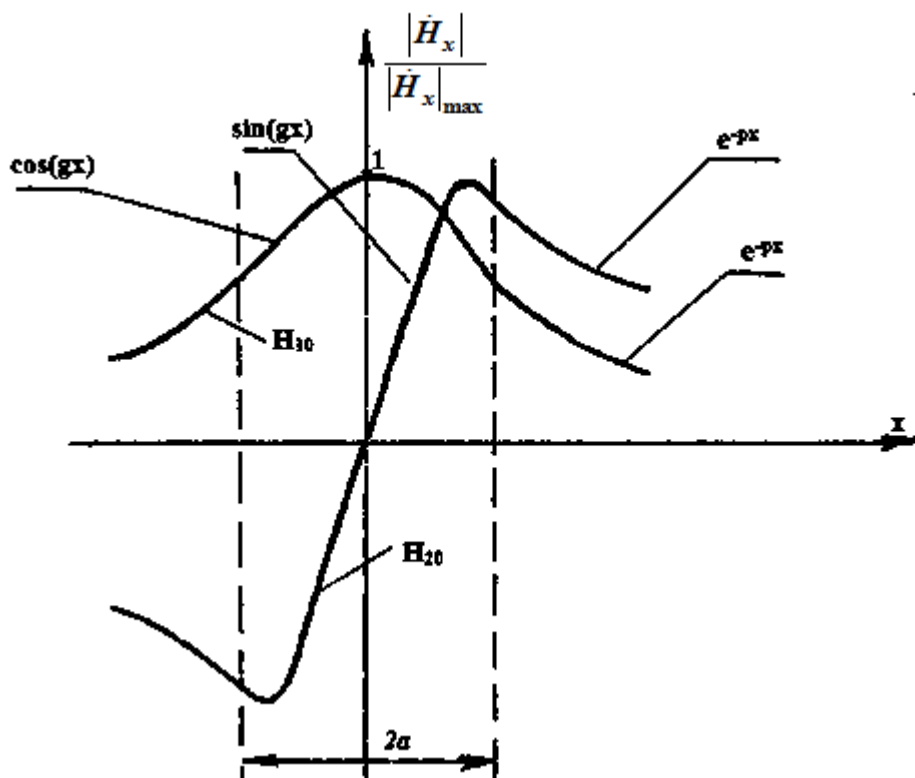


Рис. 6.3. Распределение поля волн H_{10} и H_{20}

В качестве материала диэлектрической пластины в данной установке применен полистирол ($\epsilon = 2,56$). При этом толщина пластины $2a = 19$ мм выбрана таким образом, чтобы в диапазоне волн $2,5 \text{ см} < \lambda_0 < 3,5 \text{ см}$ в Н-образном волноводе могли распространяться только два типа волн: H_{10} и H_{20} .

Расстояние между металлическими пластинами b не влияет на параметры распространения волн H_{10} и H_{20} ; из конструктивных соображений оно взято равным 10 мм, что соответствует ширине узкой стенки стандартного прямоугольного волновода 3-сантиметрового диапазона. Ширина металлических пластин $2d = 100$ мм выбрана так, чтобы поле исследуемых типов волн спадало к краям пластин практически до нуля.

Для возбуждения волн H_{10} и H_{20} в Н-образном волноводе используются два сменных возбуждателя. Возбудитель волны H_{10} (рис.6.4а) представляет собой плавный рупорный переход от прямоугольного волновода стандартного сечения $23 \times 10 \text{ мм}^2$ к Н-образному волноводу; внутри рупора расположена клинообразно расширяющаяся диэлектрическая пластина. Возбудитель такого типа обеспечивает плавную трансформацию волны H_{10} прямоугольного волновода в волну H_{10} Н-образного волновода. В возбуждатель волны H_{20} , (рис. 6.4б) сначала в прямоугольном волноводе удвоенной ширины, формируется волна H_{20} прямоугольного

волновода, которая затем постепенно трансформируется в волну H_{20} H -образного волновода.

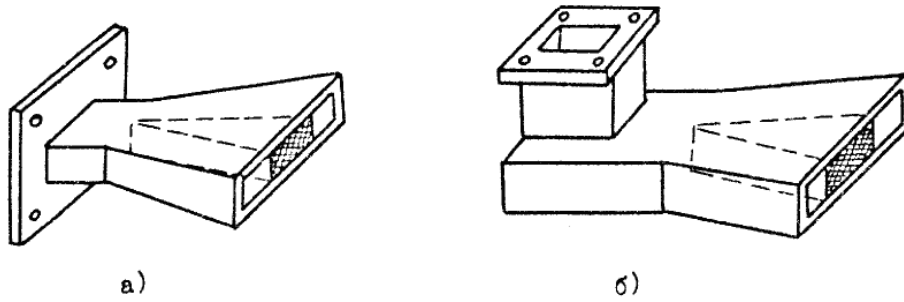


Рис. 6.4. Возбудители а – волны H_{10} и б – волны H_{20} .

Расчет полей в диэлектрической пластине начинается с определения поперечных волновых чисел p и g . Для этого составляется трансцендентное характеристическое уравнение (см., например, [1]), решения этого уравнения для волн H_{10} и H_{20} приведены в табл.6.1.

Таблица 6.1. Корни характеристического уравнения

$R = \beta a \sqrt{\varepsilon - 1}$	Для волны H_{10}		Для волны H_{20}	
	ga	pa	ga	pa
2,0	1,0298	1,7143	1,8955	0,6381
2,1	1,0483	1,8204	1,9506	0,7786
2,2	1,0654	1,9252	2,0004	0,9165
2,3	1,0814	2,0302	2,0456	1,0516
2,4	1,0964	2,1352	2,0872	1,1850
2,5	1,1105	2,2398	2,1253	1,3164
2,6	1,1237	2,3439	2,1606	1,4461
2,7	1,1364	2,4492	2,1933	1,5742
2,8	1,1482	2,5536	2,2239	1,7014
2,9	1,1596	2,6588	2,2523	1,8270
3,0	1,1702	2,7629	2,2790	1,9518

После того, как определены поперечные волновые числа p и g , можно определить продольное волновое число h , а также найти фазовую скорость волны с помощью формул:

$$h = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \varepsilon - g^2} \quad \text{или} \quad h = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 + p^2} \quad (6.1)$$

$$v_{\varphi} = \omega/h.$$

Важным параметром H -образного волновода является коэффициент замедления:

$$K_{\text{зам}} = \frac{v_{\varphi}}{c} = \frac{\beta}{h} = \frac{\lambda_{\text{в}}}{\lambda_0}. \quad (6.2)$$

где $\lambda_B = \frac{v_\Phi}{f} = \frac{2\pi}{h}$ – длина волны в волноводе, $\lambda_0 = \frac{c}{f}$ – длина волны генератора.

6.3. Домашнее задание

1. Ознакомьтесь с методикой выполнения лабораторных работ (Приложение П.1). Изучите основные положения теории Н-образного металлодиэлектрического волновода. Ознакомьтесь с описанием экспериментальной установки (п.6.1). Ознакомьтесь с методикой съема пространственных распределений составляющих поля, которая приведена в Приложении П.2. Ознакомьтесь с методикой измерения длины волны, которая приведена в Приложении П.3.

Будьте готовы ответить на вопросы:

- Какие составляющие поля существуют для волн типа H_{m0} применительно к рис. 6.1?
- Как экспериментально определяется длина волны в данной работе? Коэффициент замедления?
- Распределение какой составляющей поля в поперечном сечении волновода исследуется в данной работе?
- Как экспериментально определяется нормированная амплитуда составляющей поля в поперечном сечении ?

2. Пользуясь исходными данными из описания установки и таблицей 6.1, рассчитайте продольное волновое число h , коэффициент p , длину волны и коэффициент замедления фазовой скорости для волн типа H_{10} и H_{20} в Н-образном волноводе при частоте колебаний 10 ГГц. Результаты расчетов сведите в таблицу 6.2, предусмотрев строчку для экспериментально найденных значений этих величин.

3. Рассчитайте и постройте график поперечного распределения нормированной амплитуды составляющей H_x волны H_{10} при частоте колебаний 10 ГГц:

$$\frac{|\dot{H}_x|}{|\dot{H}_x|_{\max}} = \cos(gx), \quad |x| \leq a, \quad \text{и} \quad \frac{|\dot{H}_x|}{|\dot{H}_x|_{\max}} = \cos(ga) \cdot e^{-p(|x|-a)}, \quad |x| \geq a.$$

в диапазоне изменения x от -25 мм до $+25$ мм. Предварительно определите, в какой точке оси x амплитуда данной составляющей максимальна.

Примечание. Учтите, что максимальное значение амплитуды достигается внутри диэлектрика, поэтому в формулах амплитудный коэффициент поля в области $|x| \geq a$ определяется из условия равенства нормальных составляющих H_x на границе при $|x|=a$.

4. Аналогично п.3 рассчитайте и постройте график поперечного распределения составляющей H_x волны H_{20} при частоте поля 10 ГГц:

$$\frac{|\dot{H}_x|}{|\dot{H}_x|_{\max}} = |\sin(gx)|, \quad |x| \leq a, \quad \text{и} \quad \frac{|\dot{H}_x|}{|\dot{H}_x|_{\max}} = \sin(ga) \cdot e^{-p(|x|-a)}, \quad |x| \geq a.$$

6.4. Лабораторное задание

1. Убедитесь, что генератор СВЧ включен, и колебания в волновод подаются через возбудитель волны типа H_{10} (рис. 6.4а).

2. Измерьте длину волны в волноводе, работающем на волне типа H_{10} при частоте сигнала 10 ГГц. Пользуйтесь методикой измерения длины волны, которая приведена в Приложении П.3.

3. По полученному значению длины волны в волноводе определите коэффициент замедления и продольное волновое число. Занесите полученные экспериментально значения h , λ_B , $K_{\text{зам}}$ в таблицу 6.2.

4. Снимите распределение амплитуды составляющей поля H_x волны H_{10} в поперечном направлении. Пользуйтесь методикой съема пространственных распределений составляющих поля, которая приведена в Приложении П.2. При этом нормировка амплитуды и пределы изменения координаты x должны соответствовать п.3 домашнего задания. Учтите, что значению координаты $x = 0$ соответствуют показания линейки шкалы поперечного перемещения $x_{\text{лин}} = 92$ мм.

5. Полученные экспериментальные точки нанесите на полученный в домашнем задании график поперечного распределения нормированной амплитуды составляющей H_x . По графику в области $x > a$ определите значение поперечного волнового числа p . Занесите полученное значение в таблицу 6.2.

6. Повторите пп. 1-5 в случае возбуждения в волноводе волны H_{20} . Для этого замените секцию рис. 6.4а на секцию рис. 6.4б. Учтите, что принципиально важно **правильно сориентировать и соединить** секцию рис. 6.4б с генераторной секцией. При съеме поперечного распределения поля зонд 6 измерительной линии должен находиться в точке с координатой на линейке измерительной линии $z_{\text{лин}} = 25$ мм.

6.5. Контрольные вопросы

1. Какие типы волн изучаются в H -образном металлодиэлектрическом волноводе? Что такое четные и нечетные типы волн?

2. В каком диапазоне частот может распространяться: а) волна типа H_{20} ; б) волна типа H_{10} ?

3. Как, используя результаты эксперимента, полученные при выполнении пп. 2-4, определить h и p для волны H_{10} ?

4. Каким образом можно возбудить волны типа H_{10} и H_{20} в H -образном волноводе?

5. Как рассчитать фазовую скорость волны в H - образном волноводе при заданных параметрах волновода и при заданной частоте поля?
6. По какому закону изменяется напряженность поля при удалении от поверхности диэлектрической пластины? Как зависит скорость убывания напряженности поля от: а) толщины пластины; б) диэлектрической проницаемости пластины; в) частоты колебаний?
7. Как зависит коэффициент замедления фазовой скорости от толщины пластины и от ее диэлектрической проницаемости?
8. Постройте качественно на одном рисунке графики поперечного распределения амплитуды составляющей H_x в волне H_{10} в H -образном волноводе для двух разных значений диэлектрической проницаемости ϵ .
9. Постройте качественно график поперечного распределения амплитуды составляющих E_y и H_z в H -образном волноводе для: а) волны H_{10} ; б) волны H_{20} .
10. Два H -образных металлодиэлектрических волновода работают на волне H_{10} и на одной частоте. Длина волны в первом волноводе в 1,5 раза больше длины волны во втором. Постройте качественно и поясните зависимость $|\dot{H}_x|/|\dot{H}_x|_{\max}$ от x (при $|x| \geq a$) для обоих волнопроводов.
11. В H -образном металлодиэлектрическом волноводе возбуждается волна H_{10} . Постройте качественно зависимость фазовой скорости волны от частоты для: а) заданной толщины пластины $2a$ и разных значений диэлектрической проницаемости ϵ ; б) для заданного значения диэлектрической проницаемости ϵ и разных значений толщины пластины $2a$.

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 15, раздел 15.1.

Лабораторная работа № 7

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ГИРОМАГНИТНОЙ СРЕДЕ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ НАМАГНИЧИВАНИИ

Целью работы является изучение явления поворота плоскости поляризации электромагнитных волн ("эффекта Фарадея") при их распространении в гиромагнитной среде вдоль направления постоянного магнитного поля (направление намагничивания).

7.1. Описание экспериментальной установки

Структурная схема установки изображена на рис. 7.1. Установка состоит из комплекта стандартной измерительной СВЧ аппаратуры 1-2 и 7-9, волноводных устройств 3-6 для осуществления и изменения поворота плоскости поляризации, а также из устройств 10-12 для создания и контроля необходимого подмагничивающего поля.

В комплект измерительной аппаратуры входят: генератор СВЧ колебаний 1 (частота генератора равна 3000 МГц.), невзаимное развязывающее устройство – ферритовый вентиль 2, развязывающий аттенюатор 7, детектор СВЧ колебаний 8 и измерительный милливольтметр 9.

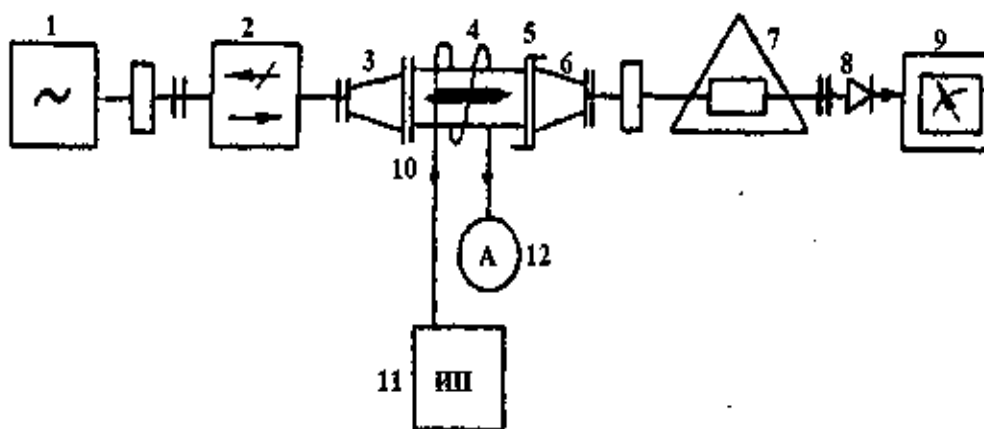


Рис. 7.1. Схема экспериментальной установки

Устройство для осуществления и изменения поворота плоскости поляризации включает в себя: переход с прямоугольного сечения на круглое 3; секцию круглого волновода 4 с ферритовым стержнем; вращающееся сочленение 5 и переход с круглого сечения на прямоугольное 6. Благодаря вращающемуся сочленению элементы 6-8 можно поворачивать вокруг продольной оси волновода; угол поворота подвижной части установки относительно неподвижной отсчитывается по отсчетному устройству на вращающемся сочленении. Внутри секции круглого волновода 4, вдоль оси секции расположен ферритовый стержень; концы стержня обработаны на конус с целью уменьшения отражений.

Для создания постоянного магнитного поля, намагничивающего ферритовый стержень вдоль его оси, на секцию со стержнем надет соленоид 10, к которому от стабилизированного источника питания 11 через амперметр 12 подводится постоянный ток.

Установка работает следующим образом. СВЧ колебания от генератора через переходной элемент 3 возбуждают в секции круглого волновода 4 волну типа H_{11} . При этом в начале секции (до ферритового стержня) волна поляризована так же, как и в возбуждающем прямоугольном волноводе: вектор электрического поля (на оси круглого волновода) направлен вертикально. При этом **плоскость поляризации**, образованная направлением вектора \vec{E} и направлением распространения волны (ось z), ориентирована вертикально. В выходном конце секции (после ферритового стержня) из-за эффекта Фарадея плоскость поляризации волны в общем случае поворачивается на некоторый угол ψ относительно вертикальной плоскости. Угол ψ называют углом поворота плоскости поляризации.

Волна, прошедшая через вращающееся сочленение 5 и переходный элемент 6, возбуждает волну основного типа H_{10} в приемном прямоугольном волноводе. При этом показания детектора пропорциональны квадрату амплитуды $E_{m\text{ пр}}$ вектора \vec{E} в приемном волноводе. Вектор \vec{E} на выходе секции с ферритовым стержнем можно разложить на составляющие, перпендикулярные и параллельные широкой стенке приемного волновода:

$$\vec{E}_{\text{ВЫХ}} = E_{\text{ВЫХ}} \cos(\Delta\varphi) \vec{1}_n + E_{\text{ВЫХ}} \sin(\Delta\varphi) \vec{1}_t \quad (7.1)$$

где $\vec{1}_n$ – орт, перпендикулярный широкой стенке, $\vec{1}_t$ – орт, параллельный широкой стенке (оба орта, как и вектор $\vec{E}_{\text{ВЫХ}}$ перпендикулярны оси z); $\Delta\varphi$ – угол между векторами $\vec{E}_{\text{ВЫХ}}$ и $\vec{1}_n$. Поскольку в приемном волноводе вектор \vec{E} ориентирован перпендикулярно широкой стенке, то амплитуда этого вектора $E_{m\text{ пр}}$ определяется составляющей $E_{\text{ВЫХ}} \cos(\Delta\varphi)$, то есть проекцией $\vec{E}_{\text{ВЫХ}}$ на направление $\vec{1}_n$:

$$E_{m\text{ пр}} = E_{m\text{ max}} |\cos(\Delta\varphi)| \quad (7.2)$$

где $E_{m\text{ max}}$ – амплитуда вектора \vec{E} в приемном волноводе, когда $\Delta\varphi = 0$, то есть $\varphi = \psi$, и в приемном волноводе широкая стенка повернута в положение, перпендикулярное вектору $\vec{E}_{\text{ВЫХ}}$.

Если ферритовый стержень не намагничен, то угол поворота плоскости поляризации $\psi = 0$, и вектор \vec{E} на выходе секции с ферритовым стержнем остается ориентированным вертикально. При этом в формуле (7.2) $\Delta\varphi = \varphi$ – угол между поворота приемного волновода, отсчитываемый по шкале на вращающемся сочленении 5. Значение $\varphi = 0$ на шкале

углов соответствует случаю, когда орт нормали к широкой стенке приемного волновода \bar{I}_n ориентирован вертикально (возбуждающий и приемный прямоугольные волноводы ориентированы одинаково, с горизонтальными широкими стенками).

Если ферритовый стержень намагничен, то угол поворота плоскости поляризации $\psi \neq 0$, и в формуле (7.2) $\Delta\varphi = (\varphi - \psi)$:

$$E_{m \text{ пр}} = E_{m \text{ max}} |\cos(\varphi - \psi)|, \quad (7.3)$$

при этом максимальные показания детектора регистрируются, когда нормаль к широкой стенке приемного волновода повернута относительно вертикали на угол поворота плоскости поляризации. Формула (7.3), является приближенной, так как из-за потерь в намагниченном феррите поляризация волны в выходном конце секции с ферритом хотя и незначительно, но отличается от линейной, т.е. строго говоря, является эллиптической. При этом в формуле (7.1) при любом угле поворота приемной секции присутствуют обе составляющие вектора $\bar{E}_{\text{вых}}$. В результате даже при $\Delta\varphi = (\varphi - \psi) = 90^\circ$ регистрируется $E_{m \text{ пр min}} \neq 0$.

Экспериментальное изучение явления проводится путем измерений угла поворота плоскости поляризации волны в круглом металлическом волноводе, частично заполненном ферритом, намагниченном вдоль оси волновода. Угол поворота плоскости поляризации волны в секции с ферритовым стержнем может быть измерен либо по максимуму ($\varphi = \varphi_{\text{max}}$), либо по минимуму ($\varphi = \varphi_{\text{min}} \pm 90^\circ$) сигнала на выходе детектора.

7.2. Элементы теории

Явления в волноводах, целиком или частично заполненных намагниченным ферритом, весьма сложны, однако в качественном отношении они имеют много общего с явлениями в безграничной ферритовой среде. Наибольший практический интерес представляют два частных случая: случай распространения волн вдоль постоянного магнитного поля (продольное распространение) и поперек его (поперечное распространение). В работе исследуется случай продольного распространения.

Тензор относительной магнитной проницаемости феррита в случае, когда постоянное магнитное поле направлено вдоль оси z , имеет вид:

$$(\mu) = \begin{pmatrix} \mu & -ja & 0 \\ ja & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (7.4)$$

где μ , a – компоненты тензора, которые зависят от частоты колебаний, типа феррита и, в пренебрежении потерями, являются вещественными величинами. При продольном распространении волны составляющие по-

ля описываются множителем $\exp(-j\beta z)$. Подстановка такого вида решения в уравнения Максвелла с учетом тензора (7.4) приводит к выводу, что в феррите могут существовать две собственные волны, с круговой поляризацией и противоположными направлениями вращения. Так, например, вектор \bar{E} в этих волнах имеет вид:

$$\dot{\bar{E}}_{\text{прав}} = \dot{E}_{\text{прав}0}(\bar{1}_x + j\bar{1}_y)e^{-j\beta_{\text{пр}}z}; \quad \dot{\bar{E}}_{\text{лев}} = \dot{E}_{\text{лев}0}(\bar{1}_x - j\bar{1}_y)e^{-j\beta_{\text{лев}}z}, \quad (7.5)$$

где коэффициенты фазы $\beta_{\text{пр}} = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot (\mu + a)}$ и $\beta_{\text{лев}} = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot (\mu - a)}$.

Комплексные амплитуды собственных волн зависят от способа возбуждения волны. Так, если при $z = 0$ вектор \bar{E} суммарного поля линейно поляризован в направлении оси X , то $\dot{E}_{\text{прав}0} = \dot{E}_{\text{лев}0}$. Можно показать, что при этом

$$\dot{\bar{E}} = \dot{\bar{E}}_{\text{прав}} + \dot{\bar{E}}_{\text{лев}} = 2\dot{E}_{\text{прав}0} \left(\cos\left(\frac{\beta_{\phi 1} - \beta_{\phi 2}}{2} \cdot z\right) \bar{1}_x + \sin\left(\frac{\beta_{\phi 1} - \beta_{\phi 2}}{2} \cdot z\right) \bar{1}_y \right) e^{-j\frac{\beta_{\phi 1} + \beta_{\phi 2}}{2} \cdot z}. \quad (7.6)$$

Для перехода к вектору $\dot{\bar{H}}$ следует учитывать что в случае волны с правой круговой поляризацией характеристическое сопротивление среды $Z_{\text{пр}} = Z_0 \sqrt{(\mu + a)/\varepsilon}$, а в случае волны с левой круговой поляризацией $Z_{\text{лев}} = Z_0 \sqrt{(\mu - a)/\varepsilon}$.

В соответствии с выражением (7.6) проекции суммарного поля E_x и E_y совершают синфазные колебания, то есть волна имеет линейную поляризацию при любом z , причем при увеличении координаты z вектор \bar{E} поворачивается в плоскости XOY на угол

$$\psi = \frac{\beta_{\phi 1} - \beta_{\phi 2}}{2} \cdot z = \frac{\omega}{2c} \left(\sqrt{\varepsilon \cdot (\mu + a)} - \sqrt{\varepsilon \cdot (\mu - a)} \right) z \quad (7.7)$$

относительно первоначальной ориентации вдоль оси X .

Плоскостью поляризации называют плоскость, которая содержит ось распространения волны и вектор поля (вектор \bar{E} или вектор \bar{H}), в нашем случае это вектор \bar{E} .

Таким образом, при продольном распространении волны в намагниченном феррите может наблюдаться эффект Фарадея – поворот плоскости поляризации на угол, прямо пропорциональный пройденному волной пути. Среда, в которых проявляется эффект Фарадея, носят название гиротропных (вращающих) сред.

При изменении направления постоянного магнитного поля на противоположное изменяется знак параметра a тензора магнитной проницаемости. Вращение плоскости поляризации в этом случае будет совер-

шаться в обратную сторону. Поле в гиротропной среде не подчиняется принципу взаимности.

Как следует из теории гирромагнитных сред, если частота колебаний в волне достаточно велика и удовлетворяет условиям $\omega \gg \mu_0 \gamma H_0$ и $\omega \gg \mu_0 \gamma M_0$, то

$$\Psi \approx \frac{\mu_0 \gamma}{2c} \cdot \sqrt{\epsilon} \cdot M_0 \cdot z, \quad (7.8)$$

где H_0 – напряженность постоянного магнитного поля; M_0 – статическая равновесная намагниченность феррита; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, γ – гирромагнитное отношение, причем для ферритов

$$\frac{\mu_0 \gamma}{2\pi} = 35,2 \frac{\text{МГц}}{\text{кА/м}}.$$

Таким образом, при достаточно большой частоте колебаний и при не слишком сильном подмагничивающем поле, зависимость $\Psi(H_0)$ подобна кривой намагничивания $M_0(H_0)$. В лабораторной установке эти условия выполняются.

7.3. Домашнее задание

1. Ознакомьтесь с методикой выполнения лабораторных работ (Приложение П.1). Изучите основные положения теории распространения электромагнитных волн в безграничной намагниченной ферритовой (гирромагнитной) среде (п.7.2 и [1, гл. 16]). Ознакомьтесь с описанием экспериментальной установки (п.7.1). Будьте готовы ответить на вопросы:

- Что такое продольное распространение волн в намагниченном феррите?
- Как ориентирован вектор напряженности постоянного магнитного поля в экспериментальной установке?
- Как ориентирован вектор \vec{E} на входе секции с ферритовым стержнем?
- От чего зависит ориентация вектора \vec{E} на выходе секции с ферритовым стержнем? Как ее изменяют в данной экспериментальной установке?
- При какой ориентации приемного прямоугольного волновода относительно вектора \vec{E} в волне, прошедшей феррит, показания детектора будут максимальны?
- Что такое угол φ в формуле (7.3)? Как он изменяется? Как регистрируется?
- Что такое угол ψ в формуле (7.3)? Как он изменяется? Как регистрируется?

2. Рассчитайте и постройте зависимость нормированной амплитуды

ды напряженности электрического поля $E_{m\text{пр}} / E_{m\text{max}}$ в приемном волноводе от угла поворота φ приемного волновода относительно возбуждающего волновода для двух значений Ψ : для $\Psi = 0$ и для заданного значения Ψ (см. табл. 7.1). Номер задания соответствует номеру занятия. Основывайтесь на формуле (7.3). Обе зависимости рассчитайте в диапазоне изменения φ от -120° до $+120^\circ$ и постройте на одном графике (углы – в градусах).

3. Изобразите предполагаемый характер зависимости угла поворота плоскости поляризации Ψ волны в секции с ферритовым стержнем от напряженности постоянного магнитного поля H_0 , намагничивающего феррит, при изменении H_0 от $+H_{0\text{max}}$ через нуль до $-H_{0\text{max}}$, и обратно ($H_{0\text{max}}$ – напряженность постоянного магнитного поля, при которой наступает насыщение намагничивания феррита и равновесная намагничённость феррита M_0 перестаёт зависеть от H_0).

Таблица 7.1. Данные домашнего задания

Угол поворота плоскости поляризации	Номер занятия			
	1-е занятие	2-е занятие	3-е занятие	4-е занятие
Ψ	50°	60°	70°	65°

7.4. Лабораторное задание

1. Убедитесь, что постоянный ток в соленоиде, возбуждающий постоянное магнитное поле вдоль оси соленоида, равен нулю. Снимите зависимость нормированной амплитуды напряженности электрического поля в приемном волноводе от угла поворота φ приемного волновода относительно возбуждающего волновода. Используйте методику съема пространственных распределений составляющих поля, которая приведена в Приложении П.2. Характеристику детектора считайте квадратичной. Экспериментальные точки нанесите на график, построенный по п.2 домашнего задания.

2. Снимите зависимость угла поворота плоскости поляризации волны в секции с ферритовым стержнем от величины постоянного тока I_0 в соленоиде. Ток I_0 изменяйте сначала от нуля до $+I_{0\text{max}}$ (и обратно), а затем от нуля до $-I_{0\text{max}}$ (и обратно). Здесь $I_{0\text{max}}$ – величина тока подмагничивания, при превышении которой угол поворота плоскости поляризации практически не изменяется в связи с насыщением намагничённости M_0 .

3. Выполните п.1 лабораторного задания при постоянном токе в соленоиде, соответствующем заданному углу поворота плоскости поляризации Ψ . (см. табл. 7.1). Обратите внимание на изменение уровня минимальной амплитуды по сравнению с п.1. Объясните явление, основан-

ваясь на представлении о распространении собственных волн с круговой поляризацией с различными параметрами в намагниченном феррите (см. комментарий к формуле (7.3) в п.7.1).

7.5. Контрольные вопросы

1. Каковы характеристики собственных волн продольно намагниченного феррита? Чем отличаются эти волны?

2. Что такое плоскость поляризации? В чем заключается эффект Фарадея?

3. От чего зависит угол поворота плоскости поляризации электромагнитной волны при ее продольном распространении в намагниченном феррите?

4. Как связаны между собой направление постоянного магнитного поля, направление распространения электромагнитной волны и направление поворота плоскости поляризации?

5. Почему сумма волн с круговыми поляризациями может давать линейную поляризацию? При каком условии?

6. Почему поляризация прошедшей волны при $\psi \neq 0$ не является, строго говоря, линейной?

7. Что изменится, если направление постоянного магнитного поля поменять на противоположное? Почему?

8. Изобразите зависимость амплитуды составляющих E_x и E_y от координаты z при продольном распространении в намагниченном феррите?

9. Выведите формулу (7.6), пользуясь формулами (7.5).

10. Изобразите траекторию движения конца вектора \vec{E} со временем на выходе феррита, если в (7.5) $|\dot{E}_{\text{пр}}| > |\dot{E}_{\text{лев}}|$? Если $|\dot{E}_{\text{пр}}| < |\dot{E}_{\text{лев}}|$?

11. Запишите 1-ое и 2-ое уравнения Максвелла для проекций векторов поля в декартовых координатах в случае продольного распространения волны в намагниченном феррите.

12. При продольном распространении волн в феррите в точке $z_1 = 0$ вектор \vec{E} направлен вдоль оси x , Как будет направлен вектор \vec{E} , если волна прошла расстояние, равное 1 м? Постоянная Фарадея $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$. Как изменится ответ, если изменить направление постоянного магнитного поля? Дайте пояснения.

13. Получите выражение для комплексной амплитуды вектора \vec{H} в рамках обозначений формул (7.5) и при выполнении условия $\dot{E}_{\text{пр}0} = \dot{E}_{\text{лев}0}$. Какая при этом получается поляризация вектора \vec{H} ?

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 16.

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

Целью работы является исследование основных закономерностей распространения электромагнитных волн СВЧ диапазона в прямоугольном металлическом волноводе.

8.1. Описание экспериментальной установки

Структурная схема установки для исследования процессов распространения электромагнитных волн в прямоугольном металлическом волноводе изображена на рис. 8.1.

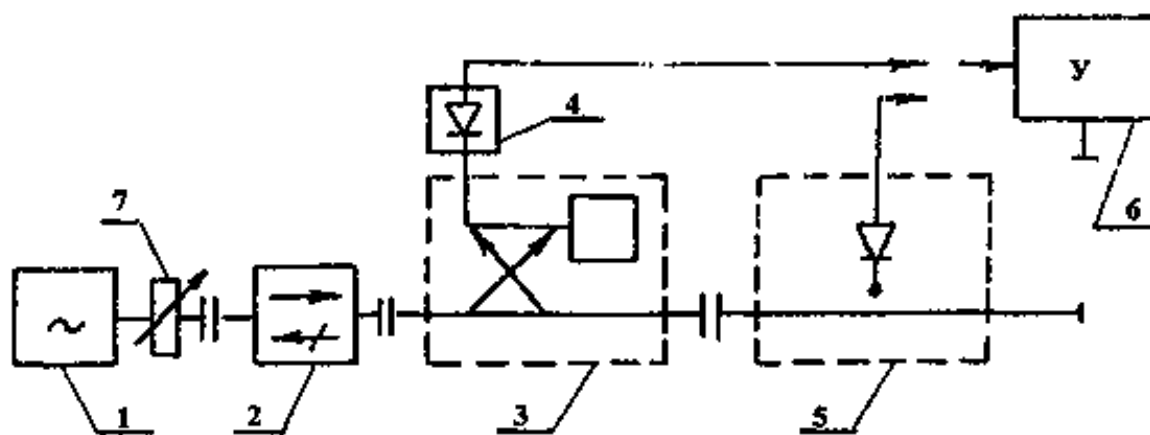


Рис.8.1. Схема экспериментальной установки

В состав данной установки входят следующие СВЧ устройства:

1 – транзисторный *генератор* трёхсантиметрового диапазона волн с блоком питания.

2 – невзаимное развязывающее устройство: *ферритовый вентиль*, который обеспечивает передачу электромагнитных волн с малым ослаблением в прямом направлении (от генератора в измерительную часть установки) и практически полное поглощение волн, распространяющихся в обратном направлении.

3 – *направленный ответвитель*, который обеспечивает ответвление из основного волновода во вспомогательный волновод части СВЧ мощности волны, распространяющейся в основном волноводе в обратном направлении. На рис.8.1 волна, отраженная в основном тракте от нагрузки, проходит во вспомогательный волновод ответвителя в направлении справа налево и регистрируется в детекторной секции.

4 – *детекторная секция*, подключенная к вспомогательному волноводу ответвителя.

5 – измерительная линия с продольной щелью в широкой стенке волновода для снятия распределения электрического поля вдоль оси прямоугольного металлического волновода.

6 – измерительный милливольтметр, необходимый для усиления и регистрации протектированного сигнала.

7 – аттенюатор, позволяющий регулировать уровень мощности в тракте.

С помощью установки, изображенной на рис. 8.1, можно измерять распределение поля в прямоугольном волноводе, а также оценивать напряжённость поля при подключении к выходу измерительной линии различных оконечных устройств. В состав оконечных устройств входят следующие узлы СВЧ:

8 – отражающий металлический фланец (рис. 8.2); он подсоединяется к концу прямоугольного волновода с целью создания в волноводе режима стоячей волны (короткозамкнутая нагрузка).

9 – поглощающая нагрузка (рис. 8.3). Это отрезок волновода, частично заполненный поглощающим материалом; используется для создания в волноводе режима бегущей волны.

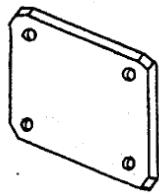


Рис. 8.2. Короткозамкнутая нагрузка.

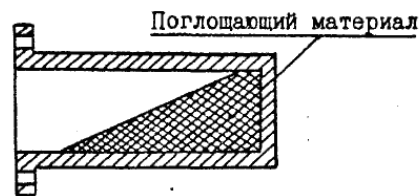


Рис. 8.3. Согласованная нагрузка.

10 – прямоугольный металлический желоб (рис. 8.4), который **вводится в волновод измерительной линии основанием вниз**. В результате в измерительной линии образуется прямоугольный волновод уменьшенного профиля поперечного сечения размерами $a_1 = 12,5$ мм, $b_1 = 5,5$ мм. На рабочей частоте 10 ГГц заполненный воздухом волновод сечением $12,5 \times 5,5$ мм является запредельным для волны H_{10} ($f < f_{крH10}$). При перемещении зонда измерительной линии вдоль оси такого волновода можно зарегистрировать экспоненциальное ослабление амплитуды поля.

11 – секция для исследования поля в поперечном сечении волновода. Она представляет собой отрезок волновода стандартного сечения 23×10 мм, в поперечном сечении которого перемещаются или диэлектрическая пластина 11 (см. рис. 8.5) или стержень с закреплённым на них пассивным электрическим зондом в виде отрезка медного провода. Перемещение отмечается с помощью или отсчётной линейки, или микрометрического винта.

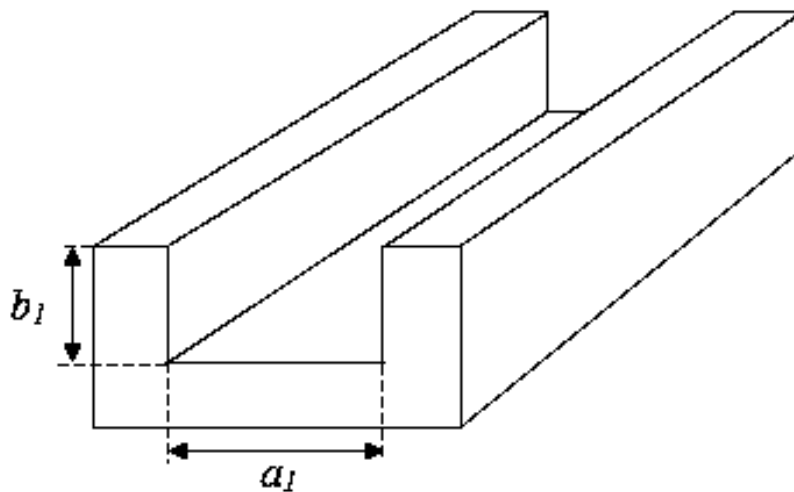


Рис. 8.4. Прямоугольный металлический желоб для создания запердельного волновода

Если в отсутствии зонда в волноводе получен режим бегущей волны, то при введении зонда в поперечное сечение волновода появляется отражённая волна. Анализ показывает, что при перемещении зонда амплитудный коэффициент отраженной волны изменяется практически по закону $\sin^2(\pi x/a)$, т.е. пропорционально квадрату амплитуды электрической составляющей волны H_{10} в точке расположения зонда. Отмеченное обстоятельство используется в данной работе для измерения распределения электрического поля в поперечном сечении волновода.

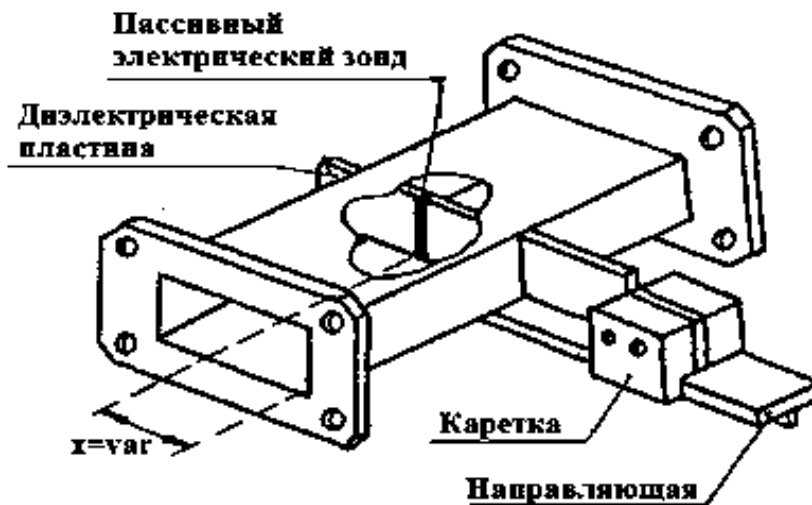


Рис. 8.5. Секция для исследования поля в поперечном сечении волновода

12, 13 – металлические диафрагмы с прорезанными в них щелями различной ориентации (рис. 8.6). Они могут закрепляться в каретке секции 11 и вводиться в поперечное сечение волновода с целью исследования влияния ориентации щелей на прохождение волны через диафрагму.



Рис.8.6. Диафрагмы: а – с горизонтальными щелями;
б – с вертикальными щелями.

14 – секция для исследования возможности излучения из различных щелей в волноводе (рис. 8.7) Во избежание СВЧ излучения в пространство, окружающее лабораторную установку, каждая щель окружена запердельным отрезком круглого волновода (т.е. отрезком волновода, в котором волна не распространяется, а экспоненциально затухает).

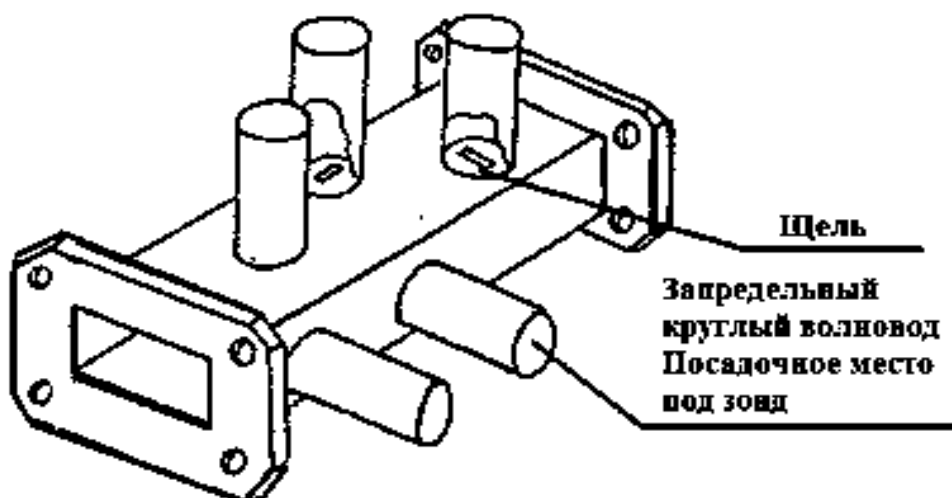


Рис.8.7. Секция с различно ориентированными щелями.

15 – секция для исследования поляризации вектора \vec{H} в волноводе. Она аналогична секции 14 за исключением того, что вместо щелей в широкой стенке волновода сделаны круглые отверстия.

16 – детекторная секция для индикации излучения из различных щелей или отверстий в волноводе. Она представляет собой фторопластовую втулку, которую вставляют в отрезок запердельного волновода секций 14 или 15. В поперечном сечении данной секции укреплен СВЧ диод, в котором индуцируется высокочастотный ток. Колебания этого тока детектируются. Индикация осуществляется при размещении СВЧ диода у щели (отверстия).

Амплитуда колебаний индуцированного тока пропорциональна амплитуде проекции электрического поля в запердельном волноводе на ось диода. Величина и ориентация этого поля определяются величиной и ориентацией тока смещения, возбуждаемого в щели (отверстии) волной в основном волноводе. В свою очередь токи смещения в отверстиях замыкают электрические поверхностные токи в стенке основного волновода, они ориентированы перпендикулярно вектору \vec{H} на стенке

основного волновода в области щели. **В итоге уровень протектированного сигнала максимален, когда при вращении детекторной секции ось СВЧ диода становится перпендикулярна вектору \vec{H} в основном волноводе в области отверстия.**

8.2. Элементы теории

Элементы теории рассмотрены в разделе 3.2 лабораторной работы № 3.

8.3. Домашнее задание

1. Ознакомьтесь с методикой выполнения лабораторных работ (Приложение П.1). Изучите основные положения теории распространения электромагнитных волн в прямоугольном металлическом волноводе. Ознакомьтесь с описанием экспериментальной установки (п. 8.1). Будьте готовы ответить на вопросы:

- Какие составляющие векторов \vec{E} и \vec{H} существуют в волне типа H_{10} ? Как идут силовые линии этих векторов применительно к рис.3.2?
- Как реализовать режим бегущей волны в волноводе?
- Как реализовать режим стоячей волны в волноводе?
- Как измерить длину волны в волноводе?
- Как получить режим запердельного волновода в данной работе? Как при этом изменяется амплитуда векторов поля вдоль оси волновода?
- Как измерить зависимость нормированной амплитуды напряженности электрического поля от поперечной координаты в данной работе? Как при этом обрабатывать показания милливольтметра?
- Как влияет угол поворота детекторной секции для индикации излучения из различных щелей или отверстий в волноводе.

2. Запишите формулы для комплексных амплитуд составляющих электромагнитного поля для волны типа H_{10} в прямоугольном металлическом волноводе. Запишите формулы для амплитуд составляющих электромагнитного поля для волны типа H_{10} (Учтите, что амплитуда колебания – это модуль комплексной амплитуды этого колебания).

3. Рассчитайте длину волны типа H_{10} в волноводе на частоте 10 ГГц. Внутренние размеры поперечного сечения волновода: $a = 23$ мм; $b = 10$ мм. Рассчитайте частотный диапазон (и диапазон длин волн генератора), в котором может распространяться волна типа H_{10} , а волны высших типов распространяться не могут.

4. Рассчитайте и постройте зависимость нормированной амплитуды

составляющей электрического поля от продольной координаты z для волны H_{10} в запердельном волноводе с воздушным заполнением. Используйте формулу

$$\frac{|\dot{E}_y|}{|\dot{E}_y|_{\max}} = e^{-\alpha_z z}, \text{ где } \alpha_z = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\left(\frac{f_{\text{кр}}}{f}\right)^2 - 1} \text{ при } f < f_{\text{кр}}. \quad (8.1)$$

Частота генератора $f = 10$ ГГц. Внутренние размеры поперечного сечения запердельного волновода: $a_1 = 12,5$ мм, $b_1 = 5,5$ мм. Постройте два графика: в первом масштаб по оси $E_y/E_{y \max}$ – логарифмический, по оси z – линейный ($z = 0 \div 20$ мм), во втором – линейный по обеим осям.

5.Изобразите картины силовых линий электрического и магнитного полей в прямоугольном волноводе для типов волн, заданных в табл.8.1. Номер задания соответствует номеру занятия.

6.Рассчитайте и постройте зависимость нормированной амплитуды составляющей электрического поля E_y от поперечной координаты x для волны H_{10} :

$$\frac{|\dot{E}_y|}{|\dot{E}_y|_{\max}} = \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right), \quad x \in (0, a). \quad (8.2)$$

Внутренние размеры поперечного сечения волновода такие же, как и в п.3.

7.Изобразите картину силовых линий токов в стенках волновода для волн заданного типа (см. табл. 8.1). Покажите на этих рисунках щели в стенках, являющиеся излучающими и неизлучающими.

8.Определите, какая из показанных на рис. 8.6 диафрагм с щелями лучше фильтрует («пропускает») волну типа H_{10} .

9.Рассчитайте и постройте график зависимости коэффициента эллиптичности вектора \vec{H} в волне типа H_{10} от поперечной координаты x . Внутренние размеры поперечного сечения волновода такие же, как и в п.2. Определите, при каких значениях поперечной координаты поляризация вектора \vec{H} является круговой.

Примечание. В данном случае коэффициент эллиптичности равен отношению амплитуды продольной составляющей к амплитуде поперечной составляющей вектора \vec{H} :

$$k_{\text{эл}} = \left| \text{ctg}\left(\frac{\pi x}{a}\right) \right|, \quad x \in (0, a). \quad (8.3)$$

Таблица 8.1. Данные домашнего задания

	Номер занятия			
	1-е занятие	2-е занятие	3-е занятие	4-е занятие
Тип волны	H_{10}	H_{20}	H_{10}	E_{21}
	H_{01}	H_{10}	E_{11}	H_{10}

8.4. Лабораторное задание

1. Включите генератор СВЧ.

Примечание. В режиме передачи СВЧ мощности от генератора в волноводную линию на выходе линии должно быть подключено то или иное оконечное устройство. При смене оконечного устройства во избежание СВЧ излучения в окружающее пространство должен быть введён полностью СВЧ аттенуатор в волноводном тракте или выключено питание генератора СВЧ.

2. Измерьте длину волны λ_{10} в волноводе при частоте 10 ГГц. Для этого создайте в волноводе режим стоячей волны, подсоединив к выходу измерительной линии отражающий фланец 7. Подсоедините кабель от измерительной линии ко входу милливольтметра. Методика измерения длины волны в волноводе приведена в Приложении П.3. Запишите результат измерения в отчет и сравните с рассчитанной дома величиной длины волны.

3. Исследуйте затухание поля в запердельном волноводе. Для этого, введя ослабление аттенуатора, отсоедините отражающий фланец. **Под руководством преподавателя** введите в волновод измерительной линии прямоугольный желоб (рис.8.4) **ОСНОВАНИЕМ ВНИЗ!!!** Установите зонд измерительной линии в положение с координатой $z_{\text{л}} = 0$ на линейке измерительной линии. Введите затухание аттенуатора, чтобы уровень сигнала вольтметра измерительной линии составил около 10 мВ при выключенном усилении вольтметра. Снимите распределение нормированной амплитуды напряженности электрического поля вдоль координаты z . Методика съема пространственных распределений составляющих поля представлена в Приложении П.2. Координату зонда z изменяйте в пределах от 0 до 20 мм с шагом 2 мм. Учтите, что детектирование является **квадратичным**: в данном и следующих пунктах задания показания вольтметра пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля. Экспериментальные точки нанесите на график, полученный в п.4 домашнего задания.

4. Исследуйте фильтрующие свойства диафрагм с различной ориентацией щелей. Для этого к выходу секции 11 (рис.8.5) подсоедините детекторную секцию 4.б (аналог секции 4), находящуюся в ящике с комплектующими узлами.

Продетектированный сигнал от данной секции подавайте с помощью кабеля на вход измерительного вольтметра. Поочередно закрепляйте в каретке секции 11 диафрагмы 12 и 13 и вводите их в волновод. Сравните экспериментально фильтрующие свойства диафрагм 12 и 13. Сопоставьте полученный результат с результатом п.8 домашнего задания.

5. Снимите распределение поля в поперечном сечении волновода. Для этого к выходу измерительной линии подсоедините секцию с мик-

рометрическим винтом, в которой пассивный электрический зонд (штырь, направлен вдоль оси Y) перемещается в направлении поперечной координаты x при вращении винта. К выходу секции подсоедините поглощающую нагрузку 9 (рис.8.3). Для измерения величины поля, отражённого от зонда, подключите кабель от детекторной секции 4 направленного ответвителя к входу измерительного милливольтметра. Изменяйте положение зонда в волноводе, плавно перемещая стержень с зондом с помощью микрометрического винта, и фиксируйте при этом показания измерительного вольтметра. Экспериментальные точки, после соответствующей обработки, наносите на построенный дома график $|\dot{E}_y|/|\dot{E}_y|_{\max} = f(x)$.

Примечание. При обработке результатов измерений учитывайте следующие факторы:

1. Уровень поля в волне, отраженной от пассивного электрического зонда (штыря), равен произведению амплитуды поля в падающей волне на коэффициент отражения от штыря, пропорциональный амплитуде поля в падающей волне. В итоге получается квадратичная зависимость:

$$E_{my \text{ отр}} = k \sin^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) = k \cdot f^2(x), \quad (8.4)$$

где k – коэффициент пропорциональности; $f(x)$ – зависимость нормированной амплитуды напряженности электрического поля в падающей волне, рассчитанная в п.5 домашнего задания.

2. Помимо волны, отраженной от штыря, имеется постоянный уровень отраженного поля E_{m0} , вызванный несовершенством оконечного поглотителя и отражением от элементов внутреннего тракта измерительной линии, несовершенством сочленений, направленного ответвителя и пр.

3. Детектирование является квадратичным, т.е. показания прибора пропорциональны квадрату амплитуды измеряемого поля.

В результате показания измерительного прибора, подключенного к детектору отраженной волны (квадратичное детектирование), определяются в случае падающей волны типа H_{10} следующим соотношением:

$$U = (A + B \cdot f^2(x))^2, \quad (8.5)$$

где A и B – коэффициенты пропорциональности. Поскольку в силу граничных условий на боковых стенках волновода $E_y = 0$, то $f(0) = f(a) = 0$. При этом $U(0) = U(a) = A^2$. Так как с учетом нормировки $f_{\max} = 1$, то $U_{\max} = (A + B)^2$.

Из записанных уравнений следует, что экспериментальное поперечное распределение поля по координате x определяется выражением:

$$f(x) = \sqrt{\frac{\sqrt{U_n(x)} - \sqrt{U_n(0)}}{1 - \sqrt{U_n(0)}}} \quad (8.6)$$

Здесь $U_n(x) = \frac{U(x)}{U_{\max}}$ – нормированные показания вольтметра. Пользуясь

данным выражением, определите точки экспериментального распределения по показаниям измерительного вольтметра в секции отраженной волны. Нанесите полученные точки на график $f(x)$, построенный в п.6 домашнего задания.

6. Исследуйте излучение из различных щелей в волноводе. Для этого к выходу измерительной линии подсоедините секцию 14 (рис. 8.7). К выходу секции 14 подсоедините поглощающую нагрузку 9. Подсоедините коаксиальный кабель от детекторной секции 16 ко входу милливольтметра. Детекторную секцию 16 поочередно вставляйте в заперделенные отрезки круглого волновода. Величина излучаемого щелью поля фиксируется при таком угле поворота детекторной секции, когда показания измерительного прибора максимальны. Запишите, сравните и объясните результаты измерений.

Примечание. Принцип работы секции 16 приведен в описании экспериментальной установки в п.8.1.

7. Исследуйте поляризацию вектора \vec{H} в волне типа H_{10} . Для этого к выходу измерительной линии подсоедините секцию 15. К выходу секции 15 подсоедините поглощающую нагрузку 9. Поочередно вставляйте детекторную секцию 16 в отрезки заперделенного круглого волновода. Для каждого отрезка определите отношение показаний измерительного вольтметра при поперечной и продольной ориентации СВЧ диода в секции 15. Пользуясь этим отношением и учтя квадратичный режим детектирования, найдите коэффициент эллиптичности вектора \vec{H} для различных положений отверстий (см. описание секции 16). Полученные значения коэффициента эллиптичности нанесите на график, построенный в п.9 домашнего задания. При нанесении точек учтите, что поперечная координата центра отверстий в секции 15 последовательно принимает значения: $x_1 = 2,5$ мм; $x_2 = 5,5$ мм; $x_3 = 8,5$ мм и $x_4 = 11,5$ мм.

8.5. Контрольные вопросы

1. Чем отличается структура волны типа Е от структуры волны типа Н в прямоугольном металлическом волноводе?
2. Что такое критическая частота, от каких параметров она зависит?

3. Запишите, при каком условии в волноводе обеспечивается: а) режим бегущей волны; б) режим запердельного волновода. Ответ выразите как через частоту колебаний, так и через длину волны генератора

4. Почему волна H_{10} называется волной основного типа в прямоугольном металлическом волноводе?

5. Какова характерная особенность электромагнитного поля волны в запердельном волноводе?

6. Как связана картина силовых линий токов в стенках волновода с картиной силовых линий поля волны?

7. Как зависят от частоты фазовая скорость и длина волны в волноводе?

8. Чем отличаются распределения амплитуды поля вдоль оси волновода (например $E_y(z)$) в двух случаях: а) в волноводе создан режим бегущей волны; б) в волноводе создан режим стоячей волны?

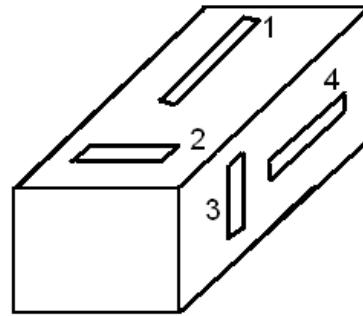


Рис. 8.8. Щели в прямоугольном волноводе

9. На рис. 8.8 изображен прямоугольный волновод, в котором прорезаны узкие щели. Поясните, какие из показанных щелей при облучении их внешним полем позволяют возбудить волну типа H_{10} . Как изменится ответ на данный вопрос при возбуждении волны E_{11} ?

10. Волна типа H_{20} возбуждается в полубесконечном волноводе прямоугольного сечения с размерами $a \times b$ системой двух элементарных электрических излучателей. Величины токов I_0 и длин l_0 обоих излучателей одинаковы. Частота колебаний ω . Определите координаты расположения излучателей и разность фаз между их токами, обеспечивающие возбуждение волны типа H_{20} с наибольшей амплитудой. При этом требуется, чтобы волна типа H_{10} не возбуждалась.

11. Укажите оптимальное расположение штыря для возбуждения волны H_{10} в прямоугольном волноводе при условии, что волновод с одной стороны закорочен проводящей плоскостью (полубесконечный волновод).

12. Укажите оптимальное расположение петли для возбуждения волны H_{10} в полубесконечном прямоугольном волноводе.

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Ученое пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 8

2. Крамм М.Н. Сборник задач по основам электродинамики. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 256.с.. – Глава 6.

Лабораторная работа № 9 ИССЛЕДОВАНИЕ КРУГЛОГО ОБЪЕМНОГО РЕЗОНАТОРА

Целью работы является исследование свойств колебаний электромагнитного поля в объемном резонаторе, созданном на базе круглого волновода быстрых волн.

9.1. Описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов

Продольное сечение установки для исследования колебаний в круглом объемном резонаторе изображено на рис. 9.1. Резонатор выполнен как закрытый толстостенный цилиндр из алюминия и имеет следующие внутренние размеры: длина $l = 123$ мм; радиус $r_0 = 40$ мм. Координата z изменяется вдоль оси резонатора, при этом для внутренних поверхностей торцевых стенок приняты координаты $z = 0$ и $z = l$. Диапазон частот генератора СВЧ составляет 2,56 ГГц – 4 ГГц.

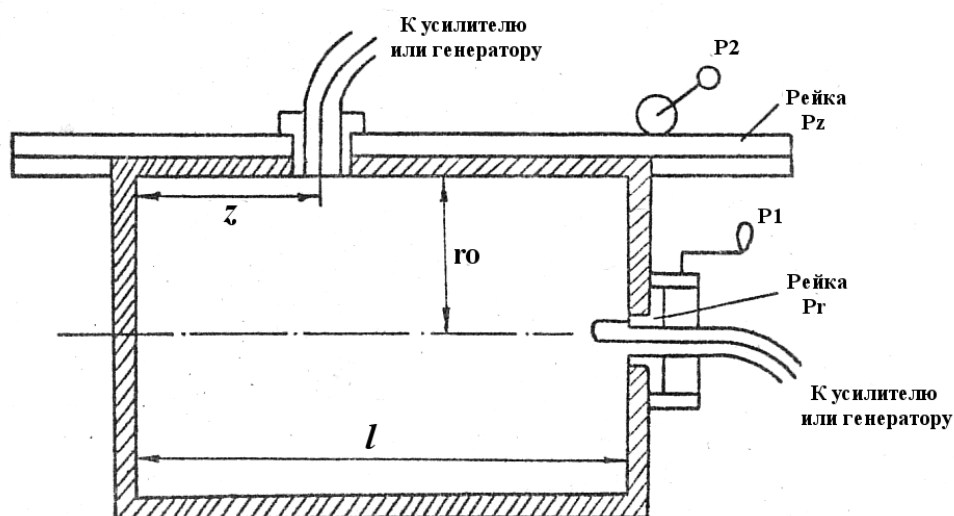


Рис. 9.1. Вид экспериментальной установки в продольном сечении

9.1.1. Возбуждение и съем колебаний электромагнитного поля осуществляются с помощью зондов электрического типа (штырь) и магнитного типа (петля). В качестве примера, на рис.9.1 показан электрический зонд на боковой цилиндрической поверхности резонатора (в верхней части рисунка) и магнитный зонд на правой торцевой поверхности резонатора. Если конкретный зонд через кабель подключить к генератору СВЧ колебаний, то он позволяет возбуждать электромагнитное поле. Если зонд подключить через детектор и усилитель к измерительному

устройству (милливольтметр), то можно измерить амплитуду колебаний электромагнитного поля (про измерения см. ниже).

Экспериментальная установка снабжена четырьмя зондами: электрическим и магнитным для возбуждения высокочастотных колебаний; электрическим и магнитным для регистрации электромагнитного поля. В результате имеется возможность, например, возбуждать электромагнитное поле с помощью зонда на боковой поверхности резонатора, и снимать распределение поля по радиальной координате – с помощью приемного зонда на торцевой поверхности резонатора. Поменяв зонды местами, можно возбуждать колебания с торцевой поверхности, а снимать распределения поля на боковой цилиндрической поверхности резонатора.

Зонд электрического типа (штырь) позволяет регистрировать проекцию вектора \vec{E} , **параллельную штырю**, или возбуждать электромагнитное поле, имеющее эту проекцию. Зонд магнитного типа (петля) позволяет регистрировать проекцию вектора \vec{H} , **перпендикулярную плоскости петли**, или возбуждать электромагнитное поле, имеющее эту проекцию.

9.1.2. Съём пространственных распределений векторов поля.

Для съема пространственных распределений в боковой поверхности установки (рис.9.1) сделан продольный паз (прорезь), а на торцевой поверхности установки сделан радиальный паз, проходящий по диаметру торца. Зонды устанавливаются в металлических рейках Pz и Pr, которые при вращении ручек P1 и P2 через зубчатые передачи могут перемещаться вдоль пазов. Важно, что при этих перемещениях рейки все время закрывают пазы, чтобы не нарушить граничные условия на поверхности резонатора.

Перед началом съема пространственного распределения подстройте частоту колебаний генератора в резонанс с исследуемым типом колебаний, ориентируясь на рассчитанную ранее резонансную частоту данного типа колебаний. При резонансе уровень сигнала на измерительном приборе будет максимальным. Регулировка частоты генерируемых колебаний предусмотрена на передней панели генератора.

При съеме пространственного распределения, необходимо перемещать приемный зонд и записывать показания измерительного прибора. Так, например, установив приемный электрический зонд на боковой поверхности резонатора, можно снять зависимость $E_r(z)$ при $r = r_0$. При этом в случае колебаний типа E_{012} ожидаемая зависимость амплитуды напряжения с выхода детектора от координаты показана на рис.9.2.

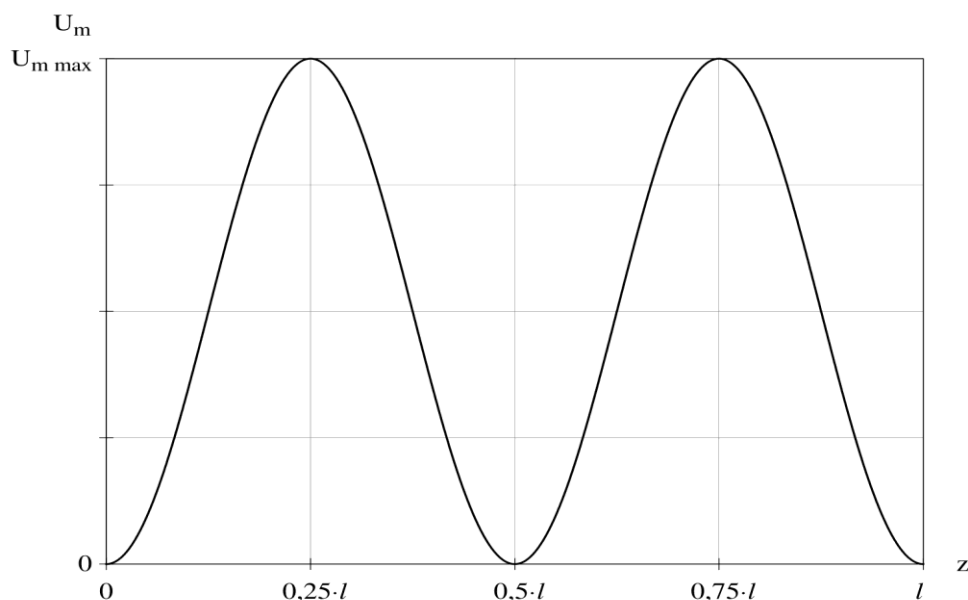


Рис. 9.2. Зависимость амплитуды напряжения с выхода детектора от координаты z

Важно, что перед записью показаний вольтметра **необходимо предварительно** перемещать приемный зонд во всем диапазоне изменения координаты, но, не доходя до стенок примерно на 5 мм. Если уровень в максимумах заметно меньше 30 – 50 мВ, то нужно вначале убедиться, что Вы действительно настроились в резонанс, а потом при необходимости увеличить уровень колебаний генератора регулировкой мощности генератора. При исследовании, например, нормированной зависимости $E_r(z)$, учитывайте квадратичный режим детектирования и стройте график функции:

$$f(z) = \frac{|\dot{E}_r(z)|}{|\dot{E}_r|_{\max}} = \sqrt{\frac{U_m(z)}{U_{m \max}}},$$

где U_m – амплитуда напряжения, измеряемого милливольтметром.

9.1.3. Измерение добротности объемного резонатора. Установите возбуждающий и приемный зонд так, чтобы можно было исследовать колебание заданного типа в объемном резонаторе. Изменяя частоту колебаний СВЧ генератора, настройтесь в резонанс с заданным типом колебаний электромагнитного поля: добейтесь максимального уровня сигнала $U_{m \max}$ на измерительном приборе. Этот уровень не должен превышать 30-50 мВ (при необходимости уменьшите мощность генератора). Пользуясь шкалой частот на передней панели генератора, запишите полученное экспериментальное значение резонансной частоты. Изменяя частоту колебаний генератора, определите такие значения частоты $f_{\text{верхняя}}$ и $f_{\text{нижняя}}$, на которых измерительный прибор показывает

$U_m = U_{m \max} / \sqrt{2}$. Обратите внимание, что за счет квадратичного режима детектирования на частотах $f_{\text{верхняя}}$ и $f_{\text{нижняя}}$ амплитуда колебаний напряженности поля на этих частотах уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с резонансным значением. Запишите значение полосы пропускания $\Pi = f_{\text{верхняя}} - f_{\text{нижняя}}$. Основываясь на известной в радиотехнике формуле, связывающей полосу пропускания и добротность колебательного контура, определите добротность объемного резонатора для используемого типа колебаний.

Следует иметь в виду, что описанный способ измерения добротности дает величину **нагруженной добротности**, учитывающей дополнительные потери мощности за счет связи резонатора с генератором, элементами регистрации и возможные потери на излучение при неплотном прилегании скользящих контактов со стенками резонатора. Зная найденную экспериментально нагруженную добротность и собственную добротность резонатора, рассчитанную по известным формулам, можно найти коэффициент связи резонатора с внешними устройствами, пользуясь формулой:

$$Q_{\text{нагр}} = \frac{Q_{\text{собств}}}{1 + K_{\text{связи}}} \quad (9.1)$$

9.2. Элементы теории

Объемный резонатор представляет собой замкнутую полость, ограниченную металлическими стенками, внутри которой могут существовать электромагнитные колебания. Обычно объемные резонаторы получают на базе прямоугольного или круглого металлического волновода, располагая на концах отрезка волновода плоские металлические торцевые поверхности (рис.9.4).

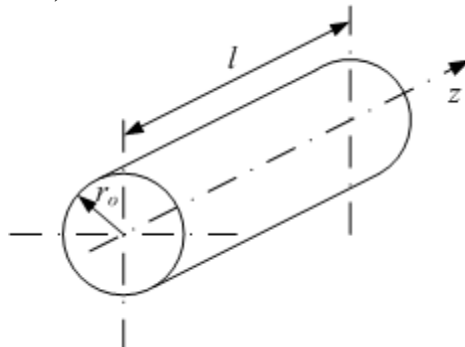


Рис. 9.4. Круглый объемный резонатор

Если в волноводе может распространяться волна типа H_{mn} (или E_{mn}), то в резонаторе могут существовать колебания типа H_{mnp} (или E_{mnp}). причем условие существования колебаний имеет вид:

$$l = p \lambda_{\text{в}} / 2 \quad (9.2)$$

где l – длина резонатора, λ_b – длина волны в исходном волноводе, p – положительное целое число (для колебаний Е-типа индекс p может быть равен нулю, для колебаний Н-типа $p \neq 0$). Резонанс для колебаний типа E_{mnp} ($p = 0$) существует на критической частоте для волны типа E_{mn} в исходном волноводе: $f_{рез} = f_{кр(mn)}$.

Резонансная частота колебания типа E_{mnp} в круглом резонаторе:

$$f_{рез} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{v_{mn}}{r_0}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2}, \quad (9.3)$$

где μ и ε – относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости среды, заполняющей резонатор; v_{mn} – n -ый корень функции Бесселя m -го порядка (приведены в пособии [3], глава 6); r_0 – радиус резонатора; l – длина резонатора.

Резонансная частота колебания типа H_{mnp} в круглом резонаторе:

$$f_{рез} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{\mu_{mn}}{r_0}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2}, \quad (9.4)$$

здесь μ_{mn} – n -ый корень производной функции Бесселя m -го порядка (см. пособие [3], глава 6).

Колебаниями основного типа в объемных резонаторах называют колебания, имеющие наименьшую резонансную частоту.

Комплексные амплитуды составляющих векторов поля для колебания типа E_{mnp} в круглом резонаторе:

$$\begin{aligned} \dot{E}_r &= -\frac{p\pi r_0}{l v_{mn}} A_3 J'_m\left(\frac{v_{mn}}{r_0} r\right) \cos(m\varphi) \sin\left(\frac{p\pi}{l} z\right); \\ \dot{E}_\varphi &= \frac{p\pi r_0^2 m}{l v_{mn}^2 r} A_3 J_m\left(\frac{v_{mn}}{r_0} r\right) \sin(m\varphi) \sin\left(\frac{p\pi}{l} z\right); \\ \dot{E}_z &= A_3 J_m\left(\frac{v_{mn}}{r_0} r\right) \cos(m\varphi) \cos\left(\frac{p\pi}{l} z\right); \\ \dot{H}_r &= -j \frac{\omega_{рез} \varepsilon_a r_0^2}{v_{mn}^2} \frac{m}{r} A_3 J_m\left(\frac{v_{mn}}{r_0} r\right) \sin(m\varphi) \cos\left(\frac{p\pi}{l} z\right); \\ \dot{H}_\varphi &= -j \frac{\omega_{рез} \varepsilon_a r_0}{v_{mn}} A_3 J'_m\left(\frac{v_{mn}}{r_0} r\right) \cos(m\varphi) \cos\left(\frac{p\pi}{l} z\right); \\ \dot{H}_z &= 0. \end{aligned} \quad (9.5)$$

Комплексные амплитуды проекций векторов поля для колебаний типа H_{mnp} в круглом резонаторе:

$$\begin{aligned}
\dot{E}_r &= \frac{\omega_{\text{рез}} \mu_a r_0^2}{\mu_{mn}^2} \frac{m}{r} A_M J_m \left(\frac{\mu_{mn}}{r_0} r \right) \sin(m \varphi) \sin\left(\frac{p \pi}{l} z\right); \\
\dot{E}_\varphi &= \frac{\omega_{\text{рез}} \mu_a r_0}{\mu_{mn}} A_M J'_m \left(\frac{\mu_{mn}}{r_0} r \right) \cos(m \varphi) \sin\left(\frac{p \pi}{l} z\right); \\
\dot{E}_z &= 0; \\
\dot{H}_r &= -j \frac{p \pi r_0}{l \mu_{mn}} A_M J'_m \left(\frac{\mu_{mn}}{r_0} r \right) \cos(m \varphi) \cos\left(\frac{p \pi}{l} z\right); \\
\dot{H}_\varphi &= j \frac{p \pi r_0^2}{l \mu_{mn}^2} \frac{m}{r} A_M J_m \left(\frac{\mu_{mn}}{r_0} r \right) \sin(m \varphi) \cos\left(\frac{p \pi}{l} z\right); \\
\dot{H}_z &= -j A_M J_m \left(\frac{\mu_{mn}}{r_0} r \right) \cos(m \varphi) \sin\left(\frac{p \pi}{l} z\right).
\end{aligned} \tag{9.6}$$

Комплексная амплитуда вектора плотности тока смещения $\dot{\vec{J}}_{\text{см}} = j\omega\epsilon_a \dot{\vec{E}}$.

Комплексная амплитуда вектора плотности поверхностного электрического тока на стенке резонатора $\dot{\vec{J}}_{\text{пов}} = \left[\bar{\vec{1}}_n \dot{\vec{H}} \right]$, где $\dot{\vec{H}}$ – вектор магнитного поля на стенке; $\bar{\vec{1}}_n$ – вектор единичной нормали к поверхности металла, направленный внутрь резонатора.

Исходные выражения для собственной и нагруженной добротности, а также полосы пропускания объемного резонатора приведены в описании лабораторной работы № 4.

Добротность $Q_{\text{мет}}$ в случае колебания H_{mnp} в круглом резонаторе:

$$Q_{\text{мет}} = \alpha_2 \frac{r_0 \left[\left(\frac{\mu_{mn}}{r_0} \right)^2 + \left(\frac{p \pi}{l} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{m}{\mu_{mn}} \right)^2 \right]}{\left(\frac{\mu_{mn}}{r_0} \right)^2 + \frac{2 p^2 \pi^2 r_0}{l^3} + \frac{m^2 p^2 \pi^2}{\mu_{mn}^2 l^2} \left(1 - \frac{2 r_0}{l} \right)^2}, \tag{9.7}$$

где $\alpha_2 = \sqrt{\frac{\omega_{\text{рез}} \mu_0 \sigma_M}{2}}$.

Для колебания типа E_{mnp} в круглом резонаторе:

$$Q_{\text{мет}} = \alpha_2 \frac{\frac{l}{2} (1 + K_{0p})}{1 + (1 + K_{0p}) \frac{l}{2 r_0}}, \tag{9.8}$$

где $K_{0p} = \begin{cases} 1, & p = 0; \\ 0, & p \neq 0; \end{cases}$

9.3. Домашнее задание

1. Ознакомьтесь с методикой выполнения лабораторных работ (Приложение П.1). Изучите основные положения теории круглого объемного резонатора (раздел 9.2 описания, литература [1], [2]). Ознакомьтесь с экспериментальной установкой и методиками проведения экспериментов (см. п. 9.1, Приложение П.2). Будьте готовы ответить на вопросы:

- Каков смысл индексов m, n, p в обозначении типа колебания в круглом объемном резонаторе?
- От чего зависит резонансная частота?
- Как выглядит картина поля: а) для колебания типа E_{011} ; б) для колебания типа H_{111} ?
- Как можно расположить возбуждающий и приемный зонды для исследования: а) колебания типа E_{01p} ; б) колебания типа H_{11p} ?
- Как настраиваться в резонанс в данной лабораторной работе?
- Какова методика снятия пространственных распределений составляющих поля?
- Как в данной работе экспериментально находить: а) полосу пропускания; б) нагруженную добротность; в) коэффициент связи

2. Рассчитайте резонансную частоту для следующих типов колебаний: $E_{011}, E_{012}, H_{111}, H_{112}$ (внутренние размеры резонатора см. в п. 9.1).

3. Запишите формулы для амплитуды составляющих E_r, E_z, H_φ при возбуждении колебания типа E_{01p} и составляющих $H_z, H_r, H_\varphi, E_r, E_\varphi$ при возбуждении колебания типа H_{11p} . Учтите, что амплитуда колебания равна модулю комплексной амплитуды этого колебания.

4. Рассчитайте и постройте графики зависимости нормированной амплитуды составляющих поля от координаты в соответствии с таблицей заданий 9.1. Нормировку проводите по максимальной амплитуде конкретной составляющей поля. Так, например, для колебания типа E_{01p} ($p = 1$ для $E_{011}, p = 2$ для E_{012})

$$\frac{|\dot{E}_r(z)|}{|\dot{E}_r(z)|_{\max}} = \left| \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \right|, \quad z \in (0, l).$$

Для колебания H_{11p}

$$\frac{|\dot{H}_z(z)|}{|\dot{H}_z(z)|_{\max}} = \left| \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \right|, \quad z \in (0, l);$$

$$\frac{|\dot{H}_r(r)|}{|\dot{H}_r(r)|_{\max}} = \frac{J_1'\left(\frac{\mu_{11}}{r_0}r\right)}{J_1'(0)}, \quad r \in (-r_0; r_0);$$

$$\frac{|\dot{H}_\varphi(r)|}{|\dot{H}_\varphi(r)|_{\max}} = \frac{J_1\left(\frac{\mu_{11}}{r_0}r\right)}{J_1(\mu_{11})}, \quad r \in (-r_0; r_0).$$

Здесь $J_1'(x) = \frac{dJ_1(x)}{dx}$; диапазон расчета графика $r \in (-r_0; r_0)$ связан с

экспериментальными условиями съема зависимости по диаметру резонатора. Учтите, что в пакете Mathcad допустимы записи типа $J_1(x)$ и dJ_1/dx .

5. Рассчитайте собственную добротность резонатора для типа колебаний, приведенного в таблице заданий. Стенки резонатора выполнены из металла с удельной проводимостью $3 \cdot 10^7$ См/м (алюминий). Поместите полученные значения добротностей в таблицу 9.2, в которой предусмотрите клетки для экспериментальных значения полосы пропускания, нагруженной добротности и коэффициента связи. Каждая строчка этой таблицы должна соответствовать своему типу колебаний в резонаторе.

Таблица 9.1. Данные домашнего задания

Задание	Номер занятия			
	1-е занятие	2-е занятие	3-е занятие	4-е занятие
Тип колебания, зависимость	E_{011} $E_r(z)$	H_{112} $H_r(r)$	E_{011} $E_r(z)$	H_{112} $H_z(z)$
Тип колебания, зависимость	H_{112} $H_z(z)$	E_{012} $E_r(z)$	H_{112} $E_r(z)$	E_{012} $E_r(z)$
Тип колебания, зависимость	H_{112} $H_r(r)$	H_{112} $E_r(z)$	H_{112} $H_r(r)$	H_{112} $H_r(r)$
Добротность для типов:	E_{011} H_{112}	E_{012} H_{112}	E_{011} H_{112}	E_{012} H_{112}

9.4. Лабораторное задание

1. Включите СВЧ генератор и вольтметр, дайте им прогреться 10 минут.

2. Установите электрический возбуждающий зонд на торцевой поверхности резонатора. Установите такой приемный зонд на боковой поверхности, чтобы можно было снимать зависимость $E_r(z)$ (см. методику в п.9.1.1, используйте эту методику в остальных пунктах экспериментального задания). Плавно меняя частоту колебаний СВЧ генератора, добейтесь возбуждения колебания типа E_{011} . По методике, изложенной в п. 9.1.2 и Приложении П.2, снимите нормированное пространственное распределение $E_r(z)$; используйте эту методику в остальных пунктах экспериментального задания. Если в задании был предусмотрен расчет добротности для колебания типа E_{011} , то по методике п. 9.1.3 проведите измерение полосы пропускания, нагруженной добротности и определите коэффициент связи резонатора с внешними устройствами.

3. Плавно меняя частоту колебаний СВЧ генератора, добейтесь возбуждения колебания типа E_{012} . Снимите нормированное пространственное распределение $E_r(z)$. Если в задании был предусмотрен расчет добротности для колебания типа E_{012} , то проведите измерение полосы пропускания, нагруженной добротности и определите коэффициент связи резонатора с внешними устройствами.

4. Убедитесь, что на боковой поверхности резонатора установлен электрический возбуждающий зонд. Установите такой приемный зонд на торцевой поверхности, чтобы можно было снимать зависимость $H_r(r)$. Плавно меняя частоту колебаний СВЧ генератора, добейтесь возбуждения колебания типа H_{112} . Снимите нормированное пространственное распределение $H_r(r)$. Если в задании был предусмотрен расчет добротности для колебания типа H_{112} , то, пользуясь методикой Приложения П.3, проведите измерение полосы пропускания, нагруженной добротности и, далее, определите коэффициент связи резонатора с внешними устройствами.

5. Если в задании был предусмотрен расчет добротности для колебания типа H_{112} , то, плавно меняя частоту колебаний СВЧ генератора, добейтесь возбуждения колебания типа H_{112} . Проведите измерение полосы пропускания, нагруженной добротности и определите коэффициент связи резонатора с внешними устройствами.

6. Совместите точки снятых экспериментально нормированных пространственных распределений с рассчитанными дома графиками пространственных распределений. Поместите измеренные значения по-

лосы пропускания, нагруженной добротности и коэффициента связи в подготовленную дома таблицу 9.2.

9.5. Контрольные вопросы

1. При каком типе колебаний резонансная частота круглого объемного резонатора не зависит от его длины?

2. Как изменится резонансная частота круглого резонатора при колебаниях типа E_{010} в случае уменьшения его радиуса.

3. Какие граничные условия накладываются при определении поля электрического и магнитного типов в круглом резонаторе?

4. Как компоненты электромагнитного поля внутри резонатора для колебаний типа H_{011}, H_{012} зависят от координат r, z и φ ?

5. Нарисуйте картину поля и картину токов для колебаний типа $E_{011}, E_{012}, H_{111}, H_{112}$.

6. Нарисуйте картину поля для колебания типа E_{011} в моменты времени $t = 0, t = 1/(4f_{рез}), t = 1/(2f_{рез})$ и $t = 3/(4f_{рез})$. Полагайте что при $t = 0, z = 0$ максимальна составляющая E_z .

6. Нарисуйте зависимость амплитуды поля в резонаторе от частоты при возбуждении поля элементарным вибратором.

7. Каким образом выводятся выражения для собственной добротности объемных резонаторов?

8. Как определяется добротность в резонаторе в случае заполнения его диэлектриком с проводимостью отличной, от нуля?

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 12.

2. Крамм М.Н. Сборник задач по основам электродинамики. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 256 с. – Глава 7.

Приложение П.1

Методика выполнения лабораторных работ

Домашняя подготовка. В ходе домашней подготовки необходимо изучить основы теории, ознакомиться с описанием экспериментального стенда, выполнить домашнее задание. По итогам домашней подготовки каждый студент представляет материалы на листах формата А4, включающие титульный лист стандартного вида с названием работы и данными студента; схему экспериментальной установки с расшифровкой блоков; исходные данные; исходные формулы для параметров волновых процессов и результаты расчетов, включая требуемые графики. Графики рекомендуется выполнять в пакете MathCad, снабжая их заголовками (например «Зависимость нормированной амплитуды составляющей E_y от координаты x »); необходимо предусмотреть достаточно мелкую координатную сетку, в узлах сетки должны размещаться целые числа, кратные 2, 5, 10 и т.п. Формулы и комментарии предлагается писать разборчиво от руки (MathCad не предусмотрен для ввода формул, включающих запись комплексных амплитуд векторов поля или их проекций).

Допуск к выполнению лабораторной работы. В ходе допуска преподаватель проверяет: а) понимание основ теории; б) понимание структуры экспериментальной установки и назначения отдельных блоков; в) полноту и правильность выполнения домашнего задания и ориентацию студента в материалах домашнего задания. Рекомендуется обратить внимание на вопросы, на которые предлагается уметь отвечать в домашнем задании.

Выполнение лабораторной работы и оформление отчета. Нумеруйте пункты отчета согласно пунктам лабораторного задания. При съеме пространственного распределения составляющих поля пользуйтесь рекомендациями Приложения П.2. При этом для каждого положения измерительного зонда извлекайте квадратный корень из нормированных показаний милливольтметра и полученные значения наносите на рассчитанный дома график. Расшифруйте на графике, где расчетная кривая, а где экспериментальные точки.

При измерении параметров волнового процесса (длина волны, нагруженная добротность), пользуйтесь рекомендациями Приложения П.3. Результаты измерения записывайте в отчет в виде таблиц, помещая рядом измеренное и рассчитанное дома значения параметра.

В конце отчета необходимо обязательно привести выводы по проделанной работе. В выводах следует проанализировать и отметить все возможные причины расхождения результатов расчета и эксперимента, обращая внимание, в первую очередь, на различие между принятыми в теории упрощающими предположениями и особенностями реальной

экспериментальной установки. Слова о погрешностях измерительных приборов не считаются убедительными.

Защита лабораторной работы. Защита лабораторной работы проводится в виде собеседования с преподавателем. Защита работы считается успешной, если студент правильно оформил отчет, продемонстрировал знание основ теории, принципов экспериментальных исследований и смог объяснить полученные экспериментальные результаты.

При подготовке к защите лабораторных работ рекомендуется разобратся с приводимыми в описаниях контрольными вопросами, а также вопросами из домашнего задания.

Приложение П.2

Методика съема пространственных распределений составляющих поля

Измерение амплитуды напряженности поля. Генератор создает СВЧ колебания, которые промодулированы по амплитуде с частотой 1 кГц. Это дает возможность, подключив к приемному зонду диодный детектор, подавать на измерительное устройство (милливольтметр) низкочастотные колебания с частотой модуляции 1 кГц. Достоинства такого способа измерения связаны с простотой измерительного устройства, а также с возможностью подавления помех с помощью полосового фильтра, настроенного на частоту модуляции. **Измерения рекомендуется проводить при достаточно слабом уровне сигналов, не превышающем величину 30-50 мВ.** Тогда можно считать, что детектор работает в квадратичном режиме, и амплитуда протектированного сигнала прямо пропорциональна квадрату амплитуды напряженности поля – электрического поля (электрический приемный зонд) или магнитного поля (магнитный приемный зонд).

Важно, что перед записью показаний вольтметра **необходимо предварительно** перемещать приемный зонд во всем диапазоне изменения координаты. При этом Вы визуально определяете количество глобальных максимумов и минимумов амплитуды по измерительному прибору, а также оцениваете уровень сигнала в максимумах. Если этот уровень превышает 30 – 50 мВ, то нужно уменьшить выходной уровень колебаний генератора путем регулировки мощности на передней панели генератора. Выберите шаг по координате, с которым будете снимать пространственное распределение. При этом ориентируйтесь на такое количество экспериментальных точек, чтобы на каждую вариацию поля (область изменения амплитуды от минимума до следующего минимума или от максимума до следующего максимума) приходилось достаточное количество точек (10 – 20).

При построении графика нормированного пространственного распределения учитывайте, что детектирование является квадратичным, то есть амплитуда измеряемого напряжения U_m прямо пропорциональна квадрату амплитуды напряженности поля. Поэтому нормируйте измеренные уровни напряжения на максимальное значение $U_{m \max}$, а затем извлекайте из полученных значений квадратный корень. Так, например, при исследовании зависимости $E_r(z)$, стройте график функции:

$$f(z) = \frac{|\dot{E}_r(z)|}{|\dot{E}_r|_{\max}} = \sqrt{\frac{U_m(z)}{U_{m \max}}},$$

Приложение П.3

Методики измерения длины волны и добротности

Измерение длины волны производится по расстоянию между двумя последовательными минимумами напряженности электрического поля. Это расстояние будет равняться половине длины волны в волноводе. Фиксация минимума напряженности электрического поля на линейке измерительной линии проводится методом вилки (метод двух отсчетов), который показан на рис.П.2.1.

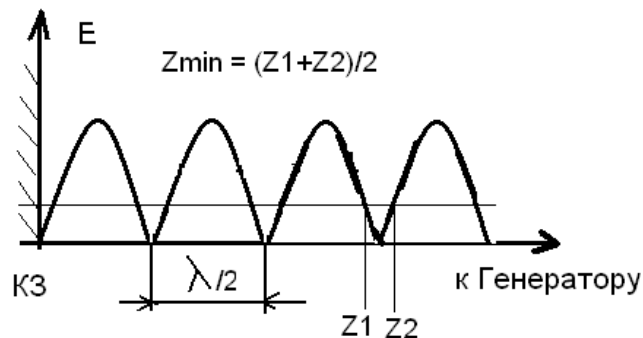


Рис. П.3.1. Распределение амплитуды поперечной составляющей электрического поля вдоль оси волновода в режиме стоячей волны

Измерение добротности может проводиться с помощью амплитудно-частотной характеристики. Ход примерного эксперимента по измерению добротности отображен на рис. П.3.2. Следует обратить внимание, что в режиме квадратичного детектирования показания милливольтметра пропорциональны квадрату амплитуды составляющих поля, поэтому на границах полосы пропускания показания милливольтметра уменьшаются в 2 раза по сравнению с резонансным значением. Важно отметить, что при измерении добротности резонатор связан с внешними устройствами (генератор, детекторная секция), поэтому измеряется нагруженная добротность, которая всегда больше собственной добротности резонатора.

В соответствии с данным рисунком получаем (рисунок поясняющий, график при эксперименте строить не требуется), поэтому в данном примере: $Q_{\text{нагр}} = \frac{3000 \text{ МГц}}{(3001 \text{ МГц} - 2999 \text{ МГц})} = 1500$.

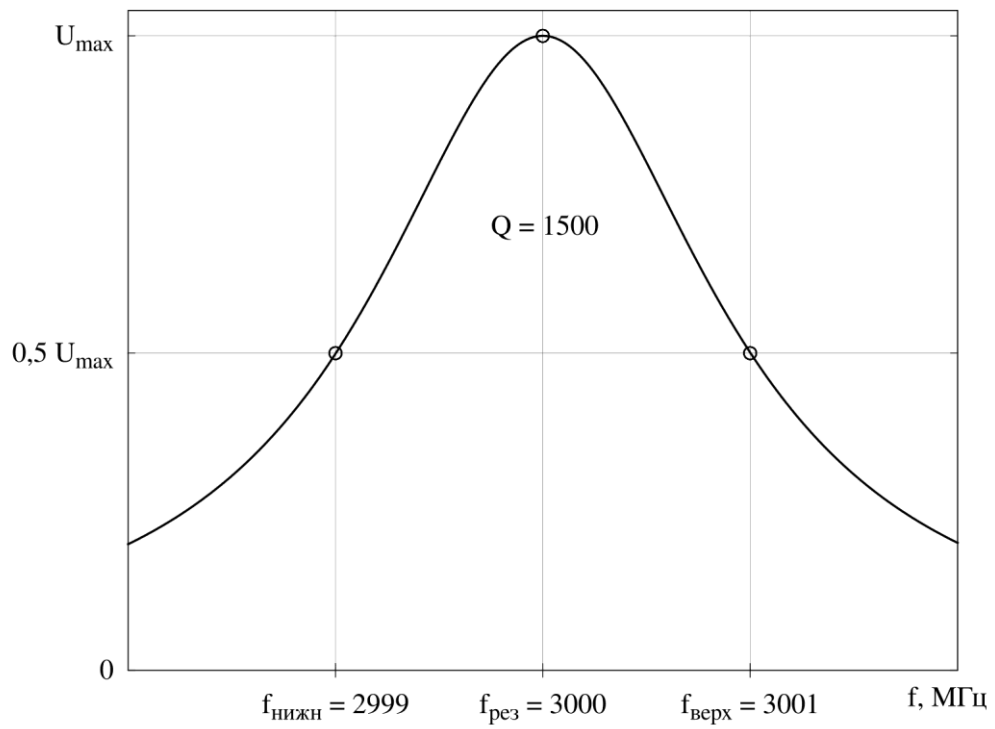


Рис. П.3.2. АЧХ резонатора в окрестности одной из резонансных частот

Учебное издание

Крамм Михаил Николаевич

СБОРНИК ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ОСНОВАМ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ.

Лабораторный практикум

по курсу «Электродинамика» для студентов, обучающихся по направлению 11.03.01 «Радиотехника» и по курсу «Электротехника. Ч. 2» для студентов, обучающихся по направлению 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»

Редактор издательства

Компьютерная верстка

Темплан издания НИУ МЭИ 2016. учебн.

Подписано в печать

Формат 60x84/16

Физ печ л.

Изд. №

Заказ

Тираж 300 экз.

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МЭИ,
111250. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

Отпечатано в типографии Издательства МЭИ. 111250. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13