

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИНК

_____ В.Н. Бориков
« ____ » _____ 2014 г.

Радиоволновой, тепловой контроль и диагностика

*Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу «Радиоволновой, тепловой контроль и диагностика»
для студентов, обучающихся по специальности 200102 «При-
боры и методы контроля качества и диагностики» направле-
ния 200100 «Приборостроение»*

Составитель В.П. Шиян

Издательство
Томского политехнического университета
2014

УДК 620.179.1(075.8)

ББК 31.32я73

Ш65

Шиян В.П.

Ш65 Радиоволновой, тепловой контроль и диагностика: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Радиоволновой, тепловой контроль и диагностика» для студентов, обучающихся по специальности 200102 «Приборы и методы контроля качества и диагностики» направления 200100 «Приборостроение» / сост. В.П.Шиян; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 84с.

УДК 620.179.1(075.8)

ББК 31.32я73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром кафедры
физических методов и приборов контроля качества ИНК ТПУ
«__»_____2014 г.

Зав. кафедрой ФМПК

доктор физико-математических наук,

профессор

_____ А.П.Суржиков

Председатель учебно-методической

комиссии

_____ Л.А.Редько

Рецензент

Кандидат технических наук,

Заведующий лабораторией ФТИ ФГБОУ ВПО НИ ТПУ

А.Г.Жерлицын

© Составление ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2014

© Шиян В.П., 2014 г.

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2014

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОГЛАСОВАНИЯ СВЧ ТРАКТОВ В СРЕДСТВАХ РАДИОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ

ВВЕДЕНИЕ

Основной линией передачи в системах радиоволнового контроля является волновод – полая металлическая труба, например, прямоугольного или круглого сечения. Наряду с волноводом используется также коаксиальный кабель. Параметры, характеризующие линию передачи (тракт) при работе на сверхвысоких частотах, связаны с геометрическими размерами линии и наличием в ней отражений и потерь.

В данной лабораторной работе рассматриваются методы и средства измерения коэффициента отражения Γ и коэффициента стоячей волны (КСВН), характеризующих согласование линии передачи с нагрузкой.

Работа рассчитана на 2 часа.

1. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- 1.1. Панорамный измеритель КСВН.
- 1.2. Набор соединительных устройств.
- 1.3. Рупорная пирамидальная антенна.
- 1.4. Волноводный направленный ответвитель.

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Приобретение практических навыков по измерению коэффициента отражения Γ или его модуля $|\Gamma|$, коэффициента стоячей волны (КСВН). Изучение принципа действия панорамного измерителя КСВН Р2-65 и получение навыков работы с современными СВЧ измерительными приборами используемыми в радиоволновом контроле.

3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

- 3.1. Изучить параметры, характеризующие линию передачи на СВЧ.
- 3.2. Уяснить процесс возникновения стоячих волн в линии передачи и зависимость их характеристик от сопротивления нагрузки.
- 3.3. Ознакомиться с принципом действия и устройством панорамного измерителя КСВН Р2-65.

- 3.4. Измерить КСВН рупорной пирамидальной антенны и определить соответствующий измеренному значению КСВН модуль коэффициента отражения $|\Gamma|$. Оценить уровень отраженной от антенны мощности $P_{отр}$.
- 3.5. Измерить переходное ослабление волноводного направленного ответвителя НО -0812/12 в полосе частот панорамного измерителя КСВН Р2-65.

4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Изучить основные параметры СВЧ трактов, используемых в устройствах радиоволнового контроля. Рассмотреть свойства стоячих волн в линиях передачи, распределение напряжения (напряженности) в линии для различных значений коэффициента отражения Γ и характера нагрузки. Уяснить связь КСВН с модулем коэффициента отражения $|\Gamma|$ и коэффициентом бегущей волны (КБВ).

5. ТЕОРИЯ

При рассмотрении стоячих волн и вопросов согласования СВЧ трактов воспользуемся теорией обычных длинных линий.

В случае несогласованной нагрузки или отражения от неоднородности в тракте падающая $U_{над}(t, x)$ и отраженная $U_{отр}(t, x)$ бегущие волны в результате сложения образуют стоячую волну $U_{см}(t, x)$. Если

$$U_{над}(t, x) = U_{над\max} e^{j(\omega t - \gamma x)} \quad (1)$$

$$U_{отр}(t, x) = U_{отр\max} e^{j(\omega t + \gamma x + \varphi_0)}, \quad (2)$$

то уравнение стоячей волны будет иметь вид

$$U_{см}(t, x) = U_{над}(t, x) + U_{отр}(t, x) = U_{над\max} \left[1 + |\Gamma| e^{j(2\gamma x + \varphi_0)} \right] e^{j(\omega t - \gamma x)}. \quad (3)$$

Здесь

U_{\max} - максимальное значение напряжения;

γ - постоянная распространения, комплексная величина;

φ_0 - сдвиг по фазе отраженной волны относительно падающей;

$|\Gamma|$ - модуль коэффициента в точке x , равный отношению максимальных амплитуд, отраженной и падающей волн

$$|\Gamma| = \frac{U_{отр\max}}{U_{над\max}}. \quad (4)$$

Из формулы (3) следует, что в линии со стоячей волной совершаются гармонические колебания с частотой бегущей волны относительно

неподвижно расположенных вдоль линии точек, в которых достигается максимальная (пучность) и минимальная (узел) амплитуда напряжения.

Коэффициент отражения Γ является в общем случае комплексной величиной

$$\Gamma = |\Gamma| e^{j\varphi}. \quad (5)$$

Фазовый сдвиг φ определяется соотношением между сопротивлениями нагрузки и линии передачи. В зависимости от сопротивления нагрузки и в соответствии с выражением

$$|\Gamma| = \frac{z_H - z_c}{z_H + z_c}, \quad (6)$$

где z_c - волновое сопротивление линии,

z_H - сопротивление нагрузки.

коэффициент отражения может принимать различные значения. На рис.1 показаны типичные графики распределения напряжения в линии при различной величине Γ .

Таким образом, коэффициент отражения полностью определяет картину стоячих волн, возникающих в несогласованной линии передачи.

Практическое измерение величины Γ или ее модуля $|\Gamma|$ встречает некоторое затруднение, т.к. для этого необходимо физически «разделить» падающую и отраженную волны. Более доступна для измерения другая величина, также характеризующая стоячую волну в линии. Такой величиной является отношение высокочастотного напряжения в максимуме к напряжению в минимуме стоячей волны. Это отношение принято называть коэффициентом стоячей волны (КСВ). Иногда его обозначают как КСВН (по напряжению)

$$\rho = \frac{|U|_{\max}}{|U|_{\min}}.$$

Часто знак модуля опускают $\rho = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}.$

В волноводах величины КСВ и Γ определяются через напряженности электрического поля в максимуме и минимуме стоячей волны

$$\rho = \frac{E_{\max}}{E_{\min}}; \quad \Gamma = \frac{E_{\text{omp}}}{E_{\text{nad}}} e^{j\varphi}.$$

Пользуясь уравнениями напряжения в линии можно найти связь КСВ с модулем коэффициента отражения $|\Gamma|$. В максимуме стоячей волны векторы напряжений падающей и отраженной волн синфазны, поэтому

$$|U|_{\max} = |U_{nad}| + |U_{omp}|.$$

В минимуме стоячей волны $|U|_{\min} = |U_{nad}| - |U_{omp}|.$

Отсюда
$$\rho = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Из него
$$|\Gamma| = \frac{\rho - 1}{\rho + 1}.$$

Величина, обратная КСВ называется коэффициентом бегущей волны (КБВ). $|\Gamma|$ изменяется в пределах от 0 до 1. Пределами изменения ρ являются 1 и ∞ . Режим идеального согласования характеризуется величиной $\rho = 1$. По величине КСВ оценивается качество трактов, аппаратура и эффективность работы установок.

Зная величину модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$ можно определить мощность отраженной волны при рассогласовании нагрузки с линией

$$P_{omp} = P_{nad} |\Gamma|^2.$$

Здесь P_{nad} - мощность падающей волны. Это наибольшая мощность, которую можно получить при идеальном согласовании нагрузки с линией и согласованном генераторе. Отсюда можно определить мощность, поступающую в нагрузку

$$P = P_{nad} - P_{omp} = P_{nad} (1 - |\Gamma|^2).$$

Измерение КСВ может быть произведено непосредственно путем перемещения вдоль линии идеального ВЧ вольтметра или прибора, показания которого связаны с ВЧ напряжением в данном сечении линии. Отрезок линии, по которому передвигается вольтметр (индикаторное устройство с СВЧ детектором) называется измерительной линией.

В настоящее время в практике измерений КСВ используется, в основном, панорамные измерители, обеспечивающие высокую производительность измерений параметров устройств в широком диапазоне частот с высокой точностью. В ряду панорамных измерителей:

R2-56 для диапазона частот 2÷4 ГГц;

R2-61 для диапазона частот 8÷12 ГГц;

R2-65 для диапазона частот 25,86÷37,5 ГГц.

Современные панорамные измерители КСВН нового поколения типа R2-73, R2-82 отличаются встроенным микропроцессором, расширенными функциональными возможностями и повышенной точностью измерений.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Перечислить параметры согласования линии передачи с нагрузкой.
- 6.2. Пояснить механизм возникновения стоячих волн в линиях передачи.
- 6.3. Запишите выражения для определения КСВН и Γ через параметры волны напряжения в линии.
- 6.4. Запишите выражения, связывающие КСВН и Γ между собой.
- 6.5. От чего зависит величина коэффициента отражения?
- 6.6. Каким образом могут быть измерены КСВН и Γ ?
- 6.7. Назовите современные приборы для измерения КСВН.
- 6.8. Запишите выражение для определения мощности поступающей в нагрузку, зная коэффициент отражения.

7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

7.1. Измерение КСВН и ослабления СВЧ трактов и узлов

КСВН, как параметр согласования измеряется с помощью панорамного измерителя КСВН. В данной работе используется измеритель Р2-65 8-мм диапазона длин волн. Структурная схема прибора изображена на рис.2.

Работа панорамного измерителя основана на принципе разделения сигналов падающей и отраженной волн с последующим их детектированием и вычислением отношения.

Измеритель КСВН состоит из трех частей: генератора качающейся частоты (ГКЧ), индикатора Я2Р-67, волноводного тракта.

1. ГКЧ обеспечивает ручное и автоматическое изменение частоты в диапазоне 25,86÷37,5 ГГц. С помощью системы автоматической регулировки мощности (АРМ) поддерживается фиксированный уровень мощности на выходе генератора.

2. Индикатор обеспечивает усиление сигналов падающей и отраженной волн, их обработку и отображение на экране ЭЛТ. По шкальному устройству индикатора производится отсчет значений КСВН и величины затухания в децибелах. В индикаторе также имеются схемы, обеспечивающие компенсацию частотных характеристик СВЧ каналов, индикацию частотной метки, а также выдачу управляющих сигналов при работе с цифровым блоком.

3. Волноводный тракт соединяет генератор с нагрузкой. Состоит из двух направленных ответвителей НО-1 и НО-2 с СВЧ диодами и согласованной нагрузки. НО-1 выделяет падающую волну, а НО-2 – волну, отраженную от исследуемого объекта. Оба СВЧ сигнала представлены напряжениями, снимаемыми с диодов, пропорциональными этим сигналам.

7.2. Подготовка к работе с панорамным измерителем КСВН Р2-65

Перед включением заземлите прибор, соедините блоки и СВЧ узлы по схеме «калибровка», которая отличается от схемы рис.2 обратным включением НО-2, установите органы управления в следующее положение:

Я2Р-67

- переключатель «ПРЕДЕЛЫ» в положение «ПАД»;
- кнопку «М» в нажатом положении;
- кнопку «ЛЮГ» в ненажатом положении;
- кнопку «-10 дБ» в ненажатом положении;
- кнопку «КОРРЕК» в ненажатом положении;
- ручку «МЕТКА» в среднее положение;
- ручку «ПАД» в крайнее левое положение.

ГКЧ

- тумблеры «СЕТЬ» и «ГЕН» в выключенное положение;
- ручку «УРОВЕНЬ» в среднее положение;
- переключатель «ПЕРИОД S» в положение 0.08;
- переключатель «РЕЖИМ» в положение АМ 100 кГц;
- ручкой $F_{нач}$ установить визир на отметку 25,86;
- ручкой $F_{кон}$ установить визир на отметку 37,5.

7.3. Калибровка

Перед проведением измерений необходимо произвести калибровку измерителя. Для этого:

- включить тумблеры «СЕТЬ» на индикаторе и ГКЧ и прогреть приборы в течение 5 мин.;
- включить СВЧ генераторы тумблером «ГЕН»;
- установите диапазон качания частоты с помощью ручек «ЧАСТОТА ГКЧ» и « $F_{нач}$ » и « $F_{кон}$ » (ГКЧ), пользуясь ручкой «МЕТКА» (индикатор), помещая метку поочередно в начало и конец линии развертки ЭЛТ;

- установите визир индикатора на отметку **2** по шкале mV , вращая ручку «ОТСЧЕТ». На экране ЭЛТ наблюдаются: линия электронного визира, положение которой регулируется ручкой «ОТСЧЕТ», линия уровня падающей мощности, регулируемая ручками «ПАД» (индикатор), уровень (ГКЧ) и линия контрольного уровня.
- совместите линию падающей мощности с линией электронного визира ручкой «УРОВЕНЬ», а если этого недостаточно, то и ручкой «ПАД»;
- установите переключатель «ПРЕДЕЛЫ» в положение **0**. При этом на экране ЭЛТ вместо линии падающей мощности наблюдается линия калибровки;
- установите ручкой «ОТСЧЕТ» визир индикатора на отметку **0 дБ** по верхней шкале дБ;
- совместите, вращая ручку «КАЛИБР», линию калибровки с линией электронного визира. Добейтесь ручкой «КАЛИБР», чтобы линия калибровки располагалась симметрично относительно линии электронного визира. В дальнейшей работе не изменять положение ручек «ПАД» и «КАЛИБР»;
- добейтесь максимальной равномерности линии калибровки перемещением плунжеров во вторичных волноводах ответвителей НО-1 и НО-2;

7.4. Панорамное измерение ослабления

- Подготовьте прибор по режиму «калибровка»;
- включите исследуемый объект в тракт между НО-1 и НО-2;
- к выходу НО-2 подключите согласованную нагрузку из комплекта Р2-65;
- установите переключателем «ПРЕДЕЛЫ» линию характеристики ослабления вблизи середины экрана;
- установите частотную метку в выбранную точку характеристики ослабления;
- совместите ручкой «ОТСЧЕТ» линию электронного визира в месте нахождения частотной метки с характеристикой ослабления;
- произведите отсчет по верхней шкале дБ. Результат измерения равен алгебраической сумме показаний переключателя «ПРЕДЕЛЫ» и отчета по верхней шкале дБ.

7.5. Панорамное измерение КСВН

- переориентируйте НО-2 (направленный ответвитель отраженной волны) и подсоедините к его выходу измеряемый объект;
- переключателем «ПРЕДЕЛЫ» расположите кривую КСВН вблизи середины экрана;
- установите ручкой «ЧАСТОТА» (ГКЧ) визир частотомера на отметку, соответствующую частоте измерения;
- ручкой «ОТСЧЕТ» совместите линию электронного визира с кривой КСВН в месте нахождения частотной метки;
- отсчитайте измеренное значение КСВН по шкале КСВН (нижняя шкала шкального устройства).

7.6. Измерение КСВН пирамидальной рупорной антенны миллиметрового диапазона:

- включите и подготовьте прибор в соответствии с выбранным режимом;
- присоедините испытуемую антенну к выходу НО-2;
- ручкой «ПРЕДЕЛЫ» установите изображение в рабочей части экрана;
- определите частоту и величину КСВН в точках экстремума частотной зависимости КСВН;
- измерьте величину КСВН в 10 точках его частотной зависимости;
- постройте график частотной зависимости КСВН антенны;
- исходя из полученной характеристики сделать вывод о зависимости свойств антенны от частоты с позиции эффективности ее использования;
- определите модуль $|\Gamma|$ коэффициента отражения антенны и соответствующий ему уровень отраженной мощности от входа антенны для максимального значения КСВН;
- оцените погрешность измерения КСВН по формуле:

$$\delta_{КСВН} = \pm(5КСВН + 2)\%.$$

7.7. Измерение переходного ослабления направленного ответвителя типа НО—812/12:

- переориентируйте НО-2 по сравнению с п.7.6;
- подсоедините исследуемый НО между НО-1 и НО-2;

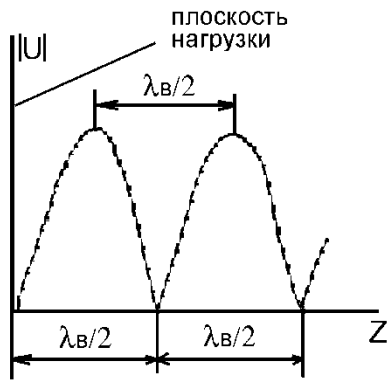
- присоедините к выходу основного волновода НО и к выходу НО-2 согласованные нагрузки;
- ручкой «ПРЕДЕЛЫ» установите изображение частотной характеристики ослабления НО в середине экрана;
- измерьте переходное ослабление НО для 10 значений частоты;
- постройте график частной характеристики переходного ослабления НО;
- определите ослабление на частоте, соответствующей $\lambda = 1$ см, сравните полученное значение с ослаблением указанным на градуировочной кривой НО (график на корпусе НО).
- оцените погрешность измерения ослабления по формуле:
 $\Delta A = \pm(0,05A_x + 0,5)$, где A_x - измеряемое ослабление, дБ;
- сделайте вывод о полученном результате измерений.

7.8. По результатам работы составить отчет, который должен содержать:

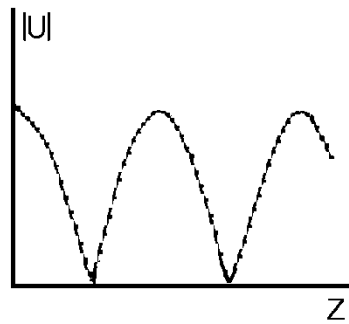
1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Программу работы;
4. Результаты экспериментов и расчетов в виде таблицы;
5. Выводы по работе.

Список литературы

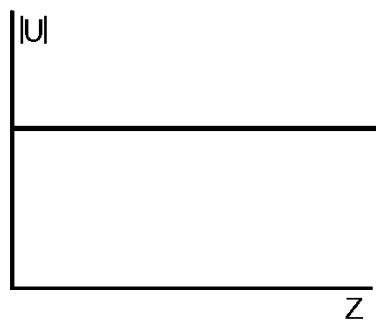
1. Лебедев Н.В. Техника и приборы СВЧ. Под ред. академика Н.Д.Девяткова, М.: «Высшая школа», 1970, 440 с.
2. А.Н.Зайцев, П.А.Иващенко, А.В.Мыльников Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение, М.: Изд. стандартов, 1989, 240 с.



$Z_H=0$; КЗ; $\Gamma=-1$

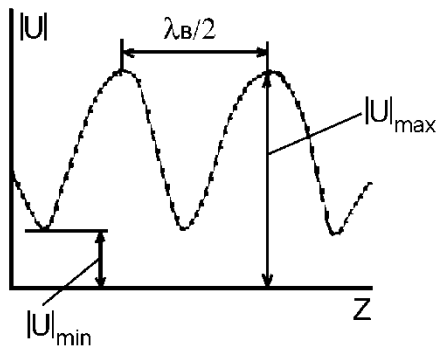


$Z_H=\infty$; ХХ; $\Gamma=+1$



Режим согласования

$Z_H=Z_c$; $\Gamma=0$



Режим стоячей волны

$1 > \Gamma > 0$

Рис. 1.

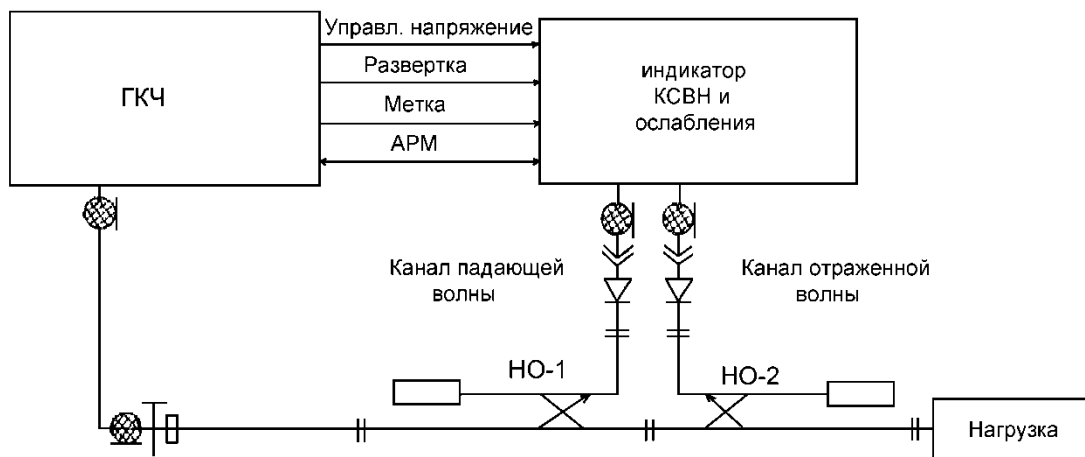


Рис.2

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРИТОВОГО ВЕНТИЛЯ И ЦИРКУЛЯТОРА

ВВЕДЕНИЕ

Ферритовые вентиль и циркулятор являются невзаимными устройствами, широко используемыми в СВЧ технике в качестве развязки между генератором и нагрузкой.

В данной лабораторной работе рассматриваются устройство, принцип действия данных СВЧ-элементов, основные высокочастотные параметры и методы их измерения.

Работа рассчитана на 2 часа.

1. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- 1.1. Панорамный измеритель КСВН Р2-65.
- 1.2. Ферритовый вентиль типа ФВВ1-21 (35÷37) ГГц.
- 1.3. Ферритовый циркулятор типа 08-ЦВ-4 (35÷37) ГГц.
- 1.4. Набор соединительных элементов.

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 2.1. Ознакомление с невзаимными устройствами на основе ферритов (вентиль, циркулятор), используемыми в системах РВК.
- 2.2. Измерение основных высокочастотных параметров вентиль и циркулятора.

3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

- 3.1. Уяснить суть ферромагнитного резонанса (гирромагнитного).
- 3.2. Для ферритового вентиль определить прямые и обратные потери в полосе частот (26÷38) ГГц. (35 ГГц)
- 3.3. Для Y-циркулятор определить величину развязки A между плечами и величину прямых потерь L на частоте 30 ГГц. (35 ГГц)

4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Изучить устройство, принципы действия, назначение и основные высокочастотные параметры ферритового вентиль и циркулятор.

5. ТЕОРИЯ

Ферритовые приборы применяются на СВЧ как развязывающие устройства, их характеристики и параметры всецело определяются свойствами ферритов.

Феррит – материал, обладающий магнитной анизотропией. Получают спеканием окиси железа с окислами Mn, Co, Ni, Zn, Cd, Mg. Химическая формула $M^{+2}O \cdot Fe_2O_3$, где M^{+2} – соответствующий металлический двухвалентный ион.

Обычно это парные или тройные сочетания металлов, например, никель – цинк, марганец – магний – никель. Ферриты имеют вид керамики и с трудом поддаются механической обработке. Являются хорошим диэлектриком ($tg\delta \approx 10^{-4}$, $\epsilon_n = 5 \div 20$), имеют большое удельное сопротивление $\rho \sim 10^7 \div 10^8$ Ом·м (для чистого железа $\rho \sim 1 \times 10^{-7}$ Ом·м). Феррит обладает ферромагнитными свойствами. Начальная магнитная проницаемость $10 \div 3000$. Ферриты могут иметь монокристаллическую или поликристаллическую структуру. Монокристалл – правильный многогранник с упорядоченным строением кристаллической решетки во всем объеме. Поликристалл – из большого числа сросшихся, хаотически расположенных мелких кристаллов. Малые области феррита, намагниченные до насыщения – домены. В обычных условиях векторы намагниченности доменов ориентированы беспорядочно, поэтому образец в целом может быть ненамагниченным. Температура Кюри ($100 \div 600^\circ\text{C}$).

Анизотропные свойства ферритов проявляются при наложении постоянного магнитного поля. Волновод, содержащий феррит обладает замечательными свойствами:

1. Невзаимными резонансными потерями;
2. Невзаимным вращением плоскости поляризации;
3. Невзаимным фазовым сдвигом;
4. Невзаимным смещением (изменением) структуры поля.

Ферромагнитный (гирромагнитный) резонанс

Поведение ферритов на СВЧ в присутствии внешнего постоянного магнитного поля может быть рассмотрено с учетом спина и собственного магнитного момента электрона. При наложении внешнего магнитного поля не совпадающего с направлением магнитного момента электрона, последний совершает свободную прецессию подобно гироскопу с

угловой частотой $\omega_0 = \gamma_0 H_0$, где $\gamma_0 = 0,22 \text{ МГц} \cdot \text{рад} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1}$ – гиромагнитная постоянная. Здесь H_0 – А/м.

Направление прецессии зависит только от направления постоянного магнитного поля \vec{H}_0 и происходит по часовой стрелке, если смотреть в направлении вектора \vec{H}_0 , рис.1.

При отсутствии потерь свободная прецессия продолжалась бы при неизменном угле ϕ . В действительности в результате трения угол ϕ начинает быстро уменьшаться. Векторы магнитных моментов электронов располагаются по \vec{H}_0 . Феррит оказывается намагниченным.

Иначе обстоит дело, когда на феррит, кроме \vec{H}_0 наложено ВЧ магнитное поле \vec{H}_ω с круговой частотой ω близкой к ω_0 (частоте прецессии). Пусть ВЧ магнитное поле имеет круговую поляризацию и ориентировано перпендикулярно к постоянному магнитному полю \vec{H}_0 . В данном случае будем подразумевать, что \vec{H}_ω вращается с частотой СВЧ сигнала, не изменяя своей величины и описывает концом окружность. Предположим, что направление вращения вектора \vec{H}_ω совпадает с направлением прецессии магнитного момента \vec{M} . При $\omega = \omega_0$ вращающийся вектор \vec{H}_ω остается неподвижным относительно прецессирующего магнитного момента \vec{M} . ВЧ магнитное поле постоянно стремится увеличить угол ϕ . Нарастание амплитуды вынужденной прецессии ограничено магнитным трением. Достигается установившийся режим $\phi = const$, при котором \vec{M} описывает коническую поверхность с осью H_0 . Энергия, непрерывно подводимая от ВЧ магнитного поля, рассеивается в виде тепла в кристаллической решетке феррита. Если частоты ω и ω_0 не совпадают, потери снижаются.

В случае взаимно противоположных направлений вращения векторов \vec{H}_ω и \vec{M} поглощения в феррите в среднем не происходит, т.к. механический момент, действующий на электрон, не остается *const*.

Таким образом, при совпадении направлений вращения вектора ВЧ магнитного поля \vec{H}_ω и магнитного момента электрона феррит ведет себя подобно резонансному контуру с собственной частотой ω_0 . Поскольку ω_0 линейно зависит от напряженности H_0 , то потери в феррите проходят через резонансный максимум (1), рис.2.

При взаимно противоположном вращении \vec{H}_ω и \vec{M} потери не имеют максимума на резонансной частоте. Данное явление – ферромагнитный резонанс.

Максимальное поглощение при $H_0 = 1000 \text{ Э} \approx 8 \times 10^4 \text{ А/м}$ приходится на $f \approx 2800 \text{ МГц}$ ($\lambda_0 = 10,7 \text{ см}$).

Свойства намагниченной ферритовой среды, различные для СВЧ полей с противоположным направлением вращения вектора \vec{H}_\sim учитывают, вводя два значения магнитной проницаемости:

μ_+ - для волн с правым (по часовой стрелке) вращением вектора \vec{H}_\sim ;

μ_- - для волн с левым вращением вектора \vec{H}_\sim .

Различное значение μ_+ и μ_- приводит к различию коэффициентов фазы $\beta_+ = \omega\sqrt{\varepsilon\mu_+}$ и $\beta_- = \omega\sqrt{\varepsilon\mu_-}$ и, следовательно, фазовых скоростей волн с H_\sim правого и левого вращения. При учете потерь в феррите его магнитная проницаемость оказывается комплексной

$$\mu_+ = \mu'_+ - j\mu''_+; \quad \mu_- = \mu'_- - j\mu''_-.$$

Здесь мнимая часть μ''_\pm характеризует потери электромагнитного поля СВЧ. Анализ зависимостей $\mu''_\pm = f(H_0)$ показывает, что величина μ' как μ''_- почти не зависит от напряженности постоянного магнитного поля H_0 . Однако в случае правого вращения величина μ'_+ резко возрастает (изменяется) в области ферромагнитного резонанса. Это аналогия с изменением реактивного сопротивления резонансного контура вблизи его резонансной частоты.

Зависимость μ''_+ от H_0 , имеющая вид резонансной кривой, определяется резонансными свойствами элементарных резонаторов – электронов, каждый из которых обладает свойствами высокочастотной колебательной системы. Из-за нерегулярности внутреннего строения ферритового образца и влияния формы поверхности подмагничивающее поле внутри феррита неоднородно. Поэтому резонансные частоты электронов различны. Отсюда расширение резонансной кривой.

Ферритовые вентили

Вентиль – устройство, которое пропускает сигнал в прямом направлении и поглощает сигнал, распространяющийся в обратном направлении. Различают вентили резонансного типа и со смещением поля.

Основным элементом является ферритовая пластина, находящаяся в постоянном подмагничивающем поле \vec{H}_0 и помещенная в сечение $(a - x_1)$, в котором поле \vec{H}_\sim основной волны H_{10} имеет круговую поляризацию, рис.3. При распространении волны H_{10} по направлению (-z),

т.е. к читателю, вектор \vec{H}_\sim магнитного поля будет вращаться по часовой стрелке, если смотреть вдоль \vec{H}_0 . При соответствующей величине H_0 и соблюдении условия резонанса распространение такой волны будет сопровождаться потерями электромагнитной энергии за счет поглощения ее ферритом. Ослабление волны, распространяющейся в обратном направлении вдоль координаты z (от читателя), будет незначительным, т.к. ее вектор \vec{H}_\sim вращается против часовой стрелки и μ'' - мало.

В вентиле со смещением поля на ферритовую пластину, расположенную из боковой стенки волновода, наносят пленку из поглощающего материала. Если напряженность магнитного поля \vec{H}_0 соответствует области значений, в которой $\mu'_+ \approx 0$, то структура поля волны H_{10} , распространяющейся вдоль координаты z с правым вращением вектора \vec{H}_\sim , сильно искажается.

Подбором толщины ферритовой пластины и ее параметров добиваются получения минимума электрического поля этой волны в области поглощающей пленки. Поэтому прямая волна проходит через вентиль с малым затуханием.

Поле обратной волны H_{10} имеет левое вращение вектора \vec{H}_\sim и ему соответствует $\mu'_- \approx \mu_0$. Большое значение диэлектрической проницаемости ϵ_v феррита обуславливает концентрацию электрического поля обратной волны на краю пластины, где нанесена поглощающая пленка. Поэтому обратная волна испытывает значительное ослабление из-за потерь в поглощающей пленке. Основными параметрами вентиля являются прямое затухание (0,1 дБ); развязка (ослабление в обратном направлении) 15-20 дБ и КСВ=1.02÷1.5.

Циркуляторы Y – типа

Различие в подмагниченных ферритах фазовых скоростей волн, для которых направления вращения вектора \vec{H}_\sim противоположны, позволяют создать компактные 3-ех и 4-ех плечие циркуляторы. Передачу энергии в нем можно записать в виде $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$.

Y – циркулятор образуется с помощью 3-ех соединенных между собой идентичных прямоугольных волноводов в плоскости H , которые повернуты друг относительно друга на 120° . В центре волноводного сочленения расположен ферритовый цилиндр, намагниченный в направлении, перпендикулярном широким стенкам волновода.

Волна типа H_{10} , поступающая в плечо 1 дифрагирует на ферритовом цилиндре и создает две равные поверхностные волны, огибающие феррит в противоположных направлениях, рис.4. Направления вращения вектора \vec{H} образовавшихся волн противоположны (в точках А и В), поэтому их фазовые скорости при подмагничивании феррита однородным полем H_0 , различны $v_{\pm} = 1/\sqrt{\epsilon\mu_{\pm}}$.

Подбирая диаметр ферритового цилиндра и величину намагничивающего поля H_0 , можно обеспечить при суперпозиции поверхностных волн расположение пучности напряженности электрического поля в центре плеча 2, а узла в центре плеча 3. При этом волна из плеча 1 передается в плечо 2 и не поступает в плечо 3. Изменение направления силовых линий постоянно намагничивающего поля приведет к взаимному перемещению пучности и узла напряженности поля, в следствии чего волна из 1 пойдет в 3. Для качественной оценки свойств циркулятора вводятся два параметра: величина развязки между плечами А и величина прямых потерь L .

$$A_{13} = 10\lg(P_{11}/P_{31})\text{дБ}$$

$$A_{21} = 10\lg(P_{22}/P_{12})\text{дБ}$$

$$A_{32} = 10\lg(P_{33}/P_{23})\text{дБ}$$

$$L_{12} = 10\lg(P_{11}/P_{21})\text{дБ}$$

$$L_{23} = 10\lg(P_{22}/P_{32})\text{дБ}$$

$$L_{31} = 10\lg(P_{33}/P_{13})\text{дБ}$$

A_{21} - развязка между 1 и 2;

L_{12} - прямые потери;

A_{32} - развязка между 2 и 3;

L_{23} - прямые потери;

A_{13} - развязка между 1 и 3;

L_{31} - прямые потери;

Для Y – циркулятора удастся получить развязку между плечами на фиксированной частоте до 35 дБ при прямых потерях 0,2 дБ. КСВ со стороны входного плеча ≤ 1.05 . Эти цифры быстро ухудшаются с изменением частоты питающего генератора, т.к. нарушаются оптимальные соотношения по амплитуде и фазе между электромагнитными полями в плечах циркулятора. Так, при изменении частоты на 1% развязка между плечами ухудшается в 2 раза, а прямые потери возрастают. Одновременно увеличиваются и отражения от плеч циркулятора.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Какими основными свойствами обладают ферритовые вентили?
- 6.2. Какими параметрами принято характеризовать работу вентиля?

- 6.3. Какими основными свойствами обладают ферритовые циркуляторы?
- 6.4. Какими параметрами принято характеризовать работу циркулятора?
- 6.5. Опишите принцип действия ферритового Y - циркулятора.
- 6.6. Объясните зависимость развязок и ослабления между плечами циркулятора от напряженности магнитного поля H_0 и частоты СВЧ колебаний.
- 6.7. Укажите СВЧ устройства, в которых используются ферритовые вентили и циркуляторы.

7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

7.1. Измерение прямых и обратных потерь ферритового вентиля типа ФВВ1-21.

- Подготовьте и включите прибор Р2-65 по схеме измерения ослабления;
- Включите вентиль в прямом направлении в тракт прибора Р2-65;
- Включите генератор прибора Р2-65 в режиме качания частоты в диапазоне $26 \div 38$ ГГц;
- Получите на экране индикатора прибора Р2-65 изображение характеристики ослабления;
- Определите по шкале прибора Р2-65 прямые потери вентиля в дБ на частоте 35 ГГц;
- Постройте график частотной зависимости прямых потерь вентиля в диапазоне $26 \div 38$ ГГц;
- Сравните полученные данные с паспортными на исследуемый вентиль.
- Переориентируйте положение вентиля в тракте прибора Р2-65 на обратное;
- Получите на экране индикатора прибора Р2-65 изображение характеристики ослабления в диапазоне $26 \div 38$ ГГц;
- Определите по шкале прибора Р2-65 обратные потери вентиля в дБ на частоте 35 ГГц;
- Постройте график частотной зависимости обратных потерь вентиля в диапазоне $26 \div 38$ ГГц;
- Сравните полученные данные с паспортными на исследуемый вентиль;

7.2. *Измерение прямых потерь и развязок ферритового циркулятора 08-Цв-4.*

- Включите циркулятор в тракт прибора Р2-65 в прямом направлении (1→2);
- Получите на экране индикатора изображение характеристики ослабления в диапазоне 26÷38 ГГц;
- Определите по шкале прибора Р2-65 прямые потери на частоте 35 ГГц;
- Выполните аналогичные измерения для направлений включения циркулятора (2→3), (3→1);
- Включите циркулятор в тракт прибора Р2-65 по схеме измерения развязки между плечами (1 и 3), нагрузив плечо 2 на согласованную нагрузку;
- Получите на экране индикатора изображение характеристики ослабления;
- Оцените по шкале прибора величину развязки между плечами 1 и 3 в дБ на частоте 35 ГГц;
- Аналогичные измерения выполните для случаев включения циркулятора (2→1), (3→2);
- Сравните полученные результаты по измерению прямых потерь и развязок с паспортными данными на исследуемый циркулятор;

7.3. *По результатам работы составить отчет, который должен содержать:*

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Программу работы;
4. Результаты экспериментов и расчетов в виде формул и таблиц;
5. Выводы по работе.

Список литературы

1. Лебедев Н.В. Техника и приборы СВЧ. Под ред. академика Н.Д.Девяткова, М.: «Высшая школа», 1970, 440 с.
2. А.Н.Зайцев, П.А.Иващенко, А.В.Мыльников Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение, М.: Изд. стандартов, 1989, 240 с.
3. Вальднер О.А., Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. / Учебная лаборатория. М.: Атомиздат, 1974, 232 с.

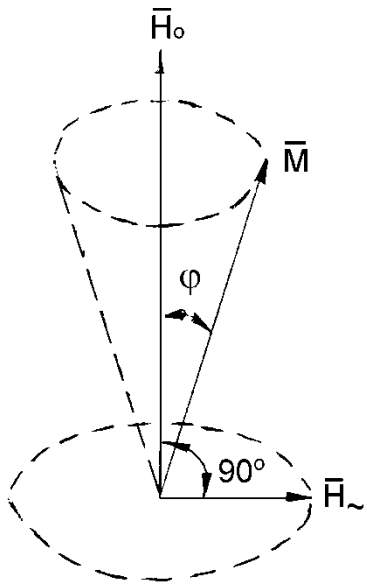


Рис. 1.

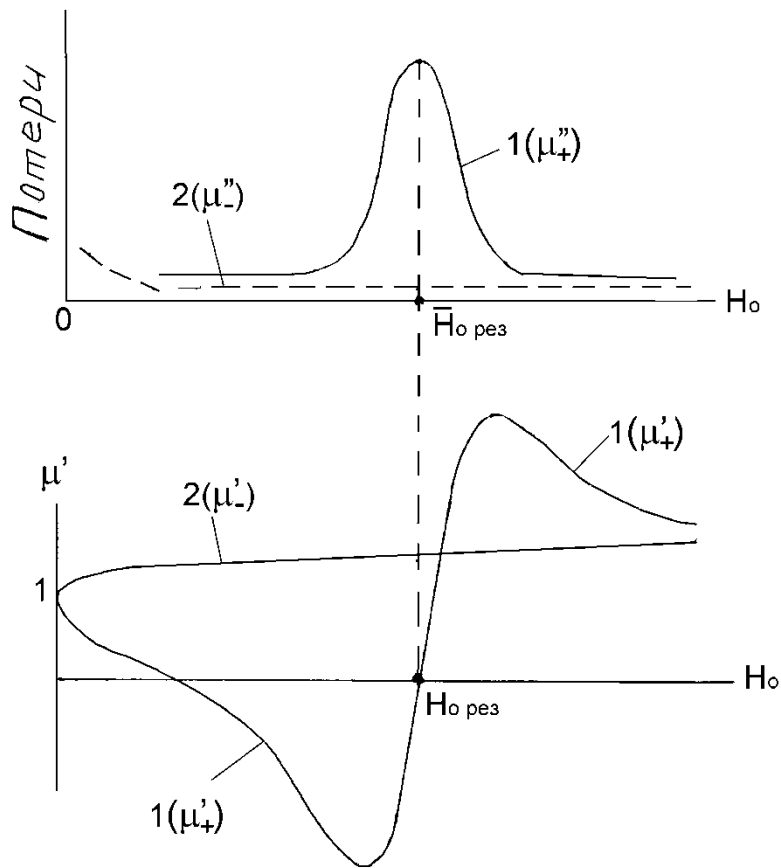


Рис. 2.

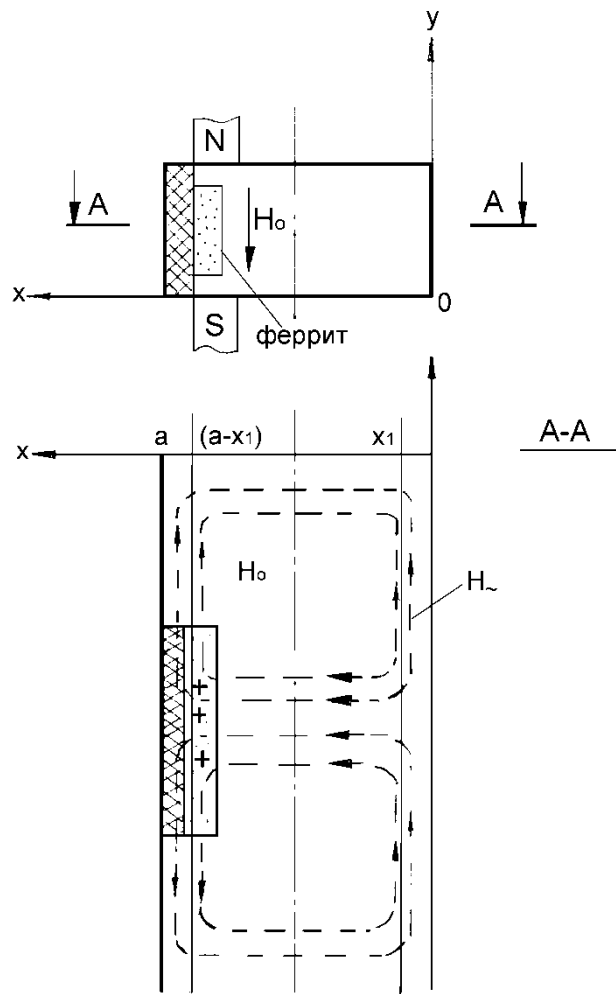


Рис. 3.

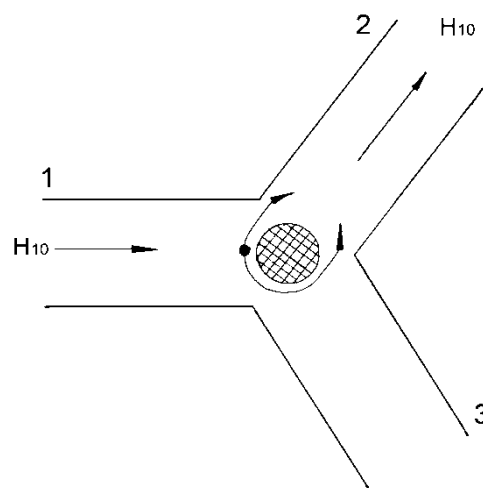


Рис. 4.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ РАЗВЕТВЛЕНИЙ.

ВВЕДЕНИЕ

В средствах контроля, реализующих радиоволновые методы широко используются волноводные разветвления: Е- и Н- тройники, волноводные кольцевые мосты, двойной волноводный тройник, направленный ответвитель. С помощью разветвителей можно распределить высокочастотную энергию между несколькими нагрузками или подключить несколько питающих источников к одной нагрузке.

В данной лабораторной работе рассматриваются Е- и Н-тройники и двойной волноводный тройник; определяются их основные параметры, изучаются процессы возбуждения и распространения в них электромагнитных волн.

1. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- 1.1. Панорамный измеритель КСВН и ослабления Р2-65.
- 1.2. Набор соединительных элементов.
- 1.3. Е и Н- волноводные тройники, выполненные в канале $7,2 \times 3,4$ мм².
- 1.4. Короткозамыкающий поршень.
- 1.5. Штангенциркуль.

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с основными характеристиками многополосных волноводных разветвлений и с измерительной техникой СВЧ диапазона.

Приобретение практических навыков измерения параметров вышеперечисленных устройств и их использование в устройствах разнородного волнового контроля.

Объектом исследования являются 90° Е и Н- тройники 8 мм диапазона длин волн.

3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

- 3.1. Изучить устройство волноводных разветвлений.

- 3.2. Изучить механизм возбуждения заданного типа волны в Е-тройнике и условия ее распространения.
- 3.3. Определить на каких минимальных расстояниях ℓ_{\min} от центра симметрии идеальных Е и Н- тройников должен быть расположен короткозамыкающий поршень для того чтобы обеспечить режимы полного прохождения и запираение сигнала поступающего в плечо 1 при наличии в плече 3 согласованной нагрузки. Указанные расстояния определить в мм. Рабочая длина волны $\lambda_0 = 10$ мм. Сечения прямоугольного волновода $7,2 \times 3,4$ мм².
- 3.4. Измерить с помощью панорамного измерителя КСВН Р2-65 величину ослабления сигнала и КСВН по входу в Е- тройнике для режимов полного прохождения и запираения.
- 3.5. Измерить с помощью штангенциркуля расстояние от плоскости симметрии до КЗ поршня для режимов полного отражения и прохождения сигнала в Е- тройнике.

Результат эксперимента сравнить с расчетом. Расстояние ℓ выразить в долях длин волн λ_g .

4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Изучить основные параметры Е, Н- тройников и двойного волноводного тройника. Рассмотреть применение данных устройств в радиоволновом контроле. Уяснить процессы прохождения и запираения СВЧ сигнала в Е- и Н-тройника. Изучить условия реализации этих процессов и связь с длиной волны H_{10} типа в волноводе.

5. ТЕОРИЯ

Чтобы распределить ВЧ энергию между несколькими нагрузками, можно использовать волноводные разветвления различных типов. Разветвления служат также для подключения нескольких питающих источников к одной нагрузке.

Если плоскость разветвления совпадает с плоскостью, в которой расположены магнитные силовые линии волны H_{10} , то тройник называется Н – тройником. Эквивалентной схемой его является параллельное соединение двух линий (рис. 1).

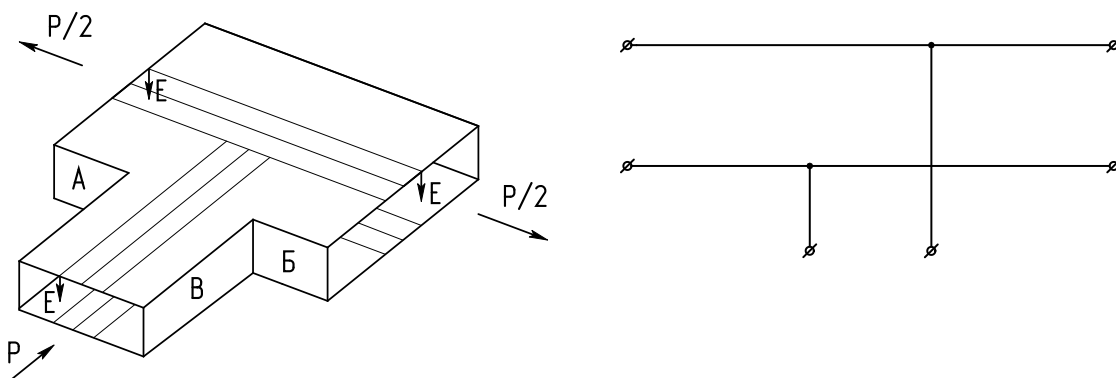


Рис. 1. H – тройник

Наглядно это можно представить по нанесенным в центре широкой стенки волноводов полоскам продольного тока.

Для E – тройника плоскость разветвления совпадает с плоскостью, в которой расположены электрические силовые линии. Для него эквивалентной схемой является последовательное соединение длинных линий (рис. 2).

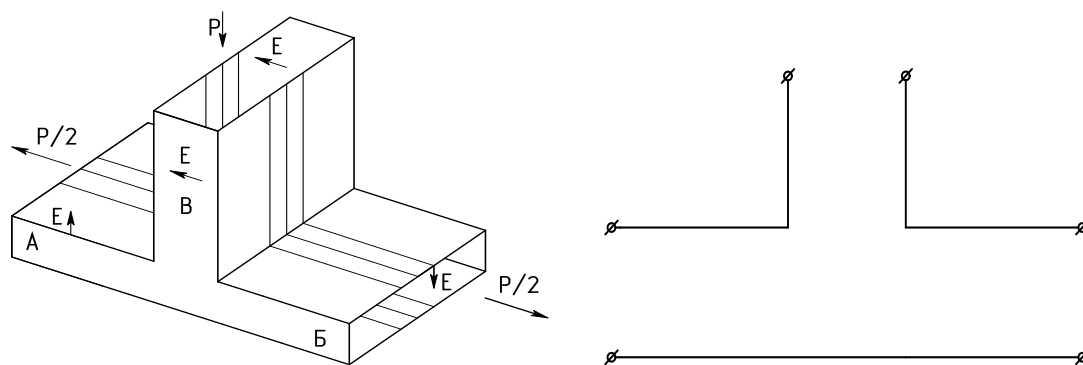


Рис. 2. E – тройник

Тройниковые разветвления являются шестиполюсниками. Волноводные тройники обладают интересными особенностями. Если в случае H – тройника генератор подключен к плечу B, то в плечах A и B равной амплитуды будут распространяться в противоположных направлениях с одинаковыми фазами.

При подключении генератора к плечу B E – тройника энергия также делится пополам между плечами A и B, но в этих плечах волны будут распространяться с противоположными фазами. Если же переме-

стить источник в плечо Б, то энергия будет распределяться поровну между плечами А и В.

Большое практическое значение имеет двойной тройник, который состоит из совмещенных Н и Е – тройников (рис.3).

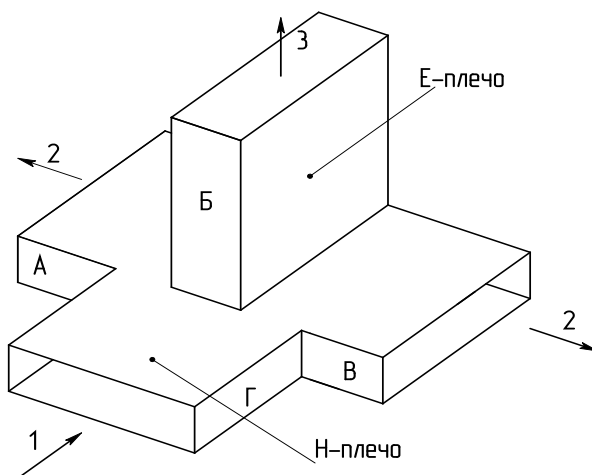


Рис. 3. Двойной тройник

Плечи А, Б, В составляют Е – тройник, а плечи А, В, Г – Н – тройник. Двойные мосты на СВЧ играют такую же роль, как и мостовые схемы на низких частотах. Если к плечу Б подключить генератор СВЧ колебаний, а к плечу Г – измерительный прибор то могут наблюдаться два случая:

- а) мост сбалансирован, и прибор не дает показаний;
- б) мост не сбалансирован, и показания прибора тем больше, чем больше разбаланс моста;

В сбалансированном мосте к плечам Б и Г можно подключить разные СВЧ генераторы. Несмотря на то, что они работают на общую нагрузку, влияния одного генератора на работу другого не будет. Генераторы будут развязаны один относительно другого.

Рассмотрим другой пример использования двойного тройника. Подключим СВЧ генератор к плечу Г, а детектор - к плечу Б. Кроме того, предположим, сначала, что в нагрузочные плечи А и В включены одинаковые нагрузки. Тогда энергия от генератора распределится в плечи А и В поровну, а в плечо Б не пройдет из-за симметрии поля в основном волноводе. Т.о. плечи Б и Г будут развязаны. Если же нагрузки не одинаковы, то часть энергии из-за создавшейся несимметрии полей в основном волноводе ответвится в плечо Б и показания прибора будут зависеть от степени различия нагрузок. Одну из нагрузок можно сделать согласованной с волноводом. В этом случае прибор будет отме-

часть степень рассогласования другой нагрузки по сравнению с эталонной, т. е. двойной тройник можно использовать для измерения коэффициента отражения.

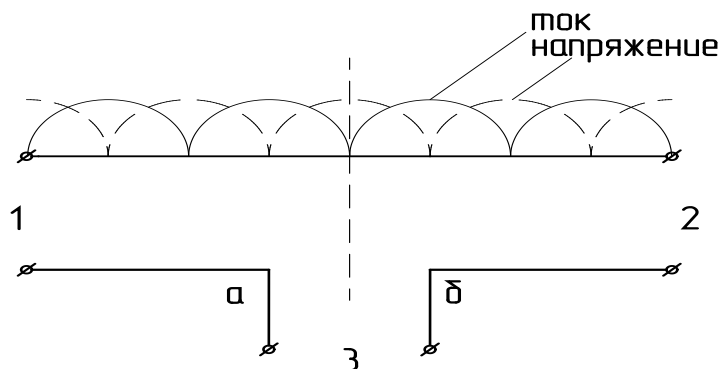


Рис. 4. E – тройник (последовательное соединение двух линий)

В плечо 3 E-тройника энергия не поступает, если в плоскости симметрии тройника находится максимум стоячей волны высокочастотного напряжения и минимум тока на зажимах аб ВЧ ток равен нулю. Максимуму отклонения энергии в боковое плечо 3 соответствует случай, когда в плоскости симметрии находится минимум стоячей волны высокочастотного напряжения.

Для H-тройника энергия в плечо 3 не поступает, если в плоскости симметрии тройника находится минимум высокочастотного напряжения стоячей волны (рис.5).

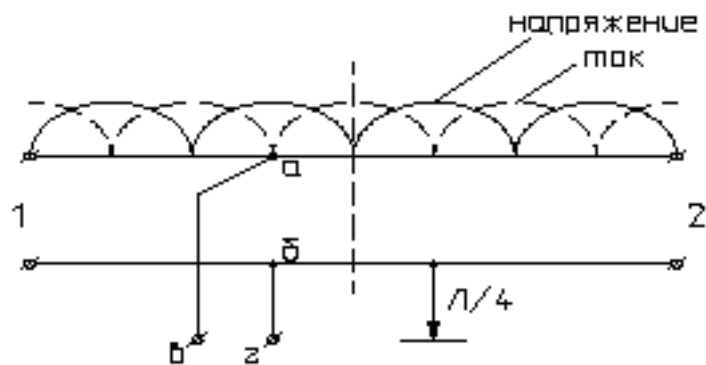
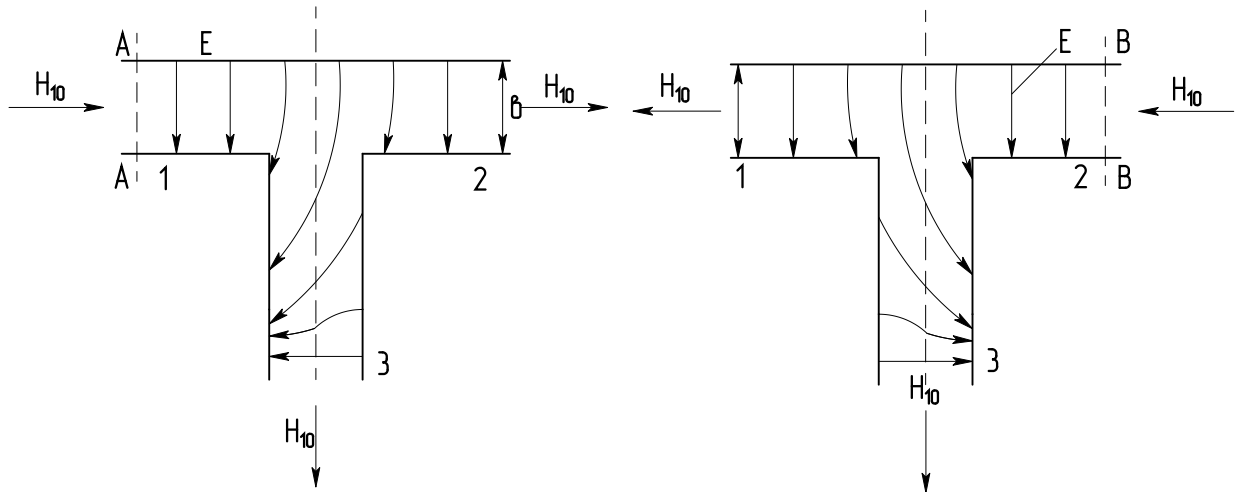


Рис. 5. H – тройник (параллельное соединение)



Для выяснения законов, по которым происходит распространение волны в разветвлении, воспользуемся известным в оптике принципом Гюйгенса. Обратимся сначала к тройнику в плоскости E.

Пусть в плоскости AA плеча 1 расположен генератор, возбуждающий волну типа H_{10} . Рассмотрим последовательные положения одного и того же волнового фронта через равные промежутки времени при распространении волны слева направо. На рис. волновой фронт совпадает с вектором E.

Согласно принципу Гюйгенса, для построения нового волнового фронта необходимо принять каждую точку исходного волнового фронта за источник сферической волны и найти огибающую поверхность ко всем элементарным сферическим волнам. Получаем изгиб волнового фронта в области разветвления E – тройника. При построении волновых фронтов следует учитывать граничные условия, исключающие существования тангенциальной составляющей электрического поля на стенках волновода. Та же картина получается при возбуждении того же тройника из плеча 2 генератором, находящимся в плоскости BB.

Далее рассмотрим одновременное возбуждение тройника в плоскостях AA и BB, расположенных в плечах 1 и 2 на равных расстояниях от оси симметрии тройника. Пусть воображаемые генераторы в плоскостях AA и BB являются когерентными, имеющими одинаковую мощность и работают строго синфазно. Тогда в боковое плечо 3 обе волны приходят в противофазе (наложим оба рисунка). Происходит полная интерференция, в результате чего энергия не поступает в боковое плечо 3. В основном волноводе две противоположные волны образуют стоячую волну. В плоскости симметрии обе волны синфазны, в силу чего здесь – максимум стоячей волны напряженности электрического поля. Т.е. в

боковое плечо 3 энергия не поступает, если в плоскости симметрии находится максимум стоячей волны вектора E .

При противофазном возбуждении – максимуму, ответвления в боковое плечо 3, соответствует случай нахождения в плоскости симметрии минимальной стоячей волны поля E .

В плоскости симметрии находится узел стоячей волны электрического поля. Ответвления энергии в боковое плечо не происходит. При расположении в плоскости симметрии максимума электрического поля имеет место максимальное ответвление энергии в боковое плечо.

Экспериментальная проверка свойств волноводных разветвлений может быть выполнена с помощью КЗ поршней и согласованных нагрузок.

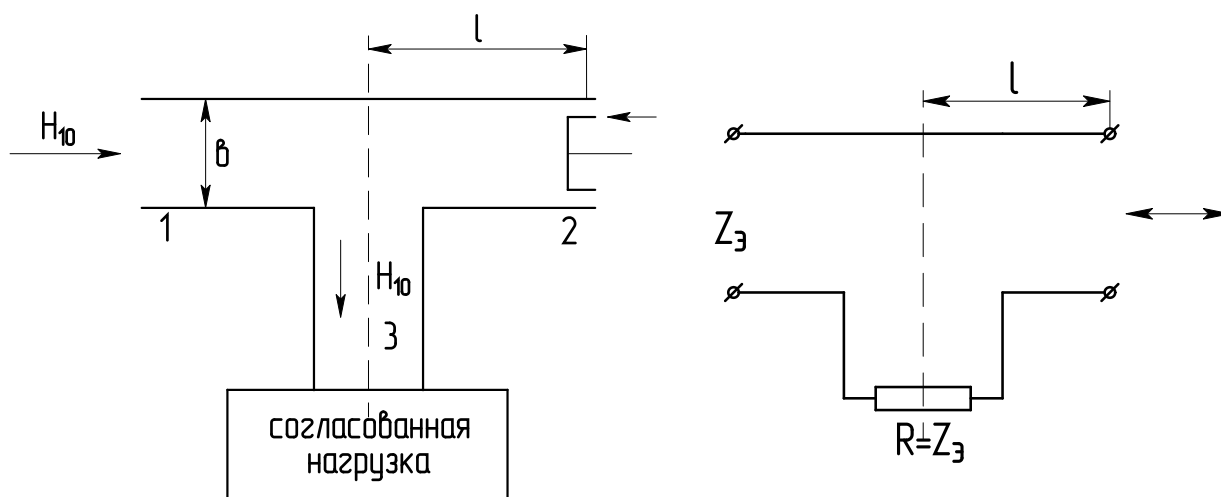


Рис. 6. Эквивалентная схема E – тройника

При изменении электрической длины l/λ_g короткозамкнутого волновода (шлейфа), входное сопротивление в клеммах разветвления, если смотреть в сторону поршня, изменяется, приобретая бесконечное значение при $\lambda/4$ длине шлейфа и нулевое при полуволновой длине ($\lambda_g/2$). Поэтому для E – тройника, имеющего последовательную схему ответвления, сигнал из плеча 1 должен проходить в согласованную нагрузку (плечо 3) в режиме КЗ на входе шлейфа, т. е. при расстоянии $l = m \times \lambda_g/2, m = 0, 1, 2, \dots$. В этом случае E – тройник фактически превращается в резкий изгиб, состоящий из 1 и 3 плеч.

При расстоянии $l = (2m + 1) \cdot \lambda_g/4$ от плоскости КЗ до участка разветвления, т. е. в режиме ХХ на входе шлейфа сигнал полностью отра-

заться обратно в плечо 1 и не пройдет в плечо 3 для идеальной схемы ответвления.

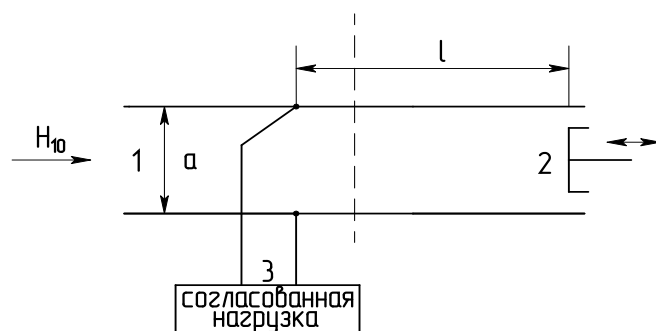


Рис. 7. Н – тройник

Для Н-тройника имеет место обратная картина. Прохождение сигнала будет из 1 в 3 в режиме ХХ на входе шлейфа, т. е. при $l = (2m + 1) \cdot \lambda_g / 4$.

Наибольшее отражение при $l = m \times \lambda_g / 2$, соответствующем КЗ клемм разветвления. Для двойного волноводного тройника согласно принципам нечетного и четного возбуждения Е – и Н – плеч, сигнал проходит в согласованную нагрузку при расстояниях до КЗ поршней, отличающихся на четверть длины волны

$$\Delta l = l_2 - l_1 = (2m + 1) \lambda_g / 4, \text{ и}$$

полностью отражается на входе двойного тройника при одинаковых расстояниях до поршней или при разности расстояний, кратной половине длины волны в волноводе, т.е. $\Delta l = m \times \lambda_g / 2$.

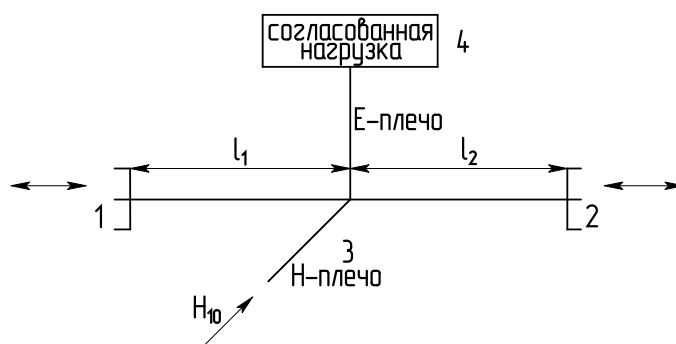


Рис. 8. Двойной волноводный тройник

Полного согласования бокового плеча тройников достичь не удастся из-за присутствия не распространяющихся высших типов волн.

Предварительное расчетное задание

Определить на каких минимальных расстояниях l от центра симметрии идеального Е и Н – тройника должен быть расположен КЗ поршень для того, чтобы обеспечить полное прохождение и запираение сигнала, поступающего в плечо 1 при наличии в плече 3 согласованной нагрузки. Указанные расстояния выразить в долях λ . Рабочая длина волны или частота задается преподавателем. Волновод $7,2 \times 3,4$ мм², $f = 30$ ГГц.

Порядок выполнения работы и задание

1. Ознакомиться с панорамным измерителем КСВН и ослабления Р2-65.
2. Исследовать условия прохождения и запираения СВЧ мощности между двумя плечами Е – и Н – тройника. С этой целью присоедините к испытываемому тройнику волноводную секцию с КЗ – поршнем. Настроить генератор на частоту, указанную преподавателем.
Перемещая КЗ поршень (поршни) до получения режимов наибольшего прохождения и запираения сигналов, измерить:
 - а) КСВ на входе тройников в двух режимах (прохождение и запираение);
 - б) ослабление сигнала для тройника в двух режимах;
 - в) расстояние от центра симметрии до КЗ поршня;
3. Расстояние l измерить с помощью штангенциркуля по внешним габаритам тройника. Центр симметрии тройника отмечен риской на экспериментальной макете.
4. Определите длину волны в волноводе λ_g .

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Дать определение Е и Н-тройников.
- 6.2. В чем особенность двойного волноводного тройника?
- 6.3. Как делится мощность в Е – тройнике?
- 6.4. Запишите условия полного прохождения и запираения сигнала в Е и Н- тройниках.
- 6.5. Каким образом используется двойной волноводный тройник в РВК?
- 6.6. Объяснить механизм режима полного запираения сигнала в Е-тройнике с КЗ поршнем.
- 6.7. На каком принципе основана работа панорамного измерителя КСВ и ослабления Р2-65.

7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

7.1. Подготовьте к работе панорамный измеритель КСВН и ослабления Р2-65. Для этого заземлите прибор, затем прокальбруйте, соединив блоки и направленные ответвители (НО) «Пад» и «Отр» по схеме «Калибровка».

7.2. Измерение ослабления Е- тройника в режиме полного прохождения сигнала (по схеме рис.9).

- присоедините к плечу «2» Е-тройника короткозамыкающий поршень.
- включите Е-тройник в волноводный тракт прибора Р2-65 между НО «Пад» и НО «Отр».
- К выходу НО «Отр» подключите согласованную нагрузку из комплекта Р2-65.
- С помощью микрометрического винта осуществите перемещение короткозамыкающего поршня до достижения полного прохождения сигнала через Е- тройник, что соответствует минимуму ослабления сигнала.
- установите переключателем «Пределы» линию характеристики ослабления вблизи середины экрана.
- установите частотную метку, соответствующую частоте 30 ГГц в выбранную точку характеристики ослабления.
- совместите ручкой «Отсчет» линию электронного визира в месте нахождения частотной метки с характеристикой ослабления.
- произведите отсчет по верхней шкале «дБ». Результат измерения равен алгебраической сумме показаний переключателя «Пределы» и отсчета по верхней шкале «дБ».
- произведите отсчет перемещения поршня по шкале микрометрического винта в мм.

7.3. Измерение ослабления Е- тройника в режиме полного запирания сигнала.

- с помощью микрометрического винта перестройте поршень до достижения полного запирания сигнала, что соответствует максимуму ослабления.
- дальнейшие действия выполнить в соответствии с п. 7.2.

7.4. Измерение КСВН Е- тройника по входу в режимах полного прохождения и запираия сигнала (по схеме рис.10).

- переориентируйте НО «Отр» и присоедините к его выходу измеренный объект (Е- тройник).
- подключите к плечу «3» Е- тройника согласованную нагрузку из комплекта прибора Р2-65.
- установите на шкале микрометрического винта короткозамыкающего поршня значение, соответствующего режиму полного прохождения (запираия) сигнала.
- переключателем «Пределы» расположите кривую КСВН вблизи середины экрана.
- установите ручкой «Частота» (ГКЧ) визир частотомера на отметку 30 ГГц.
- ручкой «Отсчет» совместите линию электронного визира с кривой КСВН в месте нахождения частотной метки.
- отсчитайте измеренное значение КСВН по шкале «КСВН» (нижняя шкала шкального устройства).

7.5. Измерение расстояния от плоскости симметрии Е- тройника до короткозамыкающего поршня.

- отсоедините поршень от Е- тройника.
- с помощью глубиномера штангенциркуля измерьте расстояние от плоскости присоединительного фланца до поршня.
- измерьте расстояние штангенциркулем от фланца тройника в плече «2» до плоскости симметрии
- сложите оба результата и выразите расстояние в долях λ для режимов полного прохождения и запираия.
- сравните экспериментальные данные с результатами расчетов для ℓ .

7.6. Исследование Н-тройника произвести в соответствии с пп.2÷5.

7.7. По результатам работы составить отчет, который должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Программу работы;
4. Краткую теорию;
5. Схемы испытаний;
6. Результаты экспериментов в виде таблиц, графиков;
7. Выводы по результатам проводимых исследований.

Список литературы

1. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ / Под ред. академика Н.Д.Девяткова, М.:»Высшая школа», 1970, 440 с.
2. А.Н.Зайцев, П.А.Иващенко, А.В.Мыльников Измерения на сверх-высоких частотах и их метрологическое обеспечение / М.: Изд. стандартов, 1989, 240 с.

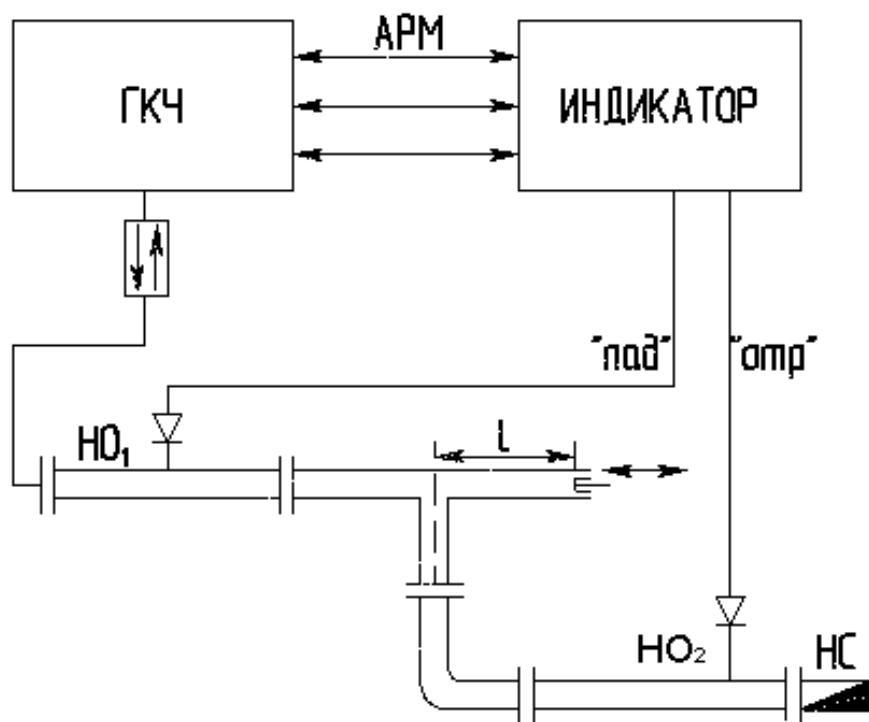


Рис. 9.

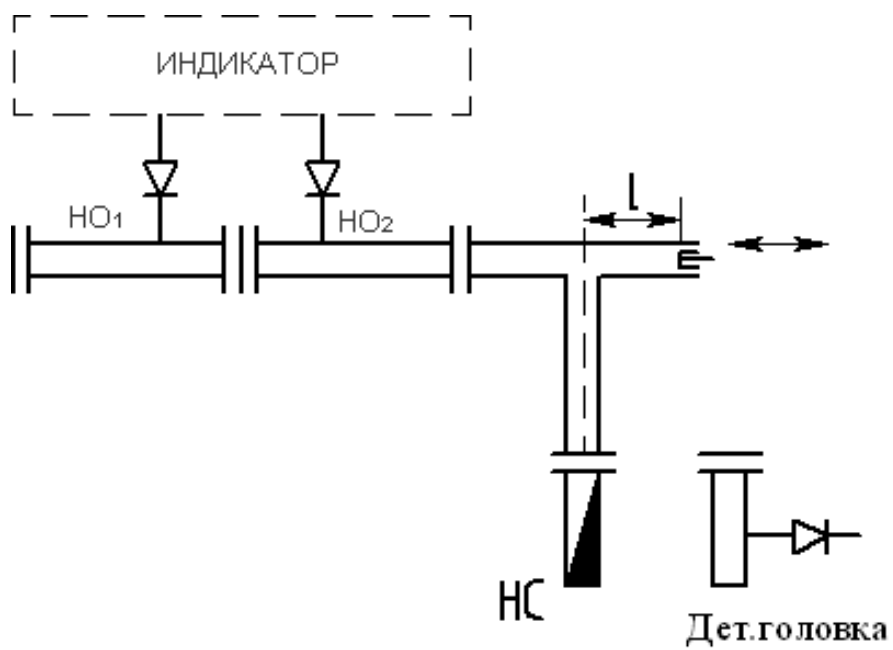


Рис. 10.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ В РВК

ВВЕДЕНИЕ

Одним из информативных параметров радиоволнового контроля является частота электромагнитных колебаний f (длина волны λ). С другой стороны это одна из характеристик электромагнитных колебаний, которая может быть измерена с очень высокой точностью. Поэтому важно знать методы и средства измерения частоты в СВЧ диапазоне, имеющем ряд особенностей, отличающих его от других частот спектра.

Работа рассчитана на 2 часа.

1. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- 1.1. Панорамный измеритель КСВН Р2-65.
- 1.2. Набор волноводных элементов.
- 1.3. Волномер средней точности 8 мм диапазона длин волн ВСТ-0912.

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 2.1. Изучить основные методы измерения частоты в СВЧ диапазоне.
- 2.2. Изучить принцип действия и устройство резонансных волномеров.
- 2.3. Освоить практическую работу с волномером ВСТ-0912.

3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

- 3.1. Освоить волномер ВСТ-0912.
- 3.2. Снять частотную зависимость волномера ВСТ-0912, перестраивая его с шагом 0,5 мм по шкале микрометрического винта в диапазоне частот 26,0÷32,0 ГГц.
- 3.3. Построить градуировочную характеристику волномера ВСТ-0912.

1. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Изучить определения и понятия частоты, резонансной частоты, добротности резонатора. Изучить методы измерения таких информативных параметров, как резонансная частота, число типов колебаний

резонансных импульсов, возбужденных на определенном интервале частот, добротность резонансной системы.

2. ТЕОРИЯ

Частотой называют физическую величину, равную числу идентичных событий в единицу времени. За единицу частоты – герц – принята такая частота, при которой совершается одно событие в секунду.

Как и для периодических (гармонических), так и для квазигармонических процессов частота является усредненной характеристикой за время наблюдения. Характерным примером периодического процесса может служить синусоидальный сигнал с амплитудой U_m и частотой f :

$$U(t) = U_m \times \sin(2\pi f \cdot t), \quad (1)$$

где t – время. Произведение $2\pi f$ называют круговой частотой и обозначают ω . Формула (1) описывает бесконечный колебательный процесс, у которого ни амплитуда, ни частота не меняются во времени. Реальные процессы конечны. Поэтому у них амплитуда и частота зависят от времени:

$$U(t) = U_m(t) \times \sin(2\pi f(t) \cdot t). \quad (2)$$

Это модулированные колебания. Если изменяется только амплитуда, то колебания называют амплитудно-модулированными.

Существуют два метода измерения частоты:

1. Заключается в определении числа событий за интервал времени наблюдений с последующим делением полученного числа на этот интервал (метод прямого счета).
2. Состоит в сравнении частоты периодического процесса с частотой воспроизводимого процесса.

Особенность измерения СВЧ связана с техническими трудностями реализации метода прямого счета, используемого в частотомерах до 1 ГГц.

В практике измерений СВЧ применяют частотомеры двух типов: резонансные и электронно-счетные, при этом весьма распространены измерения частоты или длины волны с помощью волномеров. Частота f связана с длиной волны λ зависимостью:

$$f \times \lambda = \nu, \quad (3)$$

где ν – скорость распространения электромагнитной волны в данной среде.

$$\nu = c / (\epsilon_a / \epsilon_0)^{1/2} = c / (\epsilon_r)^{1/2}, \quad (4)$$

здесь $c = 299772 \pm 2$ км/с – скорость света в свободном пространстве; ϵ_r - относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Длина волны в свободном пространстве λ_0 будет:

$$\lambda_0 = \lambda \times (\epsilon_a / \epsilon_0)^{1/2} = \lambda \times (\epsilon_r)^{1/2}. \quad (5)$$

Из формулы (3) следует, что в принципе безразлично, какой информативный параметр – частота или длины волны – будет измерен.

1. Волномеры малой точности имеют относительную погрешность: $2 \times 10^{-2} \div 5 \times 10^{-3}$;
2. Волномеры средней точности имеют относительную погрешность: $10^{-4} \div 5 \times 10^{-4}$;
3. Волномеры высокой точности имеют относительную погрешность: $2 \times 10^{-4} \div 6 \times 10^{-6}$.

СВЧ частотомеры конструируются на основе резонансных, гетеродинных и электронно-счетных систем. Частотомеры резонансного типа используют перестраиваемые по частоте резонансные системы в виде коаксиальных или волноводных резонаторов. Измерение частоты при этом основывается на индикации момента резонанса прибором, связанным с колебательной цепью индуктивной или емкостной связью. Включение резонатора в линию передачи может быть последовательным либо параллельным. При последовательном включении (на «проход») резонатор имеет вторую связь с индикаторной цепью. В этом случае резонанс определяется по максимуму сигнала в индикаторе цепи. При параллельном включении (на «отсос») резонатор связан только с линией передачи, нагрузкой которой является индикаторная цепь. При этом наличие резонанса определяется по минимуму сигнала в индикаторе цепи. Данный волномер называется абсорбционным.

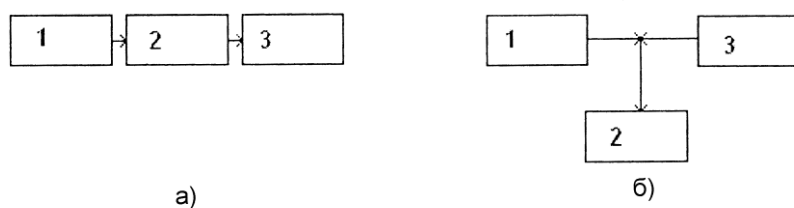


Рис.1. Структурная схема волномера:

а) – проходного типа; б) - абсорбционного типа

1 – генератор СВЧ; 2 – резонатор; 3 – индикаторная цепь.

На рис.2,3 приведены эквивалентные схемы обоих вышеприведенных типов резонансных волномеров.

Резонансный волномер проходного типа – последовательное включение резонатора:

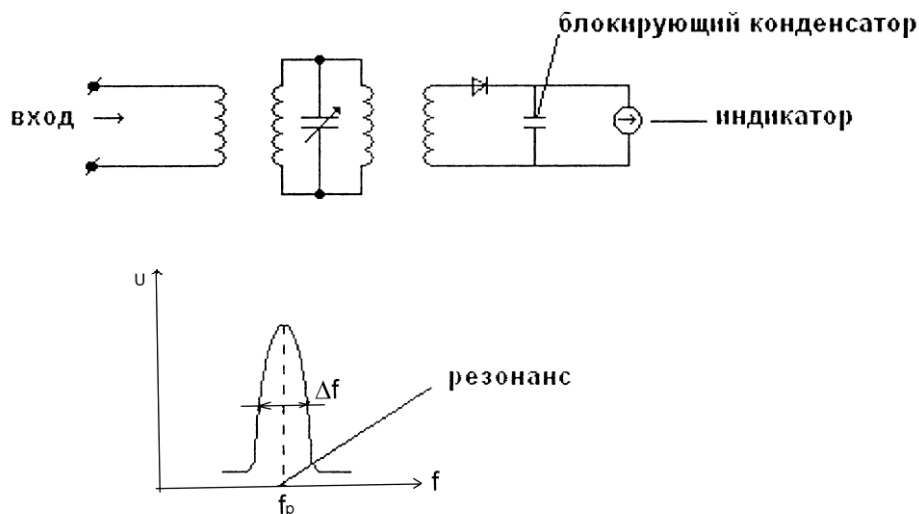


Рис.2.

Резонансный волномер абсорбционного типа – параллельное включение:

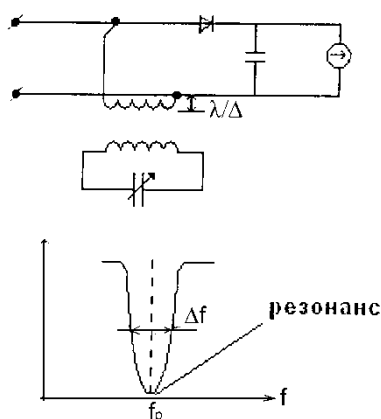


Рис.3.

Относительная погрешность определения резонансной частоты:

$$\Delta f / f_0 \approx 1/2 \cdot Q_n, \quad (6)$$

где Q_n - нагруженная добротность резонатора.

На рис.4 представлена функциональная схема резонансного частотомера (волномера) Ч2-9А 10-ти сантиметрового диапазона длин волн.

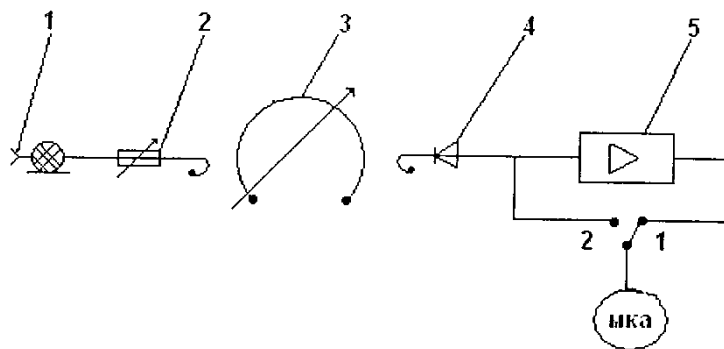


Рис.4.

1 – коаксиальный вход; 2 – переменный аттенюатор; 3 – перестраиваемый резонатор; 4 – детектор; 5 – усилитель.

При измерении частоты непрерывных колебаний переключатель находится в положении 2, а в случае импульсно-модулированных колебаний в положении 1.

6. ОПИСАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ВОЛНОМЕРА ВСТ-0912

Волномер средней точности ВСТ-0912 абсорбционного типа предназначен для работы в миллиметровом диапазоне длин волн ($0,95 \div 1,2$ см). В его состав входят: перестраиваемый цилиндрический резонатор, возбуждающий волновод, микрометрический винт. В резонаторе посредством двух отверстий связи в одной из торцевых стенок возбуждается H_{011} тип колебаний. Перестройка резонатора осуществляется за счет изменения его объема при перемещении торцевой стенки посредством микрометрического винта. С помощью градуировочной кривой отсчет по шкале микрометрического винта переводится в длину волны, на которой зафиксирован момент резонанса.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 7.1. Что является основным информативным параметром в данной работе?
- 7.2. Какое отличие при параллельном и последовательном включении резонатора в цепь?
- 7.3. Какой метод измерения частоты используется в данной работе?
- 7.4. Какие информативные параметры вы можете назвать?
- 7.5. Что может привести к погрешности результатов в данной работе?

8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- 8.1. Изучить устройство волномера ВСТ-0912.
- 8.2. Включить волномер в тракт прибора Р2-65 по схеме измерения ослабления.
- 8.3. Включить и прокалибровать прибор Р2-65, согласно инструкции по эксплуатации.
- 8.4. Перестраивая волномер от нулевой отметки шкалы микрометрического винта найти резонанс и определить его частоту по внутреннему частотомеру прибора Р2-65.
- 8.5. Определить границы перестройки волномера ВСТ-0912 по частоте, т.е.

$$\Delta f = f_n \div f_k.$$

- 8.6. Снять частотную зависимость волномера ВСТ-0912, перестраивая его с шагом 0,5 мм по шкале микрометрического винта в диапазоне частот 26,0÷32 ГГц.
- 8.7. Пересчитать значения частот в длину волны λ (см).
- 8.8. Построить градуировочную зависимость (кривую) $\lambda \approx F(N)$, где N – деления шкалы микрометрического винта в мм.
- 8.9. По результатам работы составить отчет, который должен содержать:
 1. Название работы;
 2. Цель работы;
 3. Программу работы;
 4. Результаты экспериментов и расчетов в виде таблиц (графиков);
 5. Выводы по работе.

Список литературы

1. Лебедев Н.В. Техника и приборы СВЧ. Под ред. академика Н.Д.Девяткова, М.: «Высшая школа», 1970, 440 с.
2. А.Н.Зайцев, П.А.Иващенко, А.В.Мыльников Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение, М.: Изд. стандартов, 1989, 240 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В РАДИОВОЛНОВОМ КОНТРОЛЕ

ВВЕДЕНИЕ

При реализации амплитудного метода РВК «на прохождение», в котором информативными параметрами являются интенсивность или мощность прошедшего через контролируемый объект СВЧ сигнала, возникает потребность измерения мощности. В диапазоне СВЧ измерение мощности имеет свои особенности.

В данной лабораторной работе рассматриваются методы и средства измерения мощности на СВЧ. Работа рассчитана на 2 часа.

1. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЯ

- 1.1. Ваттметр поглощаемой мощности МЗ-56
- 1.2. СВЧ генератор Г4-9А
- 1.3. Детекторная секция
- 1.4. Осциллограф
- 1.5. ВЧ кабели
- 1.6. Частотомер Ч2-9А

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучения принципа действия ваттметра поглощаемой мощности МЗ-56 и приобретение практических навыков работы с данным прибором. Оценивание погрешности измерений.

3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

- 3.1. Усвоить понятие мощности.
- 3.2. Изучить инструкцию по эксплуатации прибора МЗ-56.
- 3.3. Подготовить прибор к работе.
- 3.4. Собрать измерительную схему для контроля формы модулирующих импульсов.
- 3.5. Собрать измерительную схему и измерить мощность на выходе генератора Г4-9 в 3-ех режимах:
 - а) непрерывная генерация;
 - б) модуляция «меандром»;
 - в) модуляция коротким прямоугольным импульсом $\tau_i=0,5\div 1,0$ мкс.

- 3.6. Рассчитать для пп.б.в. импульсную мощность, используя соотношение $P_{имп} = P_{ср} / (\tau \cdot F)$
 где τ - длительность импульса;
 F – частота следования модулируемых импульсов.
- 3.7. Произвести измерение частоты генерации прибора Г4-9 с помощью частотомера Ч2-9а.
- 3.8. Сделать выводы по работе.

4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Изучить физические процессы, лежащие в основе действия СВЧ преобразователей для измерения мощности на СВЧ и их основные особенности.

5. ТЕОРИЯ

Мощность – это физическая величина, определяемая как работа, производимая в единицу времени. Единица мощности (Вт) Ватт. Размерность Ватта по определению равна джоулю в секунду [Дж/с].

Мощность постоянного тока, выделяющаяся в некоторой нагрузке, определяется произведением напряжения $U(V)$, падающего на этой нагрузке, на ток $I(A)$, протекающий через нее: $P = U \cdot I$; [Вт]=[В]·[А].

Для переменного тока, если напряжение и ток на нагрузке зависят от времени, вводится понятие мгновенной, активной и реактивной мощностей. В частности для мгновенной мощности: $P(t) = U(t) \cdot I(t)$

Для синусоидальной временной зависимости имеем:

$$U(t) = U_m \sin \omega t; I(t) = I_m \sin(\omega t + \phi).$$

Тогда мгновенная мощность изменяется во времени с удвоенной частотой:

$$P(t) = U_m I_m \sin \omega t \times \sin(\omega t).$$

Мощность принято характеризовать средним значением за несколько периодов колебаний, т.к. физические объекты, на которые действует мощность переменного тока инерционны.

Активная мощность P определяется как

$$P = \frac{U_m I_m}{nT} \int_0^{nT} \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \phi) dt = \frac{U_m I_m}{2} \cos \phi,$$

где $n = 1, 2, \dots, N$.

С учетом того, что средние квадратические (действующие) значения U и I для синусоидальных колебаний

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Имеем $P = UI \cos \varphi$.

При сдвиге фаз $\varphi = 90^\circ$ $\cos \varphi = 0$ и активная мощность в нагрузке не выделяется.

В диапазоне СВЧ в случае немодулированных колебаний их мощность за любой период несущей частоты одинакова и не зависит от числа периодов, за которое производится усреднение.

При определении среднего значения мощности амплитудно-модулированных сигналов усреднение необходимо производить за один или несколько периодов частоты модуляции. Здесь вводится понятие импульсной мощности, в общем случае как среднее значение мгновенной мощности за 1 или несколько периодов несущей частоты

$$P_u = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad t_2 - t_1 = nT$$

В зависимости от выбора моментов времени t_1 и t_2 P_u меняет своё значение.

Средним значением мощности импульсно-модулированных колебаний называют значение мощности P_u , усредненное за один или несколько периодов T_n повторения импульсов.

Под средним значением мощности в импульсе понимают значение P_u , усредненное за длительность импульса, когда t_1 совпадает с началом, а t_2 с окончанием импульса.

Кроме отмеченных выше широкое распространение получил термин «пиковая мощность», как мощность, усредненная за время намного меньше длительности импульса

$$P_{пик} = \max_{t_1}^{t_2} \int P(t) dt \quad t_2 - t_1 \ll \tau.$$

При работе с СВЧ устройствами важным условием является согласование генератора и нагрузки с линией передачи. Здесь различают мощность «падающую», «отраженную». Мощность, рассеиваемая в нагрузке – «поглощенная».

С учетом коэффициента отражения нагрузки поглощенная мощность

$$P_{погл} = P_{пад}(1 - |\Gamma_n|^2).$$

Измерители мощности, позволяющие определить мощность, выделенную в согласованной нагрузке, называется ваттметрами поглощаемой мощности. Часто требуется измерять мощность, проходящую через некоторое сечение тракта в несогласованную нагрузку. Измерители этого класса называют ваттметрами проходящей мощности.

Для измерения пиковой мощности применяются импульсные ваттметры.

Ваттметры поглощаемой мощности обозначаются: МЗ-00

Ваттметры проходящей мощности: М4-00

Средства поверки ваттметров: М1-00

Ваттметры поглощаемой мощности по своей сути представляют собой согласованную нагрузку, включенную на конце СВЧ тракта. Конструктивно они состоят из двух узлов:

1. Первичного измерительного преобразователя (ПИП)
2. Измерительного блока с отсчетным устройством

По виду ПИП подразделяют на:

1. Тепловые
2. Пондеромоторные
3. Электронные
4. Ферритовые и т.д.

Применяются ваттметры среднего значения и импульсные.

По уровню измеряемой мощности:

1. Малой мощности – до 10мВт
2. Средней мощности 10мВт-10Вт
3. Большой мощности > 10Вт

Классы точности ваттметров: 2,5; 4,0; 6,0; 10; 15; 25.

Измерительный преобразователь ваттметра поглощаемой мощности представляет собой нагрузку, в которой рассеивается (поглощается) основная часть падающей СВЧ мощности. Мощность электромагнитных колебаний превращается в нагрузку в тепло и может быть измерена несколькими методами:

1. Калориметрическим,
2. Термоэлектрическим,
3. Термосопротивлений.

Суть всех трех методов заключается в сравнении теплового воздействия на нагрузку мощности СВЧ колебаний и мощности постоянного тока или переменного тока низкой частоты. Тепловое воздействие индицируется средствами измерения температуры и, если их показания при воздействии сигнала СВЧ и постоянного тока одинаковы, то и мощности этих сигналов считаются равными.

Ваттметр поглощаемой мощности МЗ-56 предназначен для измерения мощности синусоидальных СВЧ сигналов и среднего значения мощности импульсно – модулированных СВЧ сигналов. В основу работы положен принцип преобразования СВЧ мощности в тепловой вид энергии и измерения образуемой на выходе преобразователя термо ЭДС.

Измерительный блок Я2М-66 представляет собой цифровой милливольтметр. Напряжение постоянного тока, поступающее на вход измерительного блока с СВЧ преобразователя, усиливается УПТ и подается на АЦП (рис 1). Выходной сигнал АЦП в виде кода управляет цифровым индикатором, показания которого пропорциональны входному напряжению или уровню мощности СВЧ, поглощенной в приемном преобразователе.

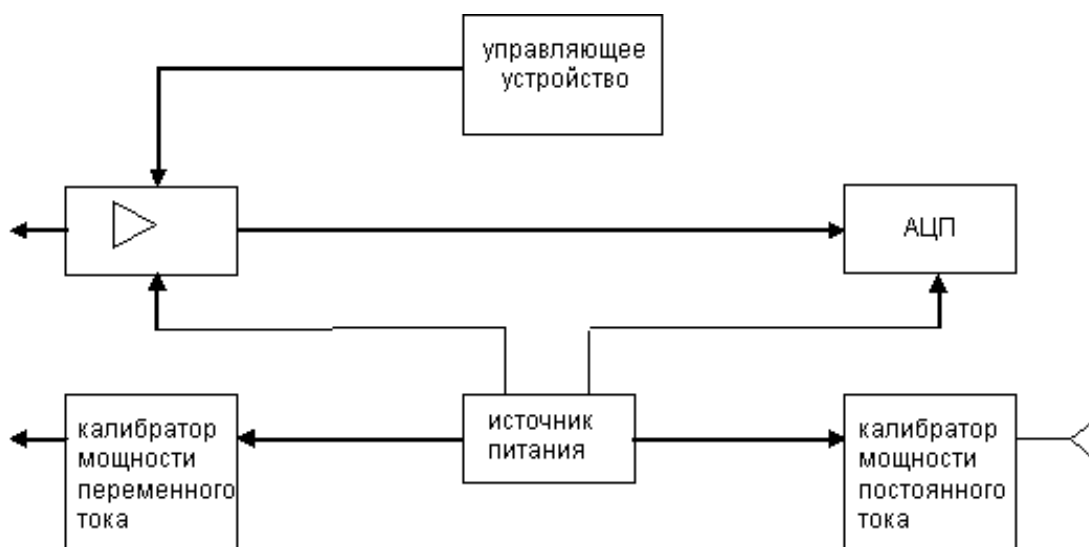




Рис 1. Структурная схема измерительного блока ваттметра

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

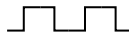





6.1. Дайте определение импульсной мощности.

- 6.2. Чем отличается мощность импульсно – модулированных колебаний от мощности в импульсе?
- 6.3. В чем состоит особенность измерения мощности на СВЧ?
- 6.4. Назовите типы первичных измерительных преобразователей ваттметров.
- 6.5. Назовите основные облики ваттметров поглощаемой и проходящей мощности.
- 6.6. Классификация ваттметров в зависимости от уровня измеряемой мощности.
- 6.7. Принцип действия ваттметра поглощаемой мощности.
- 6.8. В чем состоит суть калибровки ваттметра?

7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- 7.1. Изучить инструкцию по эксплуатации ваттметра МЗ-56.
- 7.2. Ознакомиться с расположением и назначением органов управления на передней и задней панелях измерительного блока Я2М-66.
- 7.3. Заземлить прибор.
- 7.4. Произвести калибровку ваттметра согласно инструкции по эксплуатации.
- 7.5. Установить по шкале внутреннего частотомера генератора Г4-9 значение частоты генерации, примерно 3ГГц (3000 МГц).
- 7.6. Включить и прогреть генератор Г4-9 в течение 3 минут.
- 7.7. Включить и прогреть ваттметр МЗ-56 в течении 30 минут.
- 7.8. Подключить к выходу генератора Г4-9 детекторную головку для наблюдения формы исследуемых колебаний.
- 7.9. Произвести наблюдения формы выходного сигнала Г4-9 при 3-ех режимах его работы: «НГ», ,  с помощью осциллографа.
- 7.10. Подключить вход преобразователя прибора МЗ-56 к выходу СВЧ генератора Г4-9.
- 7.11. Измерение мощности на выходе генератора в 3-ех режимах его работы:
 - Ручку «Режим работы» перевести в положение «НГ» (непрерывная генерация).
 - Регулировкой аттенюатора Г4-9 установить уровень выходной мощности по цифровому отсчетному устройству Я2М-

66 $1 \div 2$ мВт. Зафиксировать результат измерения мощности в режиме «НГ».

- Ручку «Режим работы» установить в положение  (модуляция меандром).
- Не изменяя положения ручки выходного аттенюатора генератора Г4-9 произвести отсчет средней мощности по цифровому отсчетному устройству блока Я2М-66.
- Ручку «Режим работы» установить в положение «» (режим модуляции коротким импульсом).
- Ручкой «Длительность» установить длительность модулирующего импульса, равной 1 мкс.
- Ручкой «Частота» установить, частоту модуляции F , равной 4000Гц.
- Произвести отсчет средней мощности по цифровому отсчетному устройству блока Я2М-66.
- В случае отсутствия показаний в режиме  ручкой выходного аттенюатора генератора Г4-9 поднять уровень выходной мощности до появления показаний на отсчетном устройстве блока Я2М-66, затем заново произвести измерение мощности для режимов «НГ» и «».
- После измерений в режимах  и  рассчитать импульсную мощность импульсно-модулированных колебаний. Результаты расчетов и измерений занести в таблицу.

7.12. Измерение частоты генерации прибора Г4-9.

- Соединить с помощью ВЧ кабеля выход генератора Г4-9 со входом частотомера Ч2-9А.
- Вывести ручки «Усиление» и «Аттенюатор» частотомера Ч2-9А в крайнее левое положение.
- Перевести переключатель «Режим работы» в положение «непрерывная».
- Включить тумблером «Сеть» питание генератора Г4-9.
- Выходным аттенюатором на приборе Г4-9 установить уровень выходной мощности 1мВт.
- Перестройкой резонатора прибора Ч2-9А добиться резонанса (максимальное отклонение стрелки индикатора).
- По таблицам, используя показания отсчетного устройства оценить частоту.

- Измерение частоты генерации прибора Г4-9
- С помощью ВЧ кабеля соединить выход частотомера Ч2-9А

7.13. По результатам работы составить отчет, который должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Программу работы;
4. Результаты экспериментов и расчеты в виде таблицы (графиков);
5. Выводы по работе.

Список литературы

1. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Под ред. Академика Н.Д. Девяткова, М.: «Высшая школа», 1970, 440с.
2. А.Н.Зайцев, П.А. Иващенко, А.В. Мыльников; Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение, М.: Изд. Стандартов, 1989, 240 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА, КАК ДАТЧИКА СИСТЕМЫ РАДИОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ

ВВЕДЕНИЕ

Разновидностью колебательных систем СВЧ диапазона являются открытые резонаторы, объем которых на большом протяжении не ограничен металлическими поверхностями. Поэтому потери в открытом резонаторе определяются лишь поглощением в зеркалах, а также частичным излучением за счет дифракции волн через открытые боковые поверхности. За счет этого открытые резонаторы имеют преимущество перед обычными полыми резонаторами в миллиметровом диапазоне длин волн.

В данной работе исследуется конфокальный открытый резонатор с вогнутыми сферическими зеркалами.

Работа рассчитана на 2 часа.

1. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- 1.1. Панорамный измеритель КСВН Р2-65.
- 1.2. Набор соединительных элементов.
- 1.3. Открытый резонатор.
- 1.4. Пробное тело.

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 2.1. Ознакомиться с основными свойствами и характеристиками открытого СВЧ резонатора.
- 2.2. Изучить спектр резонансных частот открытого резонатора, структуры поля в нем.
- 2.3. Научиться определять индексы наблюдаемых резонансных колебаний.

3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

- 3.1. Изучить виды колебаний открытого резонатора.
- 3.2. Включить резонатор в тракт прибора Р2-65 «на проход» по схеме измерения ослабления и получить на экране индикатора спектр частот резонатора в полосе $25.8 \div 29.5$ ГГц).
- 3.3. Определить индексы наблюдаемых колебаний.
- 3.4. Определить размер «пятна» поля на зеркале.

- 3.5. Измерить добротность резонатора для основного (низшего) типа колебаний.

4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Изучить основные характеристики и принцип действия открытого резонатора (ОР). Рассмотреть основные виды колебаний и структуру поля в резонаторе.

Уяснить физические основы удержания электромагнитного поля в ОР.

5. ТЕОРИЯ

5.1. *Открытый резонатор* представляет собой некоторый объем, ограниченный торцевыми проводящими поверхностями – зеркалами.

С продвижением в миллиметровую и субмиллиметровую части СВЧ диапазона применение резонаторов объемного типа встречает затруднение, поскольку с уменьшением длины волны приходится уменьшать объем резонатора, при этом его добротность падает. Если же сохранить большой объем резонаторной полости, то спектр собственных колебаний резонатора получается настолько «густым», что разность между резонансными частотами отдельных видов колебаний оказывается меньше ширины их резонансных кривых, и выделить какой-либо вид колебаний становится невозможным. Данное противоречие снимается при использовании открытых резонаторов.

Их объем не ограничен замкнутой поверхностью и имеет связь со свободным пространством. Из-за этой связи только немногие виды колебаний оказываются добротными, спектр резонансных частот такого резонатора достаточно разрежен.

В открытых резонаторах используются плоские и сферические зеркала. На рис.1 представлен открытый резонатор с плоскими зеркалами Z_1 и Z_2 , между которыми многократно отражается волна типа TEM. Условием резонанса в подобной системе является целое число полу-волн, укладывающихся по длине ℓ :

$$\ell = \rho \frac{\lambda}{2}, \quad \rho = 1, 2, 3, \dots$$

В открытых резонаторах, образованных параллельными плоскими зеркалами (отражателями), поле занимает всю поверхность зеркал и подходит к их краям. Неоднородностью, удерживающей поле в резонаторе, являются края зеркал. Дифракция на краях для большей части спектра частот рассеивает поле из резонатора в окружающее простран-

ство, кроме некоторых частот, для которых наблюдается заметное отражение обратно к центрам зеркал. Последнее позволяет на этих частотах возбуждать и поддерживать в пространстве между плоскопараллельными отражателями добротные резонансные колебания. В таких резонаторах потери на дифракцию на краях зеркал велики. Очень критичны такие резонаторы и к малым перекосам зеркал.

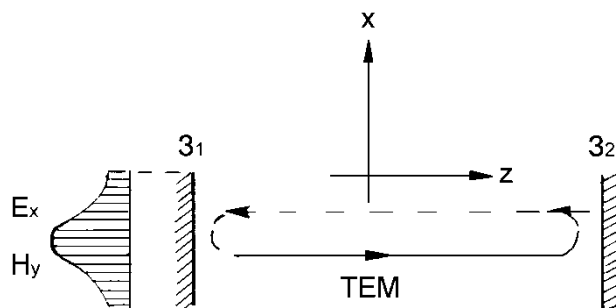


Рис. 1.

В случае, когда резонатор образован вогнутыми зеркалами (конфокальный резонатор) (рис.2), их фокусирующее действие приводит к тому, что колебания «сжимаются» к продольной оси резонатора, локализуясь как бы внутри некоторой гипотетической гиперболической поверхности (так называемой каустики). В таких резонаторах дифракционные потери, как правило, очень малы, колебания добротны и менее чувствительны к перекосам.

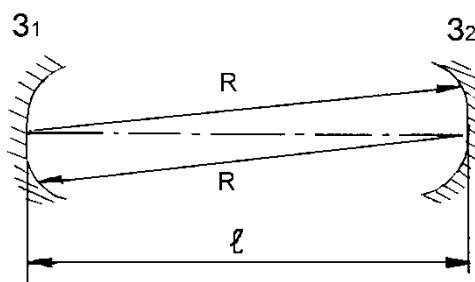


Рис. 2.

Для использования ОР в различных качествах в устройствах РВК необходимо знать спектр его резонансных частот, добротность различных видов колебаний, распределение поля в пространстве между зеркалами. При этом зеркала могут быть с прямоугольной или круглой апертурой.

5.2. Виды колебаний открытого резонатора.

Поле между зеркалами, в зависимости от того, под каким углом к продольной оси резонатора проходит квазиоптический пучок может принимать различные устойчивые конфигурации.

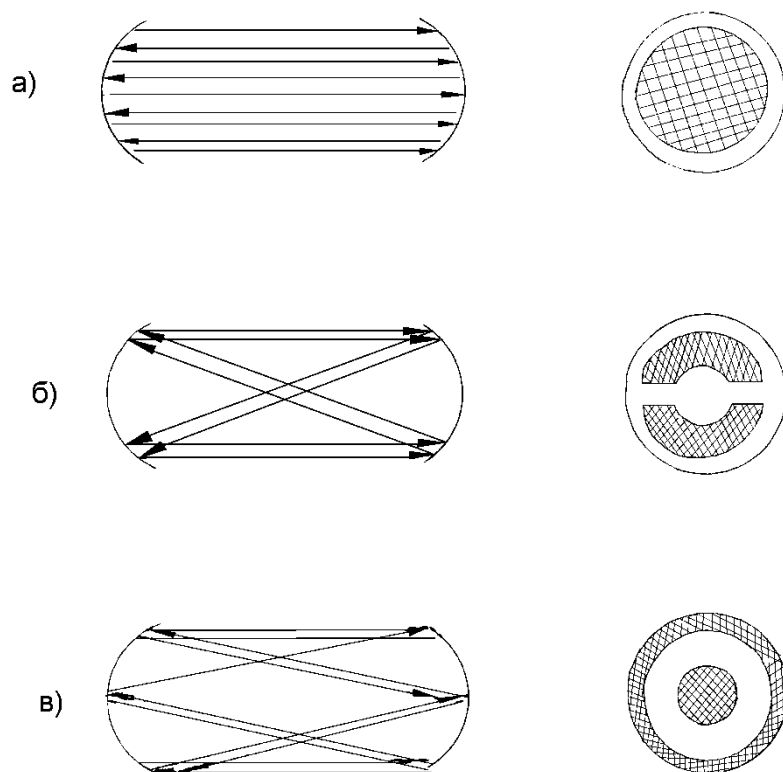


Рис. 3.

На рис.3а волна распространяется вдоль оси резонатора. «Пятна» поля на зеркалах однородны и не имеют теневых областей. Это низший или основной вид колебаний резонатора.

На рис.3б волна распространяется между зеркалами таким образом, что в центре зеркал образуются теневые области, волна проходит под большим углом к оси резонатора, а «пятна» поля занимают большую площадь на зеркалах.

На рис.3в волна движется по еще более сложной «траектории». Такие ситуации возникают в резонаторах с вогнутыми зеркалами прямоугольной формы.

В резонаторах с круглыми зеркалами сферической формы волна распространяется по трубчатым «траекториям». Поверхность, ограничивающая поле в пространстве между зеркалами, имеет вид гиперболоида вращения. Пересечение этой поверхности с зеркалами образует различную конфигурацию «пятен» для разных видов колебаний. Радиус, «пятна» поля на зеркалах одинакового размера определяется:

$$w = \sqrt{\frac{\lambda R}{\pi}} \left(\frac{2R}{\ell} - 1 \right)^{-1/4},$$

где ℓ - расстояние между зеркалами; $R = R_1 = R_2$ - радиус кривизны зеркал; λ - длина СВЧ волны.

Поле открытого резонатора вдоль продольной оси представляет собой стоячую волну и описывается аналогично квазиплоской волне, а в поперечном направлении, для основного (низшего) вида колебаний - максимально у оси резонатора и медленно убывает по закону:

$$E(z, r) = E_{\max}(z) \exp \left[- \left(\frac{r}{w} \right)^2 \right],$$

где w - радиус «пятна» поля основного вида колебаний.

Виды колебаний, имеющие одинаковую картину поля на зеркалах, отличающиеся продольным индексом q (числом полуволн по оси z), называются аксиальными модами, а колебания, отличающиеся числами m и n поперечных составляющих (вариаций) поля называются поперечными модами резонатора. Виды колебаний принято обозначать TEM_{mnq} , где m и n - поперечные составляющие поля, а q - число полуволн, укладываемых по длине резонатора.

На рис.4 показаны поперечные распределения электрического поля волн TEM_{mnq} для четырех простейших угловых мод резонатора с круглыми зеркалами, где m - число вариаций по углу φ , n - число вариаций по радиусу.

Режим, при котором в резонаторе возбуждаются только виды колебаний, отличающиеся по q , называют «одномодовым», а если в этом режиме удастся в заданной полосе частот существенно снизить добротность всех аксиальных мод, кроме q -го, то говорят об одночастотном режиме открытого резонатора в этой полосе. Для измерений параметров материалов чаще всего используется основной вид колебаний TEM_{00q} , поскольку он характеризуется более высокой концентрацией поля вдоль оси резонатора и соответственно меньшими потерями на краях зеркал. Волна данного типа имеет один максимум эпюры поля в поперечном сечении. Чем больше длина открытого резонатора при пропорциональном увеличении диаметра зеркал, тем выше добротность Q , но тем меньше разделение соседних видов колебаний, различающихся номером q . При $q \gg 1$, то разность частот соседних видов (межвидовой интервал) постоянна и равна:

$$\Delta f = \frac{c}{2\ell}.$$

Этот интервал соответствует увеличению на 1 индекса q .

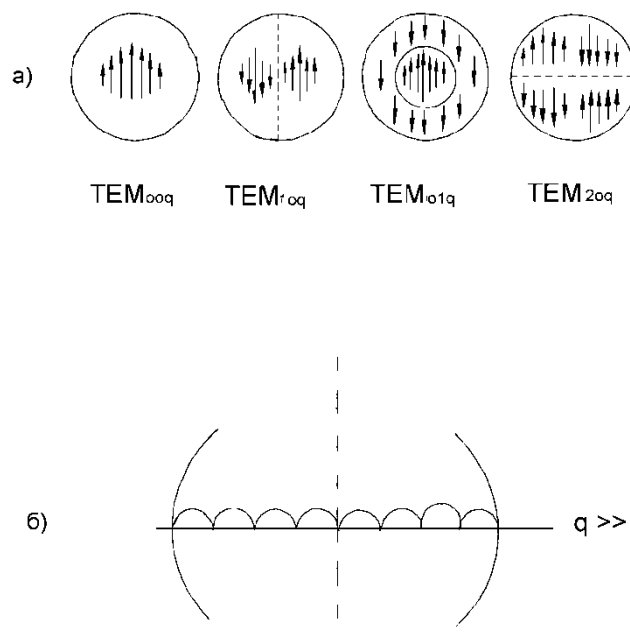


Рис.4.

5.3. Спектр колебаний открытого резонатора.

При распространении строго плоской волны условие резонанса будет:

$$f_{рез} = \frac{c}{2\ell} \cdot q, \text{ где } c - \text{ скорость света.}$$

Из этого следует, что межвидовой частотный интервал между двумя соседними резонансными кривыми, которые отличаются только значением продольного индекса q , составляет

$$\Delta f = |f_{mq+1} - f_{mq}| = \frac{c}{2\ell}.$$

Спектр резонансных колебаний ОР представлен на рис.5. Он представляет собой повторяющийся с интервалом $\Delta f = c/2\ell$ (этот интервал соответствует увеличению на 1 индекса q) набор поперечных видов колебаний. Добротности их с увеличением m и n снижаются из-за возрастания дифракционных потерь на краях зеркал.

Следует обратить внимание на возможность так называемого вырождения видов колебаний открытого резонатора – совпадения резонансных частот колебаний различных видов. Снятие вырождения производится незначительным изменением геометрии резонатора (расстоя-

ния между зеркалами, небольшим их наклоном), обычно приводящим к расщеплению резонансных кривых.

Вырождение может возникнуть и при размещении в резонаторе исследуемого образца, поскольку смещение резонансных частот образцом неодинаково. Более того, если в резонаторе не были приняты меры по подавлению поперечных видов колебаний, возможна такая ситуация, когда при внесении образца добротность основного вида колебаний снижается сильнее, нежели для поперечных видов, и, в результате, выделить рабочую резонансную кривую на фоне остальных резонаторов невозможно. Иногда, наоборот, внесение возмущающего тела приводит к снятию вырождения и расщеплению резонаторных кривых.

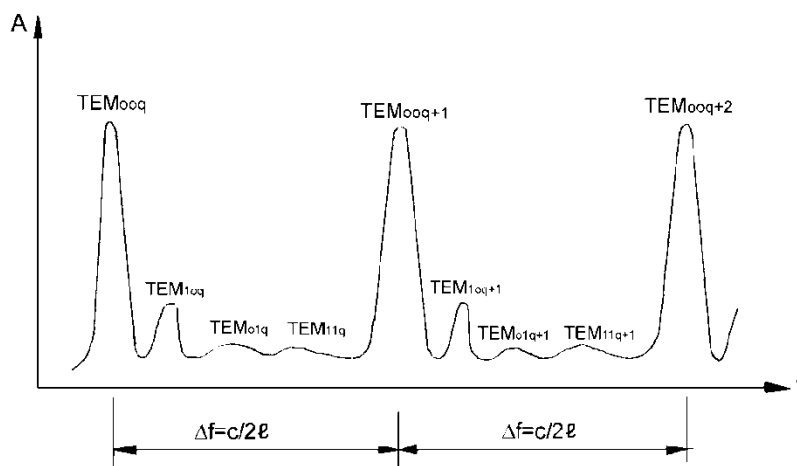


Рис.5.

На практике идентификация резонансов ОР производится с помощью пробного тела, позволяющего также обнаружить и наличие вырожденных видов колебаний.

Добротность открытого резонатора зависит от энергетических потерь за один круговой проход:

$$Q = \frac{2k\ell}{\sum_i \eta_i},$$

где η_i - коэффициенты потерь за один проход, связанные с тем или иным явлением (дифракцией на краях зеркал, выводом энергии через элементы связи в волновод, поглощение пространством между зеркалами и т.д.)

$$k = 2\pi \frac{f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda};$$

$$\eta = (1 - |\Gamma_1|^2) + (1 - |\Gamma_2|^2).$$

где $|\Gamma_1|$ и $|\Gamma_2|$ - модули коэффициентов отражения от зеркал.

На практике величину добротности оценивают по ширине резонансной кривой $2\Delta f_{mq}$.

$$\frac{1}{Q_{mq}} = \frac{2\Delta f_{mq}}{f_{mq}}.$$

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. В каком диапазоне длин волн применяются открытые резонаторы?
- 6.2. В чем их преимущества перед обычными объемными резонаторами?
- 6.3. Что такое межвидовой интервал?
- 6.4. Основной вид колебаний в открытом резонаторе?
- 6.5. За счет каких явлений удерживается электромагнитное поле в пространстве между зеркалами?
- 6.6. Что определяет продольный индекс колебаний q ?
- 6.7. Как можно практически определить продольный индекс колебаний q ?
- 6.8. Что такое «каустика»?
- 6.9. Условие резонанса в открытом резонаторе.
- 6.10. Как на практике определяют добротность резонатора?
- 6.11. Возможные применения открытых резонаторов в неразрушающем контроле?

7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- 7.1. Подготовить к работе панорамный измеритель КСВН Р2-65.
- 7.2. Включить открытый резонатор в тракт прибора Р2-65 «на проход» по схеме измерения ослабления.
- 7.3. Получить на экране индикатора прибора Р2-65 изображение спектра резонансных частот открытого резонатора в полосе частот $25,8 \div 29,5$ ГГц;
- 7.4. Выделить основной вид колебаний и определите (измерьте) его резонансные частоты;
- 7.5. Рассчитать величину межвидового интервала $c / 2\ell$ и сравнить его значение с измеренным на экране индикатора с использованием частотной метки $c = 3 \times 10^{10}$ см / с; $\ell = 15,5$ см. (Расстояние между зеркалами измерить с помощью линейки);

- 7.6. Определить индексы q наблюдаемых видов колебаний через значение резонансной частоты по формуле

$$f_{рез} = \frac{c}{2\ell} \cdot q;$$

- 7.7. С помощью пробного тела (отрезок проволоки) определить продольный индекс колебаний q (с учетом четного и нечетного), протягивая пробное тело по оси ОР. Пробное тело в виде отрезка проволоки располагается параллельно вектору электрического поля резонатора. Количество полуволн поля или значение индекса q определяется по рассеивающему действию (возмущению) пробного тела. При этом для четного q в центре резонатора должен наблюдаться узел, а для нечетного q – пучность электрической компоненты поля. Сравните результаты эксперимента с расчетными.
- 7.8. Перемещая пробное тело вдоль вертикальной оси одного из зеркал определите размер «пятна» поля на зеркале. Сравните результат с расчетным.
- 7.9. Получите резонансную кривую основного типа колебаний и по ее ширине и резонансной частоте рассчитайте значение нагруженной добротности открытого резонатора.
- 7.10. По результатам работы составить отчет, который должен содержать:
1. Название работы;
 2. Цель работы;
 3. Программу работы;
 4. Результаты экспериментов и расчетов в виде таблиц, графиков;
 5. Выводы по работе.

Список литературы

1. Лебедев Н.В. Техника и приборы СВЧ. Под ред. академика Н.Д.Девяткова, М.: «Высшая школа», 1970, 440 с.
2. А.С.Завьялов, Г.Е.Дунаевский Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах / Томск, Изд-во Томского университета, 1985.
3. А.Н.Зайцев, П.А.Иващенко, А.В.Мыльников Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение, М.: Изд. стандартов, 1989, 240 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ОТКРЫТОГО СВЧ РЕЗОНАТОРА

ВВЕДЕНИЕ

Открытые СВЧ резонаторы нашли применение в неразрушающем контроле (НК) в качестве датчиков РВК. При этом их преимуществом перед объемными полыми резонаторами является возможность встраивания в технологический процесс без его нарушения.

В данной работе используется конфокальный открытый резонатор с круглыми вогнутыми зеркалами.

Работа рассчитана на 2 часа.

1. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- 1.1. Панорамный измеритель КСВН и ослабления Р2-65.
- 1.2. Открытый резонатор.
- 1.3. Пробное тело.
- 1.4. Образцы диэлектрических материалов.
- 1.5. Набор соединительных элементов.

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 2.1. Ознакомиться с резонаторным методом измерения параметров диэлектрических материалов.
- 2.2. Научиться практически измерять диэлектрическую проницаемость и толщину материала радиоволновым методом.

3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

- 3.1. Включить открытый резонатор в тракт прибора Р2-65 «на проход» и получить на индикаторе изображение спектра резонансных частот резонатора в диапазоне частот $26,5 \div 29,5$ ГГц.
- 3.2. Определить относительную диэлектрическую проницаемость ε диэлектрика (фторопласта), располагая значением его толщины и величиной сдвига резонансной частоты открытого резонатора с диэлектриком.
- 3.3. Сравнить полученное значение ε с табличным и оценить погрешность измерений.

- 3.4. По заданному преподавателем значению относительной диэлектрической проницаемости определить толщину контрольного образца диэлектрика.

4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

- 4.1. Изучить методы и средства измерения основных параметров открытых резонаторов (ОР);
4.2. Уяснить связь электродинамических параметров ОР с электрофизическими характеристиками материалов на СВЧ.

5. ТЕОРИЯ

При размещении в ОР образца из диэлектрического материала изменяются его резонансная частота f_p и добротность Q . По результатам измерения этих параметров пустого и заполненного диэлектриком резонатора можно определить диэлектрическую проницаемость ε и $tg\delta$ материала

$$\varepsilon = \left(\frac{\omega_0}{\omega_\varepsilon} \right)^2 = \left(\frac{f_p^0}{f_p^\varepsilon} \right)^2 ;$$
$$tg\delta = \frac{1}{Q_n^\varepsilon} - \frac{1}{Q_n^0}$$

здесь f_p^0 - значение резонансной частоты пустого резонатора;

f_p^ε - значение резонансной частоты резонатора с диэлектриком.

Соответственно

Q_n^0 и Q_n^ε - добротности пустого и заполненного диэлектриком резонаторов.

На практике величину добротности чаще всего оценивают по ширине резонансной кривой

$$\frac{1}{Q_n} = \frac{2\Delta f_p}{f_p},$$

где Δf_p - полуширина резонансной кривой на уровне 0,707 ее максимального значения.

Для резонатора с диэлектриком

$$Q_n = \frac{f_p^\varepsilon}{2\Delta f_p^0 + 2\Delta f_p^\varepsilon}.$$

Сдвиг резонансной частоты для случая ортогональной поляризации

$$\Delta f_{\perp} = f_{\perp} - f_p^0 = -\frac{F_0 d}{\lambda_0} \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \cdot \frac{[(\varepsilon - 1) \cos^2 \phi + 1]}{\cos \phi}.$$

Для случая параллельной поляризации

$$\Delta f_{\parallel} = f_{\parallel} - f_p^0 = \frac{F_0 d}{\lambda} \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\cos \phi},$$

где F_0 - межвидовой интервал ($F_0 = 2c/\ell$);

ϕ – угол падения волны на лист диэлектрика;

d – толщина листа диэлектрика.

Исходя из полученных выражений, можно получить расчетные формулы для определения диэлектрической проницаемости:

Для параллельной поляризации - $\varepsilon = 1 + \frac{\Delta f_{\parallel} \lambda_0 \cos \phi}{F_0 d}$;

Для ортогональной поляризации - $\varepsilon = \frac{1}{2} \left[A + \sqrt{A^2 + 4tg^2 \phi} \right]$,

$$\text{где } A = 1 - \frac{\Delta f_{\perp} \lambda_0 \sqrt{1 + tg^2 \phi}}{F_0 d} - tg^2 \phi.$$

Из вышеприведенных формул видно, что сдвиг резонансной частоты прямо пропорционален толщине листа диэлектрика. Благодаря этому становится возможным контроль толщины диэлектрических изделий. Толщина изделий определяется как:

$$d = \frac{\lambda_0 \cos \phi}{F_0 (\varepsilon - 1)} \Delta f_p^{\varepsilon}.$$

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Основные электрофизические параметры диэлектрических материалов?
- 6.2. Основной вид колебаний в открытом резонаторе?
- 6.3. Дайте определение собственной, нагруженной, внешней добротностям.
- 6.4. Чем определяется величина собственной добротности Q_0 ?
- 6.5. Как классифицируются материалы исходя из их электрической проводимости?
- 6.6. Какой диэлектрик называется идеальным?
- 6.7. Какова величина $tg \delta$ идеального диэлектрика?
- 6.8. Как на практике измеряют добротность резонаторов?

7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- 7.1. Подготовить к работе панорамный измеритель КСВН Р2-65.
- 7.2. Включить открытый резонатор в тракт прибора Р2-65 «на проход» по схеме измерения ослабления.
- 7.3. Получить на экране индикатора прибора Р2-65 изображение спектра резонансных частот открытого резонатора в полосе частот $25,8 \div 29,5$ ГГц;
- 7.4. Выделить основной вид колебаний и определить его резонансную частоту f_p^0 и межвидовой интервал $F_0 = c/2\ell$;
- 7.5. Разместите между зеркалами резонатора лист диэлектрика таким образом, чтобы его плоскость была расположена под углом 45° к продольной оси резонатора;
- 7.6. С помощью частотной метки внутреннего частотомера прибора Р2-65 измерьте резонансную частоту f_p^ε резонатора с диэлектриком.
- 7.7. Определите сдвиг резонансной частоты после внесения в резонатор диэлектрика $\Delta f_p^\varepsilon = f_p^\varepsilon - f_p^0$, ГГц.
- 7.8. Измерьте штангенциркулем толщину листа диэлектрика d .
- 7.9. Определите тип поляризации волны $ТЕМ_{mnq}$, возбуждающей колебания в резонаторе (параллельная или ортогональная).
- 7.10. Для данного типа поляризации выберите необходимую формулу и рассчитайте относительную диэлектрическую проницаемость образца материала;
- 7.11. Сравните полученное значение ε с табличным, оцените погрешность.
- 7.12. По табличному значению ε и экспериментально измеренному частотному сдвигу резонансной частоты Δf_p^ε резонатора с диэлектриком определите толщину диэлектрической пластины с использованием соответствующей формулы. Сравните результат расчета с результатом измерений.
- 7.13. По результатам работы составить отчет, который должен содержать:
 1. Название работы;
 2. Цель работы;
 3. Программу работы;
 4. Результаты экспериментов и расчетов в виде таблиц, графиков;

5. Выводы по работе.

Список литературы

1. Лебедев Н.В. Техника и приборы СВЧ. Под ред. академика Н.Д.Девяткова, М.: «Высшая школа», 1970, 440 с.
2. А.С.Завьялов, Г.Е.Дунаевский Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах / Томск, Изд-во Томского университета, 1985.
3. А.Н.Зайцев, П.А.Иващенко, А.В.Мыльников Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение, М.: Изд. стандартов, 1989, 240 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ГИДРАТНЫХ ПРОБОК В ГАЗОПРОВОДАХ

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации газоконденсатных месторождений существует проблема, связанная с образованиям в газопроводах при определённых давлении и температуре гидратных пробок, которые могут перекрывать сечение трубы. Наряду с пробками в газопроводах могут оказаться и другие инородные объекты. Отсюда возникает задача их обнаружения.

В данной лабораторной работе рассматривается радиоволновый метод обнаружения инородных объектов в газопроводах.

Работа рассчитана на 2 часа.

1. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- 1.1 Генератор Ганна
- 1.2 Циркулятор
- 1.3 Детекторная секция
- 1.4 Скоростной осциллограф
- 1.5 Короткозамыкатель
- 1.6 Волновод – труба
- 1.7 Имитатор неоднородности

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с методами и средствами обнаружения и определения местоположения инородных объектов в газо- и продуктопроводах. Приобретение практических навыков работы при реализации радиоволновых методов контроля.

3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

- 3.1. Уяснить суть метода радио – импульсной рефлектотметрии
- 3.2. Изучить принцип действия и устройство генератора Ганна
- 3.3. Изучить инструкцию к скоростному осциллографу
- 3.4. Собрать схему для реализации метода радиоимпульсной рефлектотметрии

3.5. Разместить в макете газопровода имитатор пробки и оценить расстояние до него, используя данные эксперимента: длину трубы L и время пробега радиоимпульса до пробки и обратно.

3.6. Сделать выводы по работе.

4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Изучить особенности распространения радиоимпульсов в волноводах. Усвоить суть понятия фазовой и групповой скоростей. Уяснить суть эффекта Ганна.

5. ТЕОРИЯ

При реализации метода радиоимпульсной рефлектометрии для обнаружения неоднородностей в волноведущей системе используется время в качестве информативного параметра. Волновод зондируется коротким ($5\div 10$ нс) радиоимпульсом и по времени двойного пробега импульса до неоднородности (при известной скорости V) оценивается место положения неоднородностей в волноводе. Как известно, фазовая скорость электромагнитной волны ТЕМ в свободном пространстве равна скорости света $c=299772\pm 2$ км/с. При рассмотрении вопроса о распространении волны в материале следует учитывать его электрофизические характеристики ε и μ , т.е.

$$V_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}},$$

где ε и μ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости материала.

В волноводе радиоимпульс распространяется с групповой скоростью, которая определяется из соотношения

$$V_{gp} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \sqrt{1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda_{кр}^2 \varepsilon\mu}};$$

где $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны для волновода данного размера.

Применительно к нашей проблеме волноводом является труба, а неоднородностью – гидратная пробка в трубе. Отражение СВЧ импульса от гидратной пробки происходит за счет разницы электрофизических параметров (ε , $\text{tg}\delta$) рабочей среды в газопроводе и гидратной пробки. Газоконденсат представляет собой 3-ех компонентную смесь, состоящую из основной компоненты (газа), жидкого углеводородного конденсата в виде мелкодисперсных капель (аэрозоли) и воды – также в виде мелкодисперсных капель.

Поскольку диэлектрическая проницаемость (ДП) газа мала, например, для метана $\varepsilon = 1.08$ при $P = 10$ МПа, то основной вклад в общую ДП смеси будут вносить ДП конденсата ε_1 и воды ε_2 . При малых относительных объемах водной компоненты значения ДП смеси можно принять равным ДП углеводородной компоненты $\varepsilon_1 = 2.1$.

В качестве имитатора гидратной пробки может быть взят обычный лед. В диапазоне СВЧ ($f = 10$ ГГц) лед характеризуется следующими значениями электрофизических параметров $\varepsilon = 3.17$ и $\text{tg} \delta = \varepsilon''/\varepsilon' = 0.7 \times 10^{-3}$.

При распространении СВЧ-импульса в трубе–волноводе реализуется случай падения электромагнитной волны на границу раздела двух сред с различными электрофизическими параметрами и, следовательно, с различными волновыми сопротивлениями. Доля отраженной при этом энергии характеризуется модулем коэффициента отражения

$$|\Gamma| = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1},$$

где z_1 и z_2 - волновые сопротивления 1-ой и 2-ой сред. Коэффициент отражения от диэлектрика меньше единицы и возрастает с увеличением диэлектрической проницаемости. Для металлических поверхностей коэффициент отражения практически равен единице. Из этого следует, что металлические объекты могут быть обнаружены с большей надежностью.

В данной лабораторной работе в качестве генератора СВЧ колебаний используется диод Ганна. Это полупроводниковый диод с отрицательным динамическим сопротивлением, возникающим под действием сильного электрического поля.

В основе действия генераторов данного типа лежит эффект междолинного переноса электронов, впервые обнаруженный английским ученым Дж. Ганном, который установил, что под действием достаточно сильного электрического поля в однородных образцах GaAs возникает пульсирующий электрический ток. При включении диода Ганна в колебательный контур возникает СВЧ напряжение, развиваемое на колебательном контуре из-за доменной неустойчивости в диоде.

Рабочий диапазон частот генераторов Ганна $10 \div 120$ ГГц, мощность в непрерывном режиме ~ 200 мВт.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. В чем состоит суть метода радиоимпульсной рефлектометрии?
- 6.2. Дайте объяснение разнице фазовой и групповой скоростей?
- 6.3. С какой скоростью распространяется радиоимпульс в волноводе?
- 6.4. Чем отличаются волноводные типы волн от волны TEM в свободном пространстве?
- 6.5. От чего зависит отражательная способность материалов в СВЧ диапазоне?
- 6.6. Суть эффекта Ганна.
- 6.7. Какие материалы используются для диодов Ганна?
- 6.8. Какие объекты обнаруживаются с использованием метода радиоимпульсной рефлектометрии?
- 6.9. Основные электрофизические характеристики материалов на СВЧ.

7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- 7.1. Ознакомиться с органами управления и работой скоростного осциллографа.
- 7.2. Подготовить к работе генератор Ганна в импульсном режиме.
- 7.3. Собрать измерительную схему согласно рис. 1.

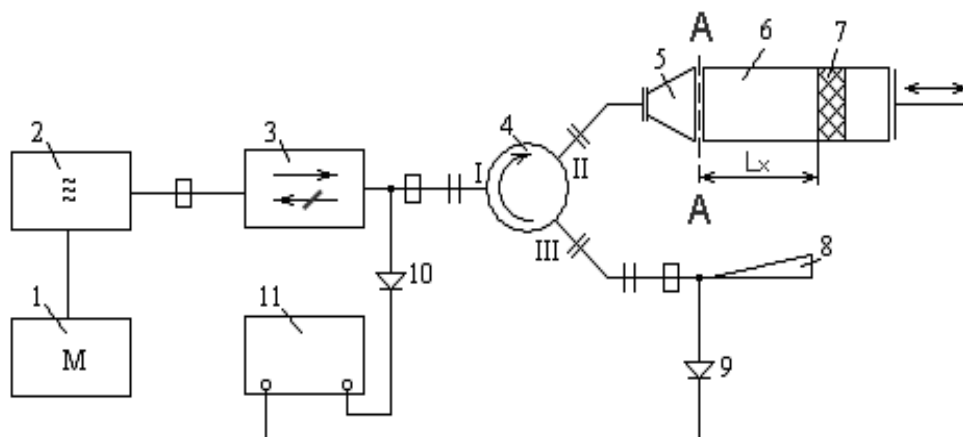


Рис.1. Измерительная схема

1 – модулятор; 2 – генератор; 3 – ферритовый вентиль; 4 – циркулятор;
5 – трансформатор типа волны; 6 – труба; 7 – пробка; 8 – согласованная нагрузка;
9, 10 – детектор; 11 – осциллограф.

7.4. Измерить скорость распространения радиоимпульса по трубе. Для этого выполнить следующие операции:

- разместить в сечении А-А трубы металлический отражатель;
- включить осциллограф;
- включить модулятор генератора Ганна;
- зафиксировать на экране осциллографа импульс, отраженный от отражателя, соответствующей временной “точке” отсчета t_1 ;
- перенести отражатель на конец трубы;
- зафиксировать на экране осциллографа отраженный импульс, соответствующий конечному моменту времени t_2 ;
- измерить рулеткой длину трубы;
- используя результаты измерения длины трубы L_x и интервала времени $\Delta t = (t_2 - t_1)$ оценить скорость распространения радиоимпульса по формуле

$$V = \frac{2L_x}{\Delta t}, \text{ м/нс.}$$

7.5. Определение местоположения имитатора гидратной пробки в трубе.

- разместить имитатор гидратной пробки в трубе на произвольном расстоянии от начала трубы;
- получить на экране осциллографа изображение огибающей отраженного импульса;
- по устройству измерения временных интервалов (встроен в осциллограф) определить временной интервал между опорным и отраженным импульсами

$$\Delta t = (t_2 - t_1), \text{ нс.}$$

- зная скорость распространения радиоимпульса и время его двойного пробега до имитатора определить расстояние до имитатора по формуле:

$$L_x = \frac{\Delta t \times V}{2}, \text{ м.}$$

- результаты занести в таблицу.

7.6. По результатам работы составить отчет, который должен содержать:

1. Название работы;

2. Цель работы;
3. Программу работы;
4. Результаты экспериментов и расчеты в виде таблиц (графиков);
5. Выводы по работе.

Список литературы

1. А.Н. Зайцев, П. А. Иващенко, А. А. Мыльников Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение // М., изд. Стандартов, 1989, 240 с.
2. М.С.Гусятинер, А.И.Горбачев Полупроводниковые СВЧ-диоды // М. Радио и связь, 1983, 224 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

РАДИОВОЛНОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ ГАЗО- И ПРОДУКТОПРОВОДОВ

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика технического состояния газопроводов, включающая такие направления как контроль качества сварных швов, выявление коррозионных повреждений содержит и такую важную составляющую, как обнаружение зародившихся и развивающихся сквозных дефектов (трещин), приводящих к утечке продукта и крупным катастрофам.

В данной лабораторной работе рассматривается радиоволновой метод обнаружения сквозных дефектов газо- и продуктопроводов, основанный на регистрации излученной через дефект СВЧ волны, распространяющейся в трубе, как в волноводе.

Работа рассчитана на 2 часа.

1. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- 1.1. Лабораторный макет радиоволнового дефектоскопа.
- 1.2. Труба-имитатор газопровода.

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Приобретение практических навыков по применению радиоволновых средств для решения задач дефектоскопии трубопроводов. Закрепление теоретических знаний по структуре и распространению электромагнитных волн СВЧ в волноводе.

3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

- 3.1. Уяснить процесс распространения электромагнитных волн в волноводе.
- 3.2. Изучить структуру поля ТЕ-волн в круглом волноводе.
- 3.3. Ознакомиться с принципом действия и устройством лабораторного макета радиоволнового дефектоскопа.
- 3.4. Произвести обнаружение дефекта в процессе сканирования имитатора трубопровода.
- 3.5. Определить местоположение дефекта (расстояние от начала трубопровода), используя в качестве информативного парамет-

ра время распространения электромагнитного СВЧ сигнала от начала трубы до дефекта.

4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Уяснить понятие волновода, как основной линии передачи на СВЧ. Изучить типы волн, распространяющихся в волноводах прямоугольного и круглого сечений. Изучить параметры, характеризующие процесс распространения волн по волноводу. Ознакомиться с принципом действия генератора на диоде Ганна (ДГ).

5. ТЕОРИЯ

Одним из способов контроля герметичности газопроводов, наряду с акустоэмиссионным, является анализ микроконцентраций природного газа (CH_4) в надпочвенном слое воздуха при перемещении газоанализатора вдоль трассы газопровода, что бывает затруднительно особенно в тяжелых почвенно-климатических условиях Западной Сибири и Крайнего Севера. В основе этого метода лежит измерение поглощения метаном лазерного излучения при длине волны $\lambda = 3.39$ мкм [1].

Перспективным для поставленной цели является способ обнаружения сквозных дефектов в газопроводах на основе взаимодействия электромагнитной волны СВЧ диапазона с контролируемым объектом [2]. Согласно данному способу СВЧ энергия в виде волны определенного типа подается и распространяется по трубопроводу-волноводу, а затем часть её излучается через сквозной дефект в свободное пространство. Этот излученный сигнал и является полезным, который необходимо зарегистрировать (обнаружить) и по нему определить местоположение дефекта.

Одним из примеров использования данного метода является обеспечение непрерывного контроля за состоянием конкретного протяженного участка газопровода (продуктопровода), особенно вблизи населенных пунктов, железных и шоссейных дорог, промышленных и других объектов.

Максимальная дальность обнаружения дефектов будет определяться мощностью генератора СВЧ, чувствительностью приемника, характеристиками приемной антенны, ослаблением СВЧ сигнала в трубопроводе-волноводе, в грунте и на дефекте. При этом важен выбор типа волн в волноводе в отношении её затухания по мере распространения. Тип и рабочую длину волны λ выбирают с учетом приемлемого для практики затухания и стабильности структуры поля волны в трубопроводе диа-

метром D . С учетом диаметра трубы рабочую длину волны выбирают из соотношения

$$1.31D < \lambda < 1.71D.$$

При соблюдении этого условия в волноводе будет существовать только основная (низшего типа) волна H_{11} ($\lambda_{кр} = 1.64R$) и передаваемая энергия не будет перераспределяться на другие типы, менее благоприятные по условию их распространения в волноводе-трубопроводе. Волна типа H_{11} имеет структуру, сходную со структурой поля H_{10} в прямоугольном волноводе.

Особый интерес, когда необходимо малое затухание, представляет волна типа H_{01} , для которой токи в стенках протекают по окружностям и не имеют продольной составляющей. Ограничением для её использования является равенство критических частот волн типов H_{01} и E_{11} , приводящее к трансформации волны H_{01} на неоднородностях волновода и его изгибах. Структура полей волн типа H_{11} и H_{01} в поперечном сечении круглого волновода представлена на рис. 1.

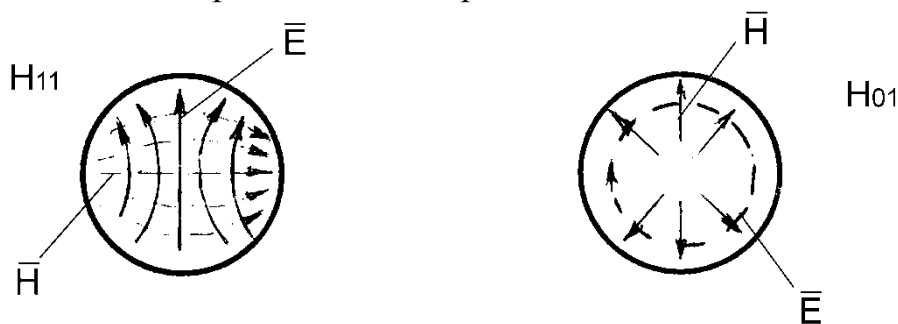


Рис. 1.

6. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА РАДИОВОЛНОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА

Структурная схема лабораторного макета радиоволнового дефектоскопа представлена на рис. 2. В состав макета входят: 1 – модулятор; 2 – СВЧ генератор; 3 – вентиль; 4 – циркулятор; 5 – трансформатор типа волны; 6 – имитатор газопровода; 7 – согласованная нагрузка; 8 – скоростной осциллограф; 9 – приемная антенна; 10 – СВЧ детектор; 11 – усилитель; 12 – короткозамыкатель.

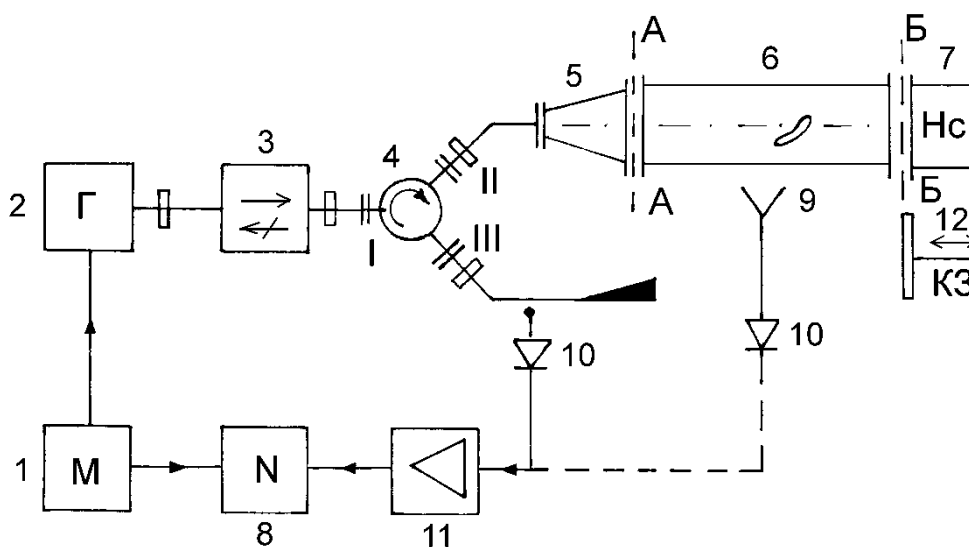


Рис.2.

В макете в качестве передатчика использован компактный генератор 2 на основе диода Ганна с рабочей частотой $f = 10$ ГГц, а в качестве приемника – СВЧ детектор 10. Индикатором служит скоростной осциллограф 8 со встроенным измерителем наносекундных временных интервалов.

Устройство работает следующим образом. Сформированный генератором 2 зондирующий СВЧ импульс длительностью ≈ 10 нс через вентиль 3 и трансформатор типа волны 5 подается в трубу-имитатор газопровода 6 диаметром 76 мм и длиной 1500 мм. Поскольку СВЧ генератор выполнен на базе прямоугольного волновода сечением 23×10 мм, работающем на волне H_{10} типа, для перехода к круглому волноводу применен трансформатор типа волны, преобразующий волну H_{10} прямоугольного волновода в волну H_{11} круглого волновода. Для обеспечения режима бегущей волны труба-имитатор нагружена на согласованную нагрузку 7. Одновременно с подачей зондирующего СВЧ импульса в трубу импульс модулятора 1 запускает горизонтальную развертку скоростного осциллографа 8.

Излученный сквозным дефектом трубы сигнал принимается антенной 9, детектируется, усиливается и отображается на экране осциллографа. По временной задержке излученного импульса относительно зондирующего при известной скорости распространения СВЧ импульса по трубе определяется местоположение дефекта. При этом измерение времени прохождения СВЧ импульса по трубе осуществляется с помощью измерителя наносекундных временных интервалов, встроенного в осциллограф.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 7.1. Основной (низший) тип волны в круглом волноводе?
- 7.2. В чем состоит особенность волны типа H_{01} в круглом волноводе?
- 7.3. Какова структура поля волны H_{11} в круглом волноводе?
- 7.4. Каким образом ориентация дефекта (щели) в трубе влияет на интенсивность излученного СВЧ сигнала?
- 7.5. Что является информативным параметром в данном способе обнаружения сквозных дефектов?
- 7.6. От чего зависит дальность действия данного метода контроля?
- 7.7. Чем определяется ошибка указания местоположения дефекта при сканировании трубы?

8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- 8.1. Подготовка макета радиоволнового дефектоскопа к работе.
 - Подстыкуйте имитатор газопровода входом к выходу СВЧ генератора;
 - Включите осциллограф тумблером «Сеть» и прогрейте его в течение 3-х минут;
 - Переведите переключатель режимов развести осциллографа в положение «Ждущая»;
 - Включите модулятор СВЧ генератора на диоде Ганна;
 - Получите линию горизонтальной развертки на экране осциллографа;
 - Убедитесь в нормальной работе СВЧ генератора по наличию зондирующего импульса на его выходе;
 - С помощью детекторной головки и осциллографа проконтролируйте форму огибающей зондирующего СВЧ импульса;
 - Выключите модулятор СВЧ генератора на диоде Ганна.
- 8.2. Измерение скорости распространения радиоимпульса по трубе-имитаторе газопровода.
 - Разместите в сечении А-А трубы металлический отражатель;
 - Включите модулятор СВЧ генератора на диоде Ганна;
 - С помощью метки измерителя временных интервалов (встроен в осциллограф) зафиксируйте на экране осциллографа местопо-

ложение импульса отражённого от отражателя, соответствующее начальной «временной» точке отсчета t_1 ;

- Перенесите отражатель на конец трубы;
- Зафиксируйте на экране осциллографа отраженный импульс, соответствующий конечному моменту времени t_2 ;
- С использованием измерителя временных интервалов измерьте по экрану осциллографа интервал времени $\Delta t = (t_2 - t_1)$, соответствующий двойному пробегу радиоимпульса по трубе;
- Измерьте рулеткой длину трубы ℓ_{mp} ;
- Определите скорость распространения радиоимпульса по формуле

$$v = \frac{2\ell_{mp}}{\Delta t}, \text{ м/нс.}$$

8.3. Обнаружение дефекта и определение его местонахождения.

- Подключите к выходному концу трубы согласованную нагрузку вместо отражателя;
- Нагрузите плечо Ш циркулятора на согласованную нагрузку;
- Подстыкуйте детекторную секцию 5 к выходу призматической рупорной антенны;
- Включите электрический привод каретки перемещения приемной антенны вдоль трубы;
- Прекратите сканирование трубы при появлении на экране осциллографа импульса, излученного через дефект, отключив привод каретки;
- С использованием измерителя временных интервалов оцените временную задержку t_δ импульса от дефекта относительно зондирующего.
- Определите расстояние от начала трубы до дефекта по формуле

$$S_\delta = v \cdot t_\delta,$$

где v - скорость распространения радиоимпульса по трубе.

8.4. По результатам работы составить отчет, который должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Программу работы;
4. Результаты экспериментов и расчетов в виде формул и таблиц;
5. Выводы по работе.

Список литературы

1. Технические средства диагностирования. Справочник / В.В.Клюев, П.П.Пархоменко, В.Е.Абрамчук и др.: Под общ.ред. В.В.Клюева. –М.Машиностроение. 1989. -672 с.
2. А.П.Арзин, В.Л.Щуков, С.Ю.Левин, В.П.Шиян, Ю.Т.Штейн Способ обнаружения сквозных дефектов в трубопроводах, Патент РФ № 202046, Оpubл. 1994.
3. В.П.Шиян Радиоволновая дефектоскопия газо- и продуктопроводов // Труды XII международной научно-практической конференции «Качество - стратегия XXI века», 6-7 декабря 2007 г., г.Томск, Научно-практический журнал «Репутация и качество», № 9/2007, с.72.
4. М.С.Гусятинер, А.И.Горбачев Полупроводниковые СВЧ-диоды // М.:Радио и Связь, 1983, 224 с.
5. А.Н.Зайцев, П.А.Иващенко, А.В.Мыльников Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение, М.: Изд. стандартов, 1989, 240 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ РАДИОВОЛНОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА

ВВЕДЕНИЕ

В практике радиоволнового контроля (РВК) широко применяются рупорные антенны. Основными параметрами антенны являются: коэффициент направленного действия D , коэффициент усиления G , эффективная площадь $S_{\text{эфф.}}$, ширина диаграммы направленности 2θ .

В данной лабораторной работе рассматриваются методы и средства измерения коэффициента усиления, коэффициента направленного действия рупорной антенны. Приведены практически примеры применения антенны для определения плотности потока СВЧ мощности и напряженности электромагнитного поля.

Работа рассчитана на 2 часа.

1. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- 1.1. СВЧ генератор Г4-111Б (6÷12.7) ГГц.
- 1.2. Измеритель поглощаемой мощности МЗ-56.
- 1.3. Осциллограф С1-73.
- 1.4. Детекторная головка 52И-23.
- 1.5. Передающая и приемная рупорные антенны.
- 1.6. Набор соединительных элементов и ВЧ кабелей.

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получение практических навыков по измерению основных параметров рупорных антенн, научиться сопоставлять результаты расчета и эксперимента при проведении научных исследований, приобретение навыков проектирования радиоволновых систем неразрушающего контроля.

3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

- 3.1. Изучить основные параметры рупорных антенн СВЧ диапазона.
- 3.2. Усвоить методы измерения плотности потока мощности и напряженности электрической составляющей электромагнитного поля.

- 3.3. Ознакомиться с работой СВЧ генератора Г4-111Б и измерителя поглощаемой мощности МЗ-56.
- 3.4. Провести измерение коэффициента усиления пирамидальной рупорной антенны 3-ех сантиметрового диапазона в соответствии с методом «двух идентичных антенн».
- 3.5. По определенному коэффициенту усиления антенны G найти значение КНД(D), рассчитать плотность потока мощности и напряженность электрического поля E в точке приема, приняв эффективную площадь антенны

$$S_{\text{эф}} = 0,8S_2 ,$$

где S_2 – геометрическая площадь раскрыва антенны.

4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Изучить типы антенн СВЧ диапазона и их основные параметры. Ознакомиться с методами и средствами измерения параметров антенн.

5. ТЕОРИЯ

Коэффициент усиления является одним из первичных параметров антенны. Под коэффициентом усиления антенны G понимают отношение интенсивности излучения антенны в направлении главного максимума (при $\theta = \theta_0$, $\varphi = \varphi_0$) диаграммы направленности к среднему значению интенсивности излучения, соответствующему коэффициенту полезного действия $\eta = 100\%$.

Таким образом

$$G = \frac{\frac{E_{\text{max}}^2}{120\pi}}{\frac{P}{4\pi r^2}} = \frac{E_{\text{max}}^2 r^2}{30P}$$

где E_{max} – значение E , соответствующее $\theta = \theta_0$, $\varphi = \varphi_0$, определенное при том же расстоянии r , на котором определяется среднее значение интенсивности поля; P – мощность, поступающая в антенну.

КНД антенны D есть отношение интенсивности её излучения в направлении главного максимума к среднему значению её излучения по всем направлениям, т.е.

$$D = \frac{\frac{E_{\text{max}}^2}{120\pi}}{4\pi r^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} \frac{E^2}{120\pi} r^2 \sin\theta d\theta}$$

КНД антенны связан с коэффициентом усиления G посредством коэффициента полезного действия антенны

$$\eta = \frac{G}{D}.$$

В свою очередь коэффициент усиления антенны G связан с эффективной площадью антенны $S_{\text{эфф}}$

$$S_{\text{эфф}} = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$$

Здесь λ – рабочая длина волны.

Для рупорной антенны при $\eta = 1$ КНД можно найти по формуле

$$D = \frac{4\pi}{\lambda^2} \nu S_{\text{эфф}}$$

Коэффициент ν учитывает, кроме неравномерности и распределения поля по поверхности раскрыва, фазовые искажения по этой поверхности и дифракцию радиоволн на краях рупора. При оптимальных размерах рупора $\nu = 0.64$.

Для практического измерения коэффициента усиления G антенны используются несколько методов. Среди них: метод сравнения (замещения), метод 2-ух идентичных антенн, метод плоского зеркала.

Суть метода сравнения заключается в сравнении коэффициентов усиления исследуемой антенны и эталонной антенны, например, пирамидального рупора.

Метод 2-ух антенн основан на использовании 2-ух совершенно идентичных антенн.

Третий из приведенных методов основан на расстройке антенно-фидерной системы и вычислении коэффициента усиления по расстройке согласования.

В данной работе используется метод 2-ух идентичных антенн.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Перечислите основные параметры антенны.
- 6.2. Раскройте понятия КНД, коэффициент усиления, эффективная площадь антенны.
- 6.3. Запишите выражения для $S_{\text{эфф}}$, G , D .
- 6.4. Каким образом может быть измерен коэффициент G рупорной антенны?
- 6.5. На каком расстоянии r между собой должны быть расположены антенны при измерении коэффициента усиления методом 2-ух идентичных антенн?

7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

7.1. Измерение коэффициента усиления методом двух идентичных антенн

Измерения по данному методу проводятся при помощи двух совершенно идентичных антенн, которые располагаются на расстоянии $r = r_{min} = \frac{L^2}{0,5\lambda}$ (L – максимальный размер раскрыва рупора, λ – длина волны) друг от друга так, чтобы главные максимумы их диаграмм направленности были ориентированы по одной прямой навстречу друг другу. Одна из антенн работает на передачу, другая – на прием. С помощью измерителя мощности измеряется мощность $P_{прд}$, поступающая в передающую антенну и мощность $P_{прм}$, улавливаемую приемной антенной.

- 7.1.1. Собрать схему для контроля режима работы СВЧ генератора Г4-111Б, согласно рис. 1, подключив передающую антенну к выходу генератора, а к выходу приемной антенны – детекторную головку. Выход детекторной головки подключить к входу осциллографа.
- 7.1.2. Подготовить генератор Г4-111Б, измеритель мощности МЗ-56 и осциллограф к работе согласно инструкции по эксплуатации.
- 7.1.3. Переключить генератор Г4-111Б в режим модуляции меандром (несущая частота 10 ГГц).
- 7.1.4. Установить уровень выходной мощности генератора, обеспечивающий оптимальную амплитуду модулирующего напряжения (меандра) на экране осциллографа. Оценить размах и частоту модулирующего напряжения.
- 7.1.5. Собрать схему согласно рис. 2 для измерения мощности $P_{прд}$, подаваемой в передающую антенну и мощности $P_{прм}$, улавливаемой приемной антенной.
- 7.1.6. Переключить генератор Г4-111Б в режим непрерывной генерации. Измерить $P_{прд}$ и $P_{прм}$, поочередно подключая измеритель мощности МЗ-56 к выходу генератора и через КВП к приемной антенне (Рис. 2,3).
- 7.1.7. Используя результаты измерения $P_{прд}$ и $P_{прм}$ определить коэффициент усиления G антенны по формуле

$$G = \frac{4\pi r}{\lambda} \frac{P_{\text{прм}}}{P_{\text{прд}}}$$

Значение длины волны λ в свободном пространстве принять равным 3 см.

7.2. Определение плотности потока мощности СВЧ излучения

7.2.1. Считая значение коэффициента полезного действия (к.п.д.) антенны равным 1 определить коэффициент направленного действия D.

7.2.2. Рассчитать плотность потока мощности СВЧ излучения, считая значение $S_{\text{эфф}}$ равным $0,8S_{\text{геометр.}}$ по формуле

$$P = \frac{P_{\text{прм}}}{S_{\text{эфф}}}$$

Здесь $P_{\text{прм}}$ – мощность, улавливаемая приемной антенной, $S_{\text{геометр.}}$ – геометрическая площадь раскрытия антенны.

7.3. **Определить** напряженность электрической составляющей электромагнитного поля в месте расположения приемной антенны

$$E = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{120P_{\text{прм}}}{D}$$

7.4. По результатам работы составить отчет, который должен содержать:

7. Название работы;
8. Цель работы;
9. Программу работы;
10. Результаты экспериментов и расчетов в виде таблиц и графиков;
11. Выводы по работе.

Список литературы

3. А.З.Фрадин, Е.В.Рыжков Измерение параметров антенно-фидерных устройств / М.: Изд-во «Связь», 1972, 352 с.
4. Матвеев В.И. Радиоволновой контроль: учебное пособие под общ. ред. В.В.Клюева / М.: Изд. Дом «Спектр», 2011. – 184 с.

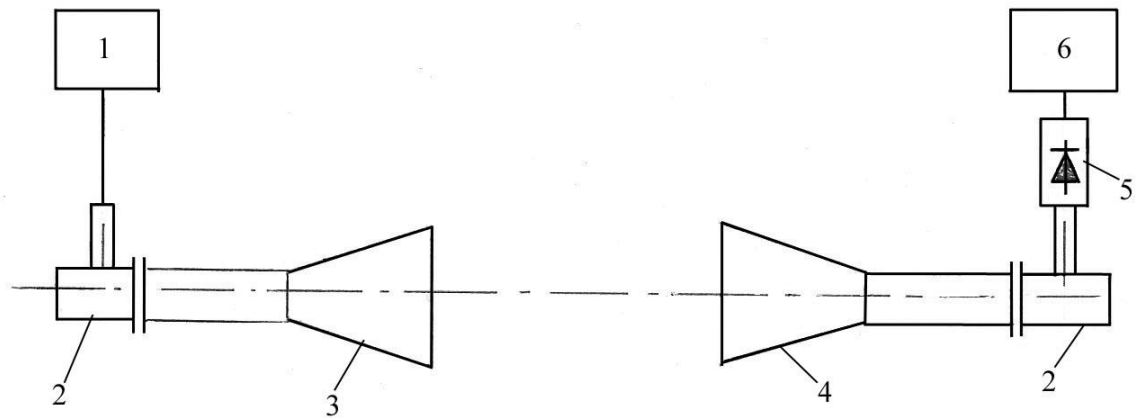


Рис. 1.

1 – генератор; 2 – волноводно-коаксиальный переход; 3 – передающая антенна;
4 – приемная антенна; 5 – детекторная головка; 6 – осциллограф.

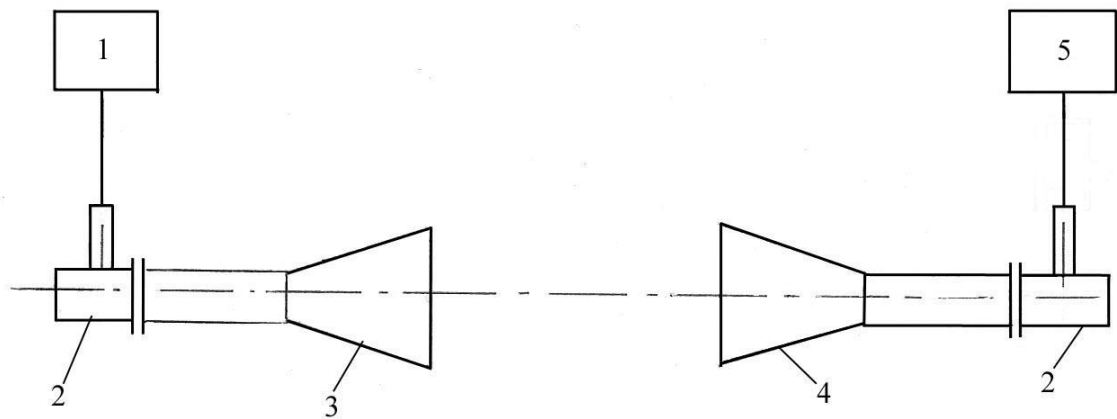


Рис. 2.

1 – генератор; 2 – волноводно-коаксиальный переход; 3 – передающая антенна;
4 – приемная антенна; 5 – ваттметр.

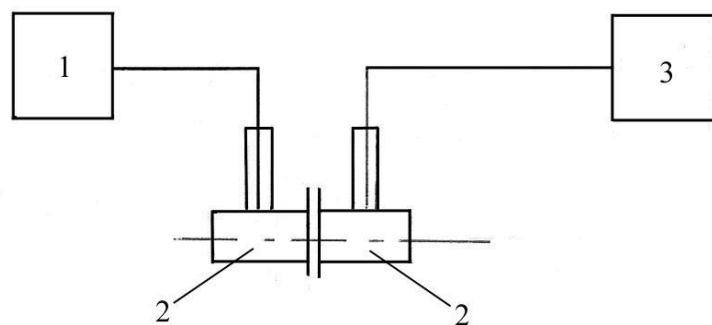


Рис. 3.

1 – генератор; 2 – волноводно-коаксиальный переход; 3 – ваттметр.

Учебное издание

Радиоволновой, тепловой контроль и диагностика

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Радиоволновой, тепловой контроль и диагностика» для студентов, обучающихся по специальности 200102 «Приборы и методы контроля качества и диагностики» направления 200100 «Приборостроение»

Составитель
Шиян Владимир Петрович

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**