

**Федеральное агентство связи**

**Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение  
высшего профессионального образования**

**ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ**

**ЭЛЕКТРОННАЯ  
БИБЛИОТЕЧНАЯ СИСТЕМА**

**Самара**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»**

**Устройства и системы СВЧ и КВЧ диапазонов**

**Методическая разработка к лабораторной работе**

**ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

**Составитель: к.ф.-м.н. Солдатов А.А.**

**Рецензент: к.ф.-м.н. Зайцев В.В.**

Самара  
2008

Лабораторная работа исследовательского характера посвящена изучению методов измерения комплексной диэлектрической проницаемости диэлектрических образцов. Работа содержит две лабораторные работы, время выполнения каждой 2 часа.

## ОБЩИЕ ПРАВИЛА РАБОТЫ СТУДЕНТОВ В ЛАБОРАТОРИИ

1. Работа в лаборатории проводится в часы установленные расписанием.
2. Каждый студент, ознакомившись заранее с описанием лабораторной работы и изучив рекомендуемую литературу, указанную в описании, должен представить руководителю занятий необходимые расчеты по выполняемой работе и бланк отчета.
3. К выполнению работы студент допускается после того, как руководителем занятий будут проверены расчеты и выявлены достаточные знания студента по данной работе.
4. Лабораторная работа оформляется отчетом согласно "Содержанию отчета" в описании работы.
5. Студент сдает зачет по накопительной системе, т.е. зачет сдается по каждой работе во время, указываемое преподавателем, либо в конце занятия, либо в промежутке между занятиями.
6. При работе в лаборатории студент обязан строго выполнять правила техники безопасности.
7. С очередностью выполнения лабораторных работ студент обязан ознакомиться по специальным графикам.

## Лабораторная работа №1.

### “ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ВОЛНОВОДНЫМ МЕТОДОМ”

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1- изучение методов измерения толщины диэлектрических листов;
- 2 - изучение методов измерения характеристик диэлектрических материалов волноводным методом.

#### 2. ЛИТЕРАТУРА

1. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлунов А.С. Радиоволновые методы измерения. М., ”Энергоатомиздат”, 1989, 208 с.
2. Кукуш В.Д. Электрорадиоизмерения. М., ”Радио и связь”, 1985, 367 с.
3. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.Г. Современные методы проектирования линий передачи и резонаторов сверх- и крайневых частот. М., ”Педагогика - пресс”, 1998, 327 с.
4. Бочкарева Т.С. Неганов В.А., Осипов О.В., Соболев В.А. Электродинамика и распространение радиоволн.- М., ”Радио и связь”, 2003, 324 с.
5. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Электродинамические методы проектирования устройств СВЧ и антенн. – М.: ”Радио и связь”, 2003, 415 с.
6. Неганов В.А., Яровой Г.П. Теория и применение устройств СВЧ. . – М.: ”Радио и связь”, 2006, 719 с.
7. Приложение к настоящей методической разработке.

#### 3. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к лабораторному занятию необходимо:

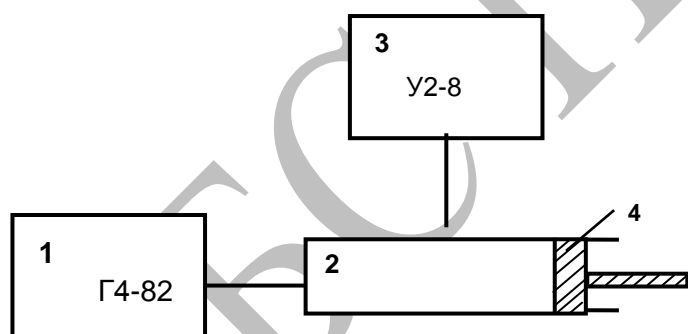
- изучить задание на работу, цель работы;
- изучить работу СВЧ генератора ГЧ-82 и селективного усилителя У2-8.
- изучить работу измерителя разности фаз.
- получить у преподавателя допуск к проведению экспериментальных исследований.

#### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие параметры называются информативными? Перечислить их и охарактеризовать.
2. Какие методы измерения толщины диэлектрических материалов вы знаете? Охарактеризовать их.
3. Какие параметры характеризуют диэлектрик. Перечислить и дать характеристику.
4. Получить формулу для расчета входного сопротивления.
5. Получить формулу для расчета КБВН.
6. Параметры, характеризующие распространение электромагнитной волны в прямоугольном волноводе.
7. Получить формулу для расчета действительной части диэлектрической проницаемости.
8. Получить формулу для расчета мнимой части диэлектрической проницаемости.
9. Описать установку и порядок выполнения лабораторной работы.

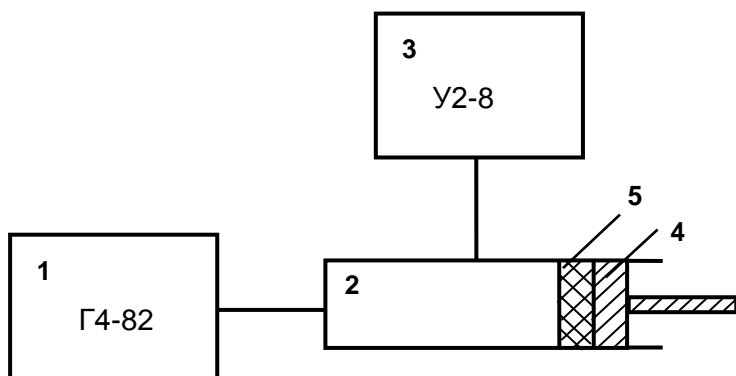
#### 5. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Структурная схема установки приведена на рис. 1



1—генератор СВЧ Г4-82; 2—измерительная (волноводная) линия; 3—измерительный усилитель У2-8; 4—короткозамкнутый поршень.

Рис. 1. Структурная схема измерения длины волны в волноводе.



1–генератор СВЧ Г4-82; 2–измерительная (волноводная) линия; 3– измерительный усилитель У2-8; 4–короткозамкнутый поршень; 5 – измеряемый образец.

Рис.2. Схема измерения диэлектрической проницаемости образца.

Измерения проводятся следующим образом:

5.1. Собрать установку по схеме рис.1 без измеряемого образца. Включить приборы и прогреть в течении 10 минут. Зафиксировать рабочую частоту  $f$  на шкале генератора. Затем измеряется длина волны в измерительной линии  $\lambda$  без образца при фиксированном положении поршня,  $\lambda$  равна удвоенному расстоянию между двумя соседними узлами (минимум или максимум на индикаторе У2-8). Зафиксируйте положение ближайшего к поршню минимума на шкале измерительной линии.

5.2. Затем нужно приклеить к поршню образец и измерить сдвиг  $l$  между минимумами в линии без образца и с образцом, согласно рис.4 приложения 1 (положение поршня остается неизменным).

5.3. Измерить КБВ ( $K_{\sigma}$ ) в линии (с образцом) как отношение  $u_{min}$  к  $u_{max}$  ( $K_{\sigma} = u_{min}/u_{max}$ ) на индикаторе измерителя. Измерения проводятся в mV по верхней шкале индикатора У2-8.

5.4. Измерить штангенциркулем толщину измеряемого образца  $d$ . Полученные результаты записать в таблицу 1.

Таблица 1

№ образца	$f$ - (ГГц)	$d$ - (мм)	$l$ - (мм)	$K_{\sigma} = U_{мин}/U_{max}$	$\varepsilon'$	$\varepsilon''$	$\varepsilon_r$	$tg \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$
1								
2								
3								

5.5. Вызвать программу MATHCAD под названием LBKVHr. Ввести следующие данные: рабочую частоту  $f(ГГц)$ ; длину волны в волноводе  $\lambda$  (мм); смещение минимума  $l$  (мм); толщину образца  $d(мм)$ ; коэффициент бегущей волны  $K_0$ .

5.6. Проверить совпадает ли измеренная длина волны в волноводе с вычисленной. Записать в таблицу 1 результаты расчета: комплексную диэлектрическую проницаемость; тангенс диэлектрических потерь.

5.7. Провести измерения согласно пунктам 5.1-5.7 с двумя другими образцами. Результаты занести в таблицу 1.

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен включать:

- наименование работы;
- цель работы;
- схему экспериментальной установки;
- таблицы и графики, полученные экспериментально;
- выводы.

### Лабораторная работа №2

#### “ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫМ МЕТОДОМ”

##### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1 - изучение методов измерения толщины металлических листов;
- 2 - изучение методов измерения характеристик диэлектрических материалов.

##### 2. ЛИТЕРАТУРА

1. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлунов А.С. Радиоволновые методы измерения. М., ”Энергоатомиздат”, 1989, 208 с.
2. Кукуш В.Д. Электрорадиоизмерения. М., ”Радио и связь”, 1985, 367 с.
3. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.Г. Современные методы проектирования линий передачи и резонаторов сверх- и крайневых частот. М., ”Педагогика - пресс”, 1998, 327 с.
4. Приложение к настоящей методической разработке.

### 3. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к лабораторному занятию необходимо:

- изучить задание на работу, цель работы;
- изучить работу СВЧ генератора ГЧ-82 и селективного усилителя У2-8.
- изучить работу измерителя разности фаз.
- получив у преподавателя номер варианта, рассчитать толщину металлического листа.
- получить у преподавателя допуск к проведению экспериментальных исследований.

### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие параметры называются информативными? Перечислить их и охарактеризовать.
1. Какие методы измерения толщины металлического листа вы знаете? Охарактеризовать их. Нарисовать схему толщиномера.
2. По каким формулам можно найти толщину  $d$  металлического листа при измерении толщиномером с двумя независимыми резонаторами?
3. Какие методы измерения толщины диэлектрических материалов вы знаете?
4. Рассказать об амплитудном и фазовом методах измерения толщины диэлектрических материалов.
5. Рассказать о геометрическом методе измерения толщины диэлектрических материалов.
6. Рассказать об интерференционном и частотно-фазовом методах измерения толщины диэлектрических материалов.
7. Как получить инвариантность измерения толщины  $d$  металлического листа относительно диэлектрической проницаемости.
8. Нарисовать экспериментальную установку и рассказать о методике проведенных измерений.

### 5. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

1. Получив у преподавателя номер варианта (см. табл. 1) и пользуясь приложением и литературой [1-3] рассчитать толщину металлического листа  $d$ , учитывая, что измерения проводятся толщиномером с двумя независимыми резонаторами.

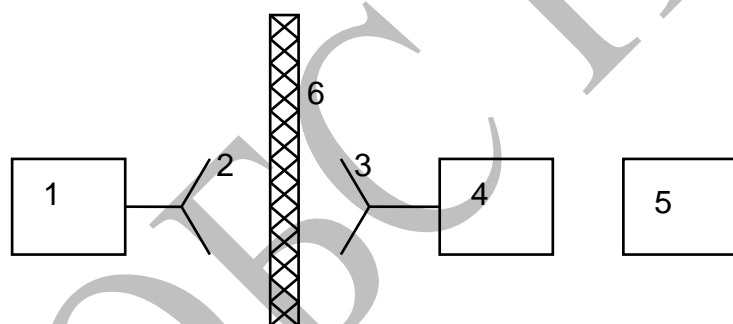


Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4
Тип резонаторов	Цилиндрический	Прямоугольный	Цилиндрический	Прямоугольный
Размер резонаторов	диаметр $2R=$ $d=10$ см длина $l=70$ см	$a*b*c=23*$ $10*10$ см	диаметр $2R=$ $d=12$ см длина $l=80$ см	$a*b*c=23*$ $10*20$ см
Расстояние между открытыми резонаторами $L$	$L=5$ см	$L=5$ см	$L=4$ см	$L=4$ см
Тип рабочей волны и измер. частота $f$	$H_{014}$ $f1=9.8$ ГГц $f2=10.0$ ГГц	$H_{011}$ $f1=9.6$ ГГц $f2=10.0$ ГГц	$H_{015}$ $f1=9.7$ ГГц $f2=9.9$ ГГц	$H_{012}$ $f1=10.0$ ГГц $f2=10.2$ ГГц

## 6. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Структурная схема установки приведена на рис.1.



1. Генератор ГЧ-82; 2. Передающая рупорная антенна; 3. Приемная рупорная антенна; 4. Детекторная секция; 5. Измерительный усилитель У2-8; 6. Измеряемый диэлектрический лист.

Рис. 1. Структурная схема измерительной установки.

Исследования проводятся следующим образом:

6.1. Собрать установку по схеме рис.1 без измеряемого диэлектрика.

6.2. Включить приборы и после десятиминутного прогревания измерить по верхней шкале У2-8 мощность излучения  $P_{\text{над}}$ . По шкале генератора зафиксировать передающую частоту  $f1$ .

6.3. Поместить диэлектрический образец N1 перпендикулярно плоскости приемного рупора на расстоянии 15 см. от него, согласно схеме 1. Измерить прошедшую мощность  $P_{np}$  по верхней шкале измерителя У2-8.

6.4. Поменять расстояние между образцом и приемной рупорной антенной до 20 см. и измерить  $P_{np}$  согласно п.6.3. Затем поменять расстояние до 30 см. и провести измерение согласно п.6.3. Взять среднее арифметическое трех измерений при разных расстояниях.

$$P_{np.ср} = \frac{P_{np1} + P_{np2} + P_{np3}}{3}$$

6.5. Измерить толщину диэлектрического образца штангенциркулем до сотого знака.

Толщина образца  $d$ , тангенс диэлектрических потерь  $tg\delta$  и относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  - связаны следующей формулой:

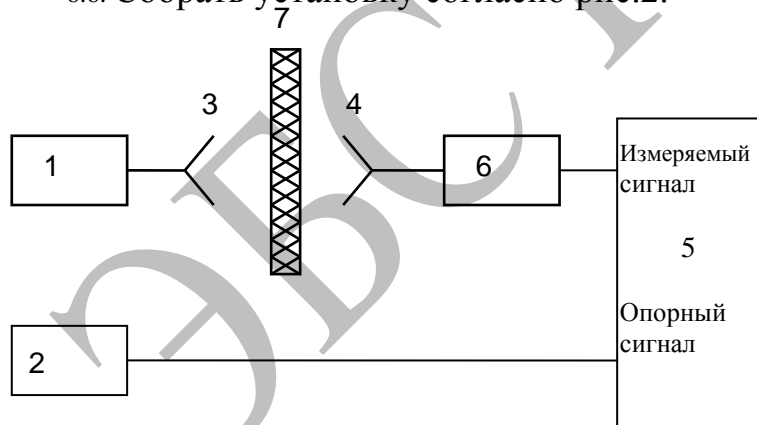
$$d = \frac{\lambda}{2\pi \cdot \sqrt{\varepsilon'} \cdot tg\delta} \frac{P_{пад}}{P_{np}}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  - длина излучаемой волны, диэлектрическую проницаемость можно представить в виде

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'', j - \text{мнимая единица,}$$

Тангенс диэлектрических потерь -  $tg\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$

6.6. Собрать установку согласно рис.2.



1 - Генератор ГЧ-82; 2 - генератор ГЧ-82; 3 - передающая рупорная антенна; 4 - приемная рупорная антенна; 5 - измеритель разности фаз; 6 - детекторная секция; 7 - измеряемый образец.

Рис. 2. Структурная схема измерительной установки для измерения разности фаз.

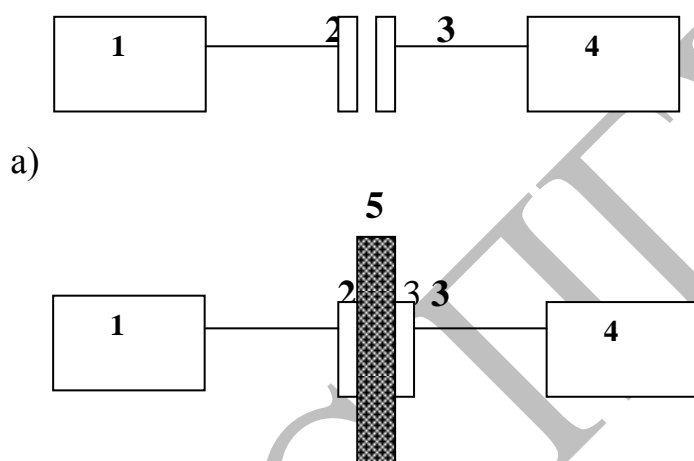
6.7. Установить на генераторах частоту и мощность равную в п. 6.8. Сигнал с выхода генератора подать на рупорную антенну 3, сигнал с другого генератора подать на вход "опорного сигнала" измерителя разности фаз.

6.9. Поместить измеряемый образец перед приемной рупорной антенной, присоединенной ко входу "измеряемый сигнал" измерителя разности фаз. Снять со шкалы измерителя разности фаз величину  $\Delta\varphi$  (разность фаз) в радианах.

6.8. Разность фаз  $\Delta\varphi$  связана с толщиной  $d$  диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon'$  образца формулой:

$$\Delta\varphi = d \cdot 2\pi \cdot (\sqrt{\varepsilon'} - 1) / \lambda \quad (2)$$

6.10. Если нет измерителя фаз, то можно разность фаз измерить с помощью измерительной линии. Для этого нужно собрать установку согласно рис. 3а.



б)

1 – Генератор ГЧ-82; 2,3 – волноводно-коаксиальные переходы; 4 – измерительный усилитель У2-8; 5 – измеряемый диэлектрический лист.

Рис.3. Структурная схема измерительной установки для измерения разности фаз с помощью измерительной линии.

Развести переходы на расстояние  $d$ , равное толщине измеряемого листа. Измерить на измерительной линии расстояние между двумя максимумами или минимумами  $l$ . Длину волны в линии можно определить по формуле:

$$\Lambda = 2 \cdot l$$

Установить линию на максимум (или минимум). Отметить его положение на шкале линии.

6.11. Собрать установку согласно рис. 3б, в которой между переходами 2 и 3 расположен измеряемый образец. Максимум (или минимум) сдвинется на некоторую величину  $\Delta l$ . Сдвиг фаз в образце находится по формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\Lambda} \cdot \Delta l \quad (3)$$

6.12. Зная  $\Delta\varphi$  и  $d$ , решая совместно уравнения (1) и (2), найдём  $\varepsilon'$  и  $\operatorname{tg}\delta$  по формулам:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon''}$$

откуда

$$\varepsilon'' = \operatorname{tg}\delta \cdot \varepsilon'$$

$$\varepsilon = \sqrt{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2}$$

6.13. Взять образец N2 и провести измерения п. 6.1-6.11.

6.14. Составить и заполнить следующую таблицу.

Таблица 2

N образца	толщина $d$	Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon$	Тангенс диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$
1			
2			

## 7. СОДЕРЖАНИЯ ОТЧЕТА

Отчет должен включать:

- наименование работы;
- цель работы;
- схему экспериментальной установки;
- таблицы и графики, полученные экспериментально;
- выводы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Волноводный метод измерения диэлектрической проницаемости

### 1.1. Формулы для расчета входного сопротивления и КБВН

Отражение электромагнитных волн на границах диэлектриков и проводников используется в различных технических устройствах, в частности, в волноводах, антеннах и измерительной технике. Однако, в ряде случаев, отражения становятся не желательным явлением. Потеря энергии, связанная с образованием отраженных волн, уменьшает передаваемую мощность в светооптических устройствах, волноводах и др. явления в слоях диэлектриков и проводников конечной толщины используются также для исследования их электромагнитных свойств. Во всех случаях, подобных перечисленным, происходит взаимодействие падающих и отраженных волн, приводящие, в некоторых случаях, к образованию стоячих волн.

Пусть распространение плоской волны происходит нормально границе  $z=0$ , отделяющей две среды и простирающейся бесконечно в обе стороны.

Тогда напряженность результирующего электрического поля в первой среде [3,4]:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{E}^{nad} + \dot{E}^{omp} = \dot{E}_0^n e^{-\gamma_1 z} + E_0^o e^{\gamma_1 z} = \\ &= \dot{E}_0^n (e^{-\gamma_1 z} + r' e^{\gamma_1 z}) = E_0^n e^{-\gamma_1 z} (1 + r' e^{2\gamma_1 z}), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $r'$  - коэффициент отражения.

Напряженность магнитного поля находится по формуле

$$\dot{H}_1 = \frac{\dot{E}_0^n}{z_c^{(1)}} e^{-\gamma_1 z} (1 - r' e^{2\gamma_1 z}). \quad (1.2)$$

Постоянную распространения  $\gamma_1$  можно представить в виде:

$$\gamma_1 = \alpha_1 + j\beta_1 = \alpha_1 + j\frac{2\pi}{\lambda_1}, \quad (1.3)$$

где знак  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  еще требуется определить.

Распределение напряженности электрического поля, получающегося в результате интерференций волн в первой среде, приведено на рисунке 1.1.

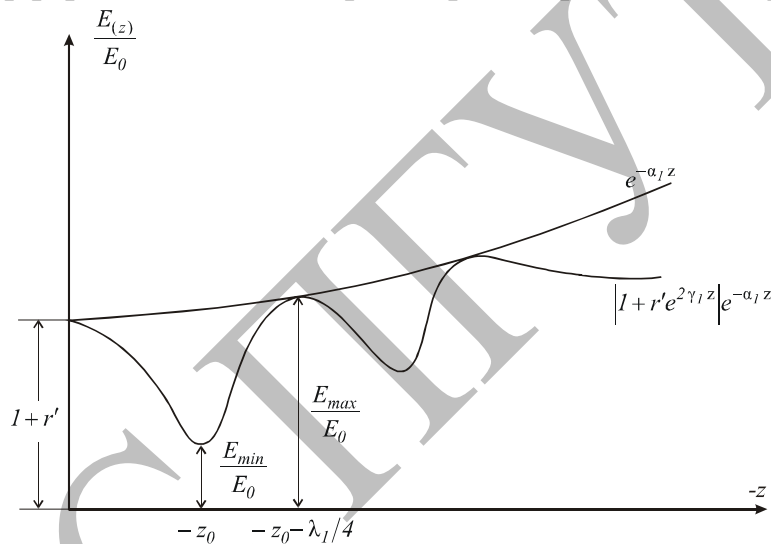


Рис. .1. Распределение напряженности электромагнитного поля

Можно убедиться, что первый минимум получается на расстоянии

$$z_0 = -z_0 - \frac{\lambda_1}{4}, \quad (1.4)$$

если обозначить

$$r' = e^{-2(\rho + j\psi)} = |r'| e^{2j\psi},$$

то отношение напряженностей минимального электрического и максимального электрического поля в точке  $z_0$  равно:

$$\frac{E_{мин}}{E_{макс}} = КБВ = \frac{1 - |r'| e^{-2\alpha_1 z_0}}{1 + |r'| e^{-2\alpha_1 z_0}}. \quad (1.5)$$

При отсутствии заметного затухания в первой среде ( $\alpha_0 = 0$ ) из (1.5) получается более простое соотношение :

$$КБВН = \frac{E_{мин}}{E_{макс}} = \frac{1 - |r'|}{1 + |r'|} = \frac{1 - e^{-2\rho}}{1 + e^{-2\rho}} = th \rho = \frac{1}{КСВН}. \quad (1.6)$$

Отношение минимума интенсивности электрического поля к его максимуму называется коэффициентом бегущей волны (КБВН) напряжения и обозначается как  $K_\delta$ , обратную величину – коэффициентом стоячей волны (КСВН) напряжения -  $K_c$ .

При отражении от металлической поверхности с падающие и отраженные волны одинаковы по амплитуде и образуют стоячую волну. При этом  $E_{мин}=0, E_{макс}=2E_0, K_\delta=0$ , а  $K_c=\infty$ . При отсутствии отражения ( $r'=0$ ) имеется только бегущая волна и  $K_\delta=K_c=1$ .

Таким образом, измеряя максимальное и минимальное значения напряженности поля, а также находя их положение, можно определить из уравнений (1.4) и (1.6) фазу и величину коэффициента отражения

$$\begin{cases} \rho = \frac{1}{2} \ln \frac{K_c + 1}{K_c - 1}, \\ \psi = 2\pi \left( \frac{1}{4} - \frac{z_0}{\lambda_1} \right). \end{cases} \quad (1.7)$$

Входное сопротивление на границе запишется в виде

$$Z_{(0)} = \left( \frac{E_1}{H_1} \right)_{z=0} = Z_c^{(1)} \frac{1+r'}{1-r'}$$

Подставим вместо  $r'$  - его значение

$$r' = e^{-2\theta + j\psi},$$

$$Z_{(0)} = Z_c^{(1)} \operatorname{cth}(\rho + j\psi) = Z_c^{(1)} \frac{\operatorname{th} \rho - j \operatorname{ctg} \psi}{1 - j \operatorname{th} \rho \operatorname{ctg} \psi},$$

учитывая, что  $\operatorname{th} \rho = K_\delta$ , а  $\operatorname{ctg} \psi = \operatorname{tg} 2\pi \frac{z_0}{\lambda_1}$ , можно окончательно записать:

$$Z_{(0)} = Z_c^{(1)} \frac{K_\delta - j \operatorname{tg} 2\pi z_0 / \lambda_1}{1 - j K_\delta \operatorname{tg} 2\pi z_0 / \lambda_1}. \quad (1.8)$$

Следовательно, в общем случае

$$r' = \frac{Z_{(0)} - Z_c^{(1)}}{Z_{(0)} + Z_c^{(1)}}. \quad (1.9)$$

В частном случае, когда во второй среде нет отражений

$$Z_{(0)} = \left( \frac{E_1}{H} \right)_{z=0} = \left( \frac{E_2}{H_2} \right)_{z=0} = Z_c^{(2)}.$$

Коэффициент отражения в этом частном случае обозначается

$$r_{12} = \frac{Z_c^{(2)} - Z_c^{(1)}}{Z_c^{(2)} + Z_c^{(1)}}. \quad (1.10)$$

В том случае, когда металлическая поверхность придвинута к диэлектрику второй среды в плотную, осуществляется, как бы, короткое замыкание второй среды:

$$Z_{к.з.(0)} = Z_c^{(2)} \operatorname{th} \gamma_2 d, \quad (1.11)$$

где  $d$  - толщина диэлектрика.

## 1.2. Метод полного заполнения волновода

Образец исследуемого диэлектрика толщиной  $d$  помещается вплотную к коротко замыкающему поршню и ко всем стенкам волновода (рис. 4).

Исходным для дальнейших расчетов служит выражение для входного сопротивления на его поверхности, обращенной к волноводу. Это сопротивление может быть выражено, с одной стороны, аналогично уравнению (11)

$$Z(d) = Z_c^{(1)} \operatorname{th} \gamma_2 d, \quad (1.12)$$

где  $\gamma_2 = \alpha_2 + j\beta_2$  - постоянная распространения волновода, заполненного диэлектриком;

$Z_c^{(1)}$  - его характеристическое сопротивление.

С другой стороны, это сопротивление находится из уравнения, аналогично (8)

$$Z(d) = Z_c^{(1)} \frac{K_0 - j \operatorname{tg} Q}{1 - j K_0 \operatorname{tg} Q}, \quad (1.13)$$

где  $Q = \beta z_{\max} = 2\pi \frac{z_{\max}}{\Lambda}$ ;

$Z_c^{(1)}$  - характеристическое сопротивление волновода без образца.

Для основной волны прямоугольного волновода  $H_{10}$ , для немагнитных диэлектриков справедливы следующие соотношения:

$$Z_c^{(1)} = \frac{\omega \mu_0}{\beta_1} = \omega \mu_0 \frac{\Lambda}{2\pi}.$$

$$Z_c^{(2)} = j \frac{\omega \mu_0}{\gamma_2}.$$

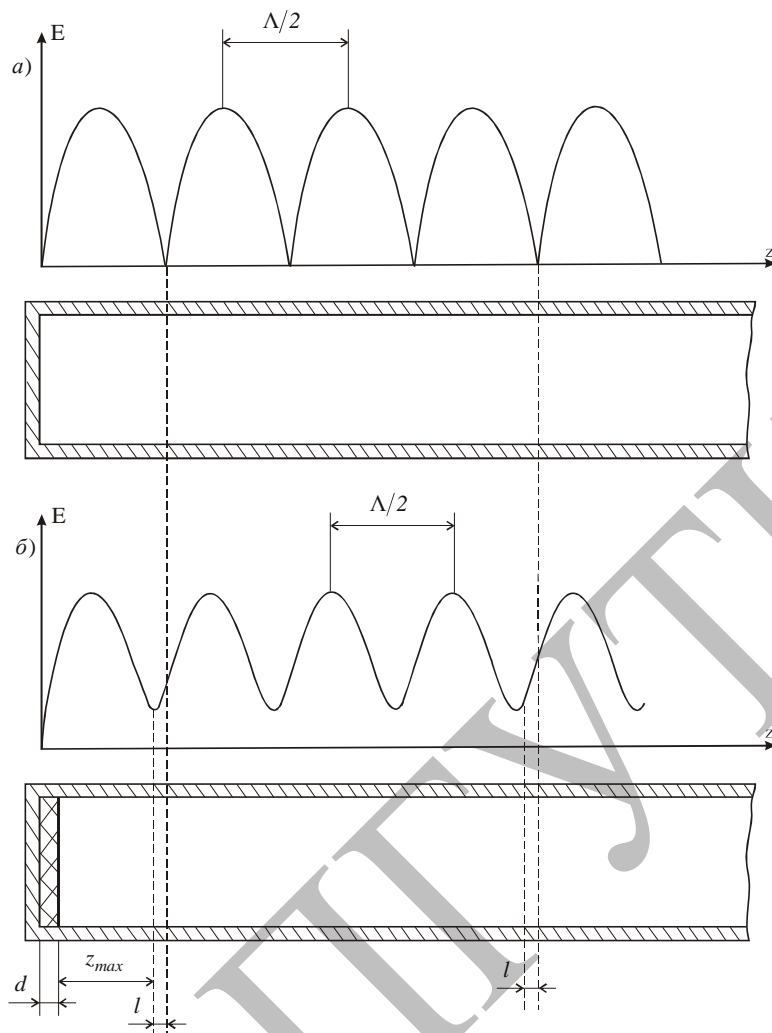
$Z_{\max}$  - которая входит в формулу (1.13), находится по следующей формуле:

$$Z_{\max} = \Lambda/2 - d - l,$$

где  $\Lambda$  - длина волны в волноводе,

$d$  - толщина образца,

$l$  - смещение минимума ( или максимума) стоячей волны при внесении образца (рис.1.2).



а – эюр напряженности электрического поля без образца;  
 б - эюр напряженности электрического поля с образцом

Рис.1.2. - Волноводные измерения диэлектрической проницаемости.

Подставляя полученные выражения в уравнения (1.12) и (1.13) и приравнявая их друг другу, можно получить трансцендентное уравнение

$$\frac{th\gamma_2 d}{\gamma_2 d} = -j \frac{\Lambda}{2\pi d} \frac{K_0 - jtgQ}{1 - K_0 tgQ} = X + jY, \quad (1.14)$$

из которого нужно найти  $\gamma_2$ .

Для перехода от  $\gamma_2$  к  $\tilde{\epsilon}$  необходимо вернуться к волноводам. При отсутствии потерь из уравнения

$$\frac{1}{\lambda_0^2} = \frac{1}{\Lambda^2} + \frac{1}{\lambda_{кр}^2},$$

где  $\lambda_0$  - длина волны в свободном пространстве;

$\lambda_{кр}$  - критическая длина волны в волноводе.

Находим

$$\kappa_z^2 = \kappa^2 - \left( \frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \right)^2, \quad (1.15)$$



где  $\kappa_z$  - коэффициент фазы для бегущей волны в волноводе;

$\kappa$  - коэффициент фазы в свободном пространстве.

Переход от уравнения (1.15) к аналогичному соотношению может быть осуществлен формальным переходом от волнового числа  $k$  к комплексному коэффициенту распространения

$$\gamma = j\kappa = j\omega\sqrt{\tilde{\epsilon}_r\epsilon_0\mu} = \alpha + j\beta.$$

Тогда из уравнения (1.15) для коэффициента распространения в волноводе:

$$\gamma_6^2 = -\kappa_z^2 = -\gamma^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2, \quad (1.16, a)$$

где  $\gamma$  - коэффициент распространения в свободном пространстве.

Для волновода без образца

$$\gamma_1^2 = -\omega^2\epsilon_0\mu_0 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2 = -\left(\frac{2\pi}{\Lambda}\right)^2. \quad (1.16, б)$$

Для волновода с немагнитным диэлектриком ( $\mu_2 = 1$ )

$$\gamma_2^2 = -\omega^2\tilde{\epsilon}_r\epsilon_0\mu_0 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2,$$

$$\gamma_2 = \alpha_2 + j\beta_2,$$

поэтому

$$\omega^2\tilde{\epsilon}_r\epsilon_0\mu_0 = \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2 - \gamma_2^2, \quad (1.17)$$

где  $\epsilon_0\mu_0 = \frac{1}{c^2}$ ,  $\omega^2 = (2\pi)^2 f^2$ ,  $\lambda_0 = \frac{c}{f}$ , где  $c$  - скорость света в вакууме.

Из формулы (1.17) можно получить следующее соотношение

$$\omega^2\epsilon_0\mu_0 = \left(\frac{2\pi}{\Lambda}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2.$$

Подставляя это равенство в формулу (1.17) вместо  $\omega^2\epsilon_0\mu_0$ , получим

$$\tilde{\epsilon}_r\left(\frac{2\pi}{\Lambda}\right)^2 + \tilde{\epsilon}_r\left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2 - \gamma_2^2.$$

Сокращая это уравнение на  $\left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2$  и разрешая его относительно  $\tilde{\epsilon}_r$ , получим

$$\tilde{\epsilon}_r = \frac{\frac{1}{\lambda_{кр}^2} - \left(\frac{\gamma_2}{2\pi}\right)^2}{\frac{1}{\lambda_{кр}^2} + \frac{1}{\Lambda^2}} = \epsilon' - j\epsilon''. \quad (1.18)$$

Подставляя вместо  $\gamma_2$ -ого представление  $\gamma_2 = \alpha_2 + j\beta_2$  и выделяя действительную и мнимую часть, получим

$$\varepsilon' = \frac{1 - \alpha_2^2 - \beta_2^2 \left(\frac{\lambda_{\text{кп}}}{2\pi}\right)^2}{1 + \left(\frac{\lambda_{\text{кп}}}{\Lambda}\right)^2}, \quad (1.19)$$

$$\varepsilon'' = \frac{2\alpha_2\beta_2 \left(\frac{\lambda_{\text{кп}}}{2\pi}\right)^2}{1 + \left(\frac{\lambda_{\text{кп}}}{\Lambda}\right)^2},$$

где

$$\varepsilon_r = \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}, \quad \text{tg } \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}.$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Методы измерения параметров диэлектрика

Геометрический и интерференционный метод измерения параметров диэлектрика

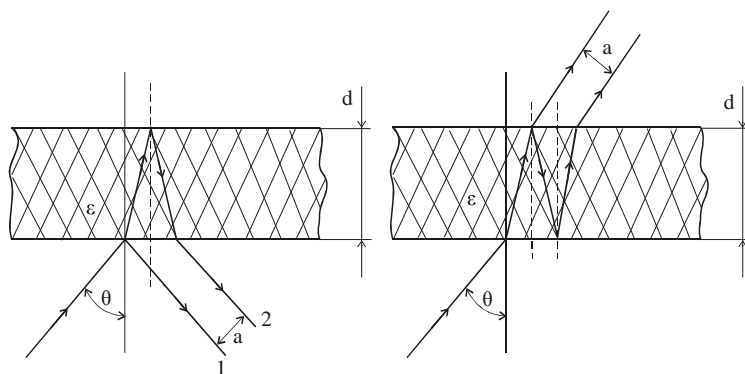
Геометрический метод основан на зондировании плоского слоя контролируемого материала или покрытия электромагнитным лучом под некоторым углом  $\theta$  к нормали поверхности слоя (рис. 2.1,а) и определении расстояния  $a$  между точками входа и выхода луча, т. е. между лучом 1, отраженным от передней поверхности слоя, и лучом 2, отраженным от задней поверхности слоя [1,2].

$$d = \frac{a}{\sin 2\theta} \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}. \quad (2.1)$$

Этот метод можно использовать также в режиме «на прохождение» (рис. 2.1,б).

Проводя измерения по двухканальной схеме, выбрав разные углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$  зондирования слоя, можно обеспечить инвариантность результата измерения толщины к величине  $\varepsilon$ ; для этого достаточно выполнить несложное совместное преобразование соотношения вида (2.1) записанного для углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$ .

Пример реализации геометрического метода в режиме «на прохождение» приведены на рисунке 2.2. Данное бесконтактное устройство предназначено для контроля движущегося толстого ( $d > 1 \text{ мм}$ ) листового диэлектрического материала.



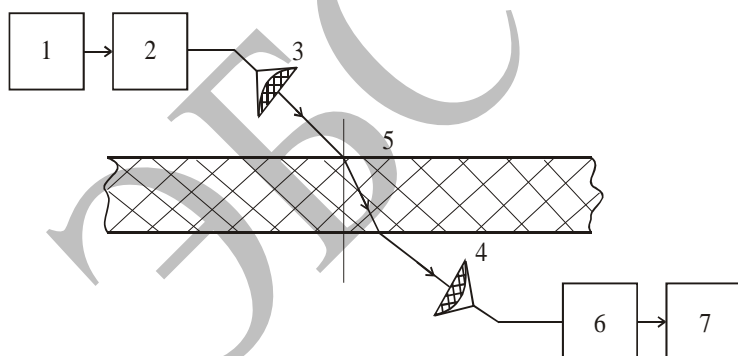
а)

б)

Рис. 2.1. Схема для реализации геометрического метода измерения толщины слоя.

Разработанный на основе геометрического метода толщиномер для контроля толщины огнеупорной футеровки стекловаренной печи обеспечивает возможность контроля толщины диэлектрических слоев в пределах 70–250 мм при значениях диэлектрической проницаемости слоя в пределах 2,5–6. Погрешность измерения составляет не более  $\pm 10\%$ , время измерения одного участка 20с. При температуре окружающей среды, при которой прибор может эксплуатироваться, лежит в пределах  $5-50^{\circ}C$ , для блока СВЧ эта температура составляет  $5-250^{\circ}C$ .

Большая погрешность измерения объясняется существенными различиями в структуре огнеупоров, приводящими к разбросу их диэлектрических параметров. Для диэлектрических материалов и покрытий со слабо выраженной неоднородностью ошибка может составлять  $\pm(2-3\%)$  при возможных практических пределах измеряемых толщин 30–500 мм.



1–СВЧ генератор; 2–аттенюатор; 3–передающая антенна с фокусирующей линзой; 4–приемная антенна с фокусирующей линзой; 5–контролируемый слой диэлектрика; 6–детектор; 7–индикатор

Рис. 2.2. Схема устройства для измерения толщины по смещению зондирующего луча.

Интерференционный (амплитудно–фазовый) метод базируется на наличии функциональной связи между коэффициентом отражения от диэлектрического слоя и его толщиной [1]. Изменение коэффициента отражения обычно контролируется с помощью введения дополнительного опорного канала, работающего на той же длине волны. Применяя высокочувствительные мостовые схемы, можно одновременно определить модуль и фазу коэффициента отражения, несущих информацию о толщине слоя и ее изменениях. Интерференционный метод основан на образовании стоячих волн при отражении зондирующей волны от контролируемого объекта, находящегося в свободном пространстве или на отражающей поверхности (металлической или диэлектрической подложке с параметрами, отличных от параметров контролируемого объекта). Диапазон  $\Delta d$  однозначного определения толщины определяется из условия  $\Delta d \leq \lambda / 4\sqrt{\epsilon}$ . При невыполнении этого условия для устранения неоднозначности можно применять следующие условия [1]: непрерывное измерение коэффициента отражения и счет числа максимумов (минимумов) поля стоячей волны, использование двух рабочих длин волн, на одной из которых толщина определяется грубо, а на другой – более точно, применение фазовой модуляции зондирующей волны. Точность измерения рассматриваемым методом может быть достаточно высокой, но не выше предела, обусловленного разбросом диэлектрических свойств материала и выражаемого величиной  $\sqrt{\epsilon}/\epsilon$ . Для достаточно однородных диэлектриков относительная погрешность измерения составляет 1–3 %, ее абсолютное значение на длине волны  $\lambda = 3$  см равно 50–100 мкм, а при  $\lambda = 8$  мм составляет 20–30 мкм. Данный метод успешно применяется для контроля толщины теплозащитных антикоррозионных и других покрытий, а также диэлектрических слоистых материалов (керамики, стекла и др.) [1].

На интерференционном методе основана, в частности, работа прибора для контроля толщины диэлектрических изделий и покрытий, нанесенных на металлическую или диэлектрическую подложку [1]. Толщину определяют по коэффициенту отражения. Диапазон контролируемых толщин составляет 1–20 мм, погрешность измерения не более  $\pm 0,15$  мм, скорость перемещения объекта не более 0,3 м/с, максимальный зазор между прибором и контролируемым объектом – 10 мм, рабочая частота 9,3 ГГц. Интерференционный метод позволяет измерять толщину материалов и покрытий путем регистрации изменений фазы волны, определяемой по изменению частоты сигнала, требуемой для возвращения измерительной цепи в состояние равновесия. Такой принцип реализован в работающем на частоте 10,5 ГГц бесконтактном устройстве, построенном на основе двойного T-образного моста и предназначенном для измерения толщины диэлектрика на металлическом основании в автоматизированном производстве обтекателей.

Практические пределы измерения толщины интерференционным методом составляет 0–30 мм с погрешностью 0,05–0,1 мм.

## Измерение толщины металлического листа

В настоящее время известно несколько радиоволновых методов измерения толщины металлических листов, основные из которых связаны с применением СВЧ резонаторов полуоткрытого (квази-замкнутого) типа и излучающих устройств. Реализация этих методов требует наличия доступа электромагнитной энергии к обеим сторонам металлического листа.

При резонаторном методе измерения применяются либо два независимых резонатора, расположенных с противоположных сторон листа (рис. 2.3,а) и имеющих незамкнутые металлические полости, у которых открытая область поверхности обращена в сторону листа и находится вблизи его поверхности, либо один резонатор С-образной формы с открытыми торцевыми стенками, обращенными к соответствующим сторонам листа и находящимися вблизи их поверхностей (рис. 2.3,б).

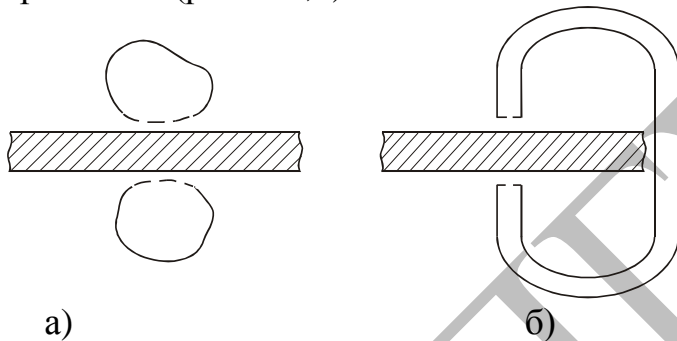


Рис. 2.3.Схема для измерения толщины металлического листа.

Метод измерения, предполагающий применение излучающих устройств, расположенных по обе стороны листа, реализуется по следующим условным схемам: с отражением двух независимых зондирующих электромагнитных волны с обеих сторон листа и последующим их сравнением (рис. 2.4, а, кружком обозначен узел сравнения); с последовательным обеганием электромагнитной волной обеих сторон листа и сравнением ее с первоначальной волной (рис. 2.4, б); с последовательным обеганием электромагнитной волной обеих сторон листа и образованием стоячих волн за счет интерференции этих волн в свободном пространстве и в направляющей системе (рис. 2.4, в); с зондированием листа полями и волнами колебательных и направляющих систем различных типов и конфигураций, содержащих излучающие элементы. Такие системы могут быть независимыми, расположенными с обеих сторон листа, или представлять единую конструкцию с излучающими элементами, расположенными с обеих сторон листа (рис. 2.4, а, б).

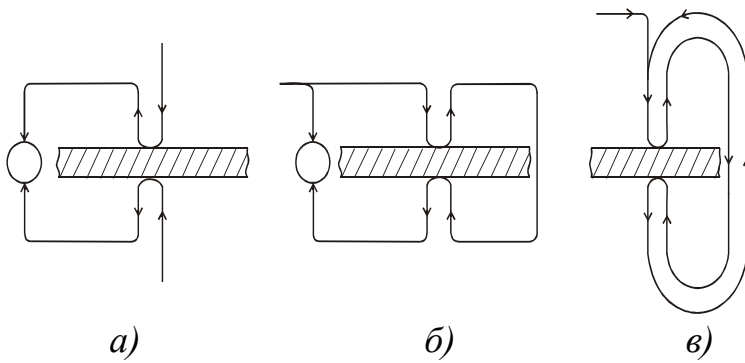


Рис. 2.4. Схема для измерения толщины металлического листа с применением излучающих устройств

Рассмотрим вопросы построения толщиномеров на основе данных методов.

Резонаторный метод измерения. На рисунке 2.5 изображена схема толщиномера [1], содержащая два независимых объемных резонатора, расположенных с противоположных сторон листа и имеющих открытые торцевые поверхности, направленные в сторону листа. Генераторы частотно-модулированных колебаний 3 и 4 возбуждают колебания в резонаторах 1 и 2 резонансных частот, которые измеряют с помощью измерителей 5 и 6. Значения измеренных частот  $f_1$  и  $f_2$ , несущих информацию о расстояниях  $x_1$  и  $x_2$  резонаторов до соответствующих поверхностей листа 7, поступают на устройство 8, где вычисляется толщина листа

$$d = l - x_1 - x_2,$$

где  $l$  – фиксированное расстояние между открытыми торцами резонаторов.

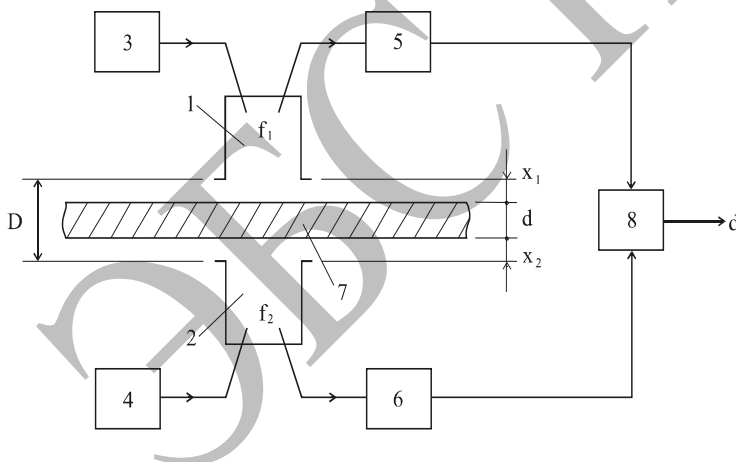


Рис. 2.5. Схема толщиномера с двумя независимыми резонаторами.

Резонансная частота  $f$  каждого такого резонатора с подвижной стенкой является функцией расстояния  $x$  между открытым торцом резонатора и соответствующей поверхностью листа. Для получения высокой добротности целесообразно вызывать колебания типов, характеризующихся отсутствием аксиальных токов, в частности типов  $H_{01p}$ .

Как показывает сравнение расчетов и результатов экспериментов, многие характеристики таких полуоткрытых резонаторов могут быть достаточно точно описаны соответствующими формулами для закрытых резонаторов. Для колебаний типа  $H_{01p}$  цилиндрического резонатора резонансная (собственная) частота

$$f_{1,2} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon}R} \sqrt{\left(\frac{\chi_{01}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{pR}{1+x_{1,2}}\right)^2},$$

где  $c$  – скорость света;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды в полном резонаторе и в пространстве между его торцом и поверхностью контролируемого листа;

$p = 1, 2, \dots$ ;

$R$  и  $l$  – радиус и длина резонатора, соответственно;

$\chi_{01} = 3,832$  – первый корень характеристического уравнения для производной функции Бесселя нулевого порядка.

Чувствительность  $\eta$  резонатора к размеру зазора  $x$  имеет вид

$$\eta = \frac{\partial f}{\partial x} = -\frac{2}{f} \left(\frac{c p}{2\sqrt{\varepsilon}}\right)^2 \frac{1}{(1+x)^3}. \quad (2.2)$$

Эксперименты показывают, что в определенном диапазоне изменения длины  $l+x$  (или зазора  $x$ ) чувствительность  $\eta$  можно считать постоянной величиной.

Возбуждение и съём колебаний в резонаторах, измерение их резонансных частот можно осуществлять известными методами на основе различных схем включения резонаторов, в том числе автогенераторных схем.

Испытанный образец толщиномера при возбуждении в цилиндрических резонаторах диаметром 44 мм и длиной 100 мм колебаний типа  $H_{013}$  в частотном диапазоне 9,2–9,4 ГГц имеет следующие характеристики: диапазон измерения 1–10 мм, разрешающая способность 0,01 мм, погрешность  $\pm 0,02$  мм, постоянная времени 20 мс; выходной сигнал – цифровой или аналоговый.

В зависимости от решаемой задачи возможны различные варианты двухрезонаторной конструкции толщиномера.

Так, установка на технологической линии двух пар таких резонаторов позволяет определять изменение толщины при прокате, измерять толщину отдельных элементов уголкового профиля и др.

Чувствительность толщиномера можно повысить, если каждый резонатор построить на базе волновода П-образной формы (рис. 2.6), открытого на обоих торцах, обе плоскости которых направлены на соответствующую сторону листа [1].

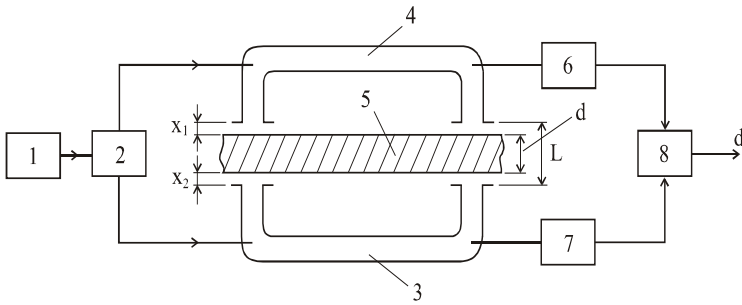


Рис. 2.6. Схема толщиномера на основе П-образных волноводов.

Сигналы с выходов регистраторов резонансных частот, несущие полезную информацию о расстояниях  $x_1$  и  $x_2$ , поступают на вход вычислительного устройства, в котором по значениям  $x_1$  и  $x_2$  определяется искомая толщина листа  $d = L - x_1 - x_2$ , где  $L$  – расстояние между открытыми торцами волноводов.

Для резонаторов, построенных на основе П-образных волноводов цилиндрической формы с колебаниями типа  $H_{01p}$ , выражение для собственной (резонансной) частоты  $f^{\Pi}$  имеет вид

$$f_{1,2}^{\Pi} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon}R} \sqrt{\left(\frac{\chi_{01}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{pR}{l+2x_{1,2}}\right)^2},$$

где  $x_{1,2}$  – расстояние от обоих торцов первого и второго резонаторов, соответственно;

$f_{1,2}^{\Pi}$  – соответствующие этим расстояниям резонансные частоты резонаторов.

Чувствительность к величине зазора

$$\eta_{\Pi} = \frac{\partial f^{\Pi}}{\partial x} = -\frac{2}{f} \left(\frac{cp}{2\sqrt{\epsilon}}\right)^2 \frac{1}{(l+2x)^3}. \quad (2.3)$$

Сравнивая выражения (2.2) и (2.3), получим

$$\frac{\eta_{\Pi}}{\eta} = 2 \sqrt{\frac{\left(\frac{\chi_{01}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{pR}{l+2x}\right)^2}{\left(\frac{\chi_{01}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{pR}{l+x}\right)^2}}.$$

Поскольку  $x \ll l$ , то

$$\frac{\eta_{\Pi}}{\eta} \approx 2 \left(1 - \frac{3x}{l}\right).$$

Отсюда следует, что резонаторный датчик с двумя «рабочими» торцами волновода обладает почти вдвое большей чувствительностью по сравнению с датчиком, волновод которого имеет один «рабочий» торец.

Резонаторные толщиномеры обеспечивают однозначное измерение при зазоре  $x$  между каждым резонатором и соответствующей поверхностью листа. Зазор не должен превышать половины рабочей длины волны ( $\lambda/2$ ) для резонаторов с одним рабочим торцом и четверти длины волны ( $\lambda/4$ ) для резонаторов с двумя рабочими торцами.

На практике результаты измерения могут зависеть от изменения температуры и диэлектрической проницаемости окружающей среды. В таких случаях



необходимо обеспечить инвариантность к указанным возмущающим воздействиям.

Для достижения инвариантности результатов измерения толщины к изменению диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  окружающей среды можно применить двухканальную систему, информативными параметрами каналов которой служат резонансные частоты, соответствующие возбуждению резонатора на разных типах колебаний. Например, для цилиндрического резонатора с колебаниями типов  $H_{011}$  и  $H_{012}$  имеем:

$$f^{(H_{011})} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon R}} \sqrt{\left(\frac{\chi_{01}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{R}{l+kx}\right)^2};$$

$$f^{(H_{012})} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon R}} \sqrt{\left(\frac{\chi_{01}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{2R}{l+kx}\right)^2},$$

где  $k$  – коэффициент, равный 1 или 2 в зависимости от выбранного типа датчика (резонатор с одним или двумя «рабочими» торцами).

Частное от деления частоты  $f^{(H_{012})}$  на частоту  $f^{(H_{011})}$  является инвариантом к величине  $\varepsilon$ :

$$Inv_{\varepsilon, x} = \frac{f^{(H_{012})}}{f^{(H_{011})}} = \sqrt{\frac{1+3/\langle kx \rangle^2}{\langle \chi_{01}/\pi R \rangle^2 + 1/\langle kx \rangle^2}}$$

Отметим, что возможные колебания контролируемого листа в процессе измерения не влияют на результат измерения толщины. Толщиномеры, имеющие двухрезонаторную конструкцию, могут быть также реализованы на основе двух открытых резонаторов, каждый из которых образуется соответствующей поверхностью листа и располагаемым на некотором расстоянии над ней металлическим зеркалом.

Резонаторные толщиномеры другого типа (рис. 2.1,б) строятся на основе С-образных волноводов, открытых на обоих торцах. Торцы такого волновода – дроссельные фланцы, выполненные в виде радиальных линий переменной высоты, - направлены на поверхности противоположных сторон листа, который находится между ними, образуя малый зазор с каждой стороны. Собственная частота резонатора является функцией его длины и, следовательно, толщины листа.

Схема толщиномера с С-образными квазизамкнутыми резонаторами, называемыми гибридными волноводами, представлена на рисунке 2.7.

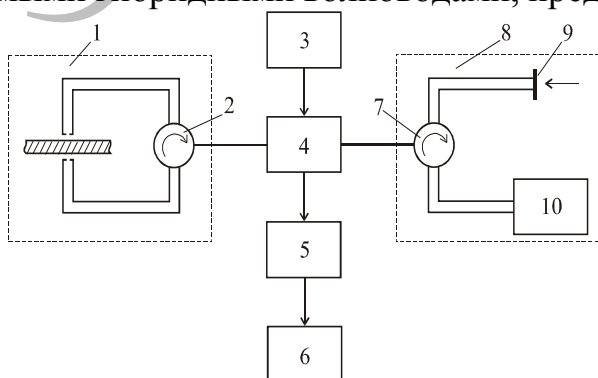


Рис 2.7. Схема толщиномера на основе С-образного волновода.

Измерительный 1 и компенсационный 8 резонаторы возбуждаются СВЧ генератором частотно-модулированных колебаний 3 через плечи двойного Т-образного моста 4 и циркуляторы 2 и 7. Компенсационный резонатор 8 имеет такие же электрические и температурные характеристики, что измерительный, и содержит переменную 9 и согласованную 10 нагрузки. С помощью подвижного короткозамыкающего поршня в цепи компенсационного резонатора его входной импеданс изменяется так, что достигается уравнивание моста. В такой измерительной цепи влияние колебаний температуры окружающей среды и флуктуации частоты генератора сведены к минимуму.

Измерительная цепь может уравниваться автоматически.

Для этого в цепь компенсационного резонатора следует включить электромеханический низкочастотный фазовый модулятор. Тогда на выходе детектора 5, к которому подключен индикатор 6, будет амплитудно-модулированный сигнал, амплитуда первой гармоники переменной составляющей которого зависит от крутизны выходной характеристики моста, а фаза изменяется при переходе от одной ветви характеристики на другую. Выходной сигнал детектора можно использовать для управления сервоприводом, который передвигает подвижный настроечный поршень компенсационного резонатора в сторону, соответствующую уравниванию моста, а отсчет толщины металлического листа производить по шкале настроечного поршня.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Лабораторная работа №1. Измерение характеристик диэлектрических материалов волноводным методом	3
2. Лабораторная работа №2. Измерение характеристик диэлектрических материалов амплитудно-фазовым методом	8
3. Приложение 1. Волноводный метод измерения диэлектрической проницаемости	15
4. Приложение 2. Методы измерения параметров диэлектрика (обзор)	24