



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

Кафедра теоретических основ радиотехники

А. А. Данилин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы по дисциплине

“Измерения на СВЧ”

(электронный вариант)

«Измерение параметров диэлектриков на СВЧ»

Санкт-Петербург

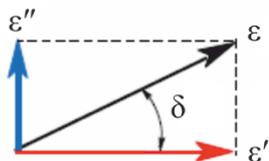
2025 г.

8. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА СВЧ

В лабораторной работе студенты знакомятся с комбинированным измерителем ФК2-18 и его использованием для измерения параметров диэлектриков на СВЧ. Изучается методика работы с прибором, его настройка и калибровка. В состав лабораторной установки входят также СВЧ-генератор диапазона 8...12 ГГц, коаксиально-волноводные переходы и измерительная ячейка с исследуемым диэлектриком.

8.1. Общие вопросы измерения параметров диэлектриков

К электромагнитным параметрам диэлектриков относят диэлектрическую проницаемость $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$, где ε' и ε'' – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости вещества. На практике диэлектрик характеризуют относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = \varepsilon' / \varepsilon_0$, где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума. Величины ε' и ε'' характеризуют энергию электрического поля, накапливаемую в диэлектрике, и потери в нем.



$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = D = \frac{1}{Q} = \frac{\text{Потери энергии за цикл}}{\text{Запасенная энергия за цикл}}$$

Рис. 8.1. Векторная диаграмма комплексной диэлектрической проницаемости

Если представить комплексную диэлектрическую проницаемость в виде векторной диаграммы (рис. 8.1), то суммарный вектор образует угол δ с действительной осью ε' . Этот угол является мерой относительных потерь в материале, поэтому тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta = D = \varepsilon'' / \varepsilon'$ называют фактором потерь D или коэффициентом диссипации. Иногда для характеристики потерь используют обратную величину – добротность или Q -фактор.

В таблице 8.1 представлены ориентировочные параметры диэлектрических материалов, исследуемых в работе.

Таблица 8.1

Материал диэлектрика	Диэлектрическая проницаемость	Фактор потерь	Предельная частота, ГГц
Фторопласт (PTFE)	2.0...2.1	$(0.1...0.3) \cdot 10^{-3}$	100
Стеклотекстолит (FR-4)	4.0...4.5	0.02...0.03	2
Полиэтилен (PE)	2.2...2.3	$(0.2...0.5) \cdot 10^{-3}$	100
Оргстекло (PMMA)	2.5...3.0	0.01...0.02	20
Дерево (средние показатели)	2..6	0.01...0.5	10
Береза (влажность 10%)	2.8...3.8	0.02..0.06	10
Поглотитель – углеродный композит (10 % углерода) 20% углерода 30% углерода	5...10	0.1...0.3	10
	8...15	0.2...0.5	
	10...20	0.3...0.8	
Полимерная матрица композита (эпоксидная смола)	3...4	0.01...0.05	20
Алюминивая керамика (политор Al_2O_3)	9...10	$(0.1...2) \cdot 10^{-3}$	300

8.2. Методы измерения параметров диэлектриков

Методы измерения параметров диэлектриков на СВЧ можно разделить на несколько групп: резонаторные, фидерные, методы определения параметров диэлектриков в свободном пространстве. Традиционные методы, основанные на измерении емкости и добротности конденсатора с исследуемым диэлектриком, на СВЧ используют редко из-за низкой точности.

Наиболее точными методами исследования диэлектриков с малыми потерями являются *резонаторные* методы. В них исследуемый образец диэлектрика помещают в объемный резонатор. По смещению собственной частоты и изменению добротности резонатора расчетным путем определяют диэлектрическую проницаемость и фактор потерь. Эти методы одночастотные – для исследования частотных зависимостей надо иметь набор резонаторов. Для материалов с большими потерями этот метод дает низкую точность из-за снижения добротности резонатора.

Менее точными являются методы, основанные на исследовании образца диэлектрика, размещенного в линии передачи (коаксиальной или волноводной). Эти методы в литературе получили название «*фидерные методы*» или «*волноводные методы*». Измерительная ячейка представляет собой отрезок ли-

нии передачи, в которой размещают образец исследуемого диэлектрика. В различных вариантах фидерного метода опытным путем определяют либо всю матрицу рассеяния измерительной ячейки (коэффициент отражения, коэффициент передачи), либо отдельные ее параметры (вносимый фазовый сдвиг, ослабление и пр.). Искомые значения диэлектрической проницаемости затем определяют расчетным путем. К достоинствам фидерных методов следует отнести простоту реализации, несложность изготовления измерительной ячейки, возможность применения стандартного оборудования и методик измерения. Однако они имеют невысокую точность измерения $\text{tg } \delta$ диэлектриков с малыми потерями.

Методы, в которых используются волны *в свободном пространстве*, отличаются от фидерных в основном конструкцией измерительной ячейки. Она включает две рупорные антенны и держатель диэлектрического образца. Расчетная модель такой системы более сложная, однако процедура проведения измерений и обработки опытных данных (коэффициента передачи и коэффициента отражения) принципиально не отличается от фидерного метода.

8.3. Волноводный метод измерения параметров диэлектриков

В лабораторной работе изучается волноводный (фидерный) метод измерения параметров диэлектриков, использующий измерительную ячейку в виде отрезка прямоугольного волновода. Методы, основанные на использовании прямоугольных волноводов, применяются обычно в диапазоне длин волн от 1 до 10 см. На более коротких волнах применение волноводов становится нецелесообразным из-за чрезмерного уменьшения размеров образцов. Также нерационально применение волноводов и при более длинных волнах (> 10 см) из-за непомерно больших размеров ячейки. Другая проблема волноводного метода – возникновение волн высших типов в отрезке, заполненном диэлектриком с большой проницаемостью. Это вносит серьезные погрешности в расчетную модель.

В работе используется измерительная ячейка в виде толстого фланца – отрезка волновода, длина которого примерно четверть длины волны. Комплексный коэффициент передачи ячейки определяется с помощью СВЧ-измерителя ФК2-18 в частотном диапазоне 8...12 ГГц.

8.4. Математическое моделирование измерительной ячейки

Измерительная ячейка может быть представлена в виде трех отрезков прямоугольного волновода (рис.8.2).

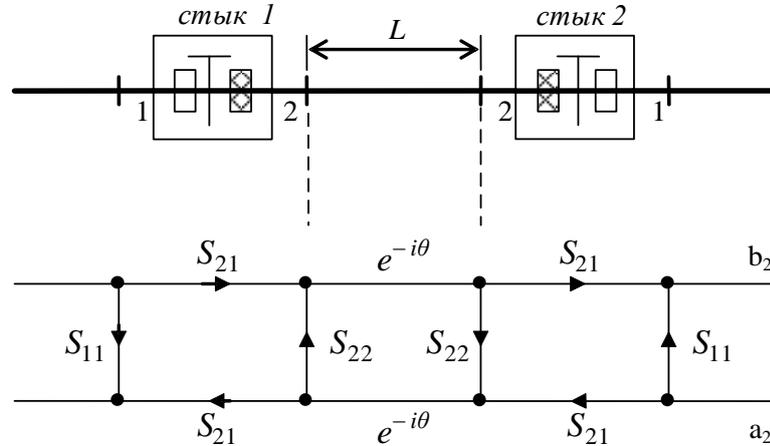


Рис. 8.2. Схема и направленный граф волноводной измерительной ячейки

Центральный отрезок длиной L заполнен диэлектриком, два других – воздухом. Расчетная модель отрезка линии с диэлектриком включает три каскадно включенных четырехполюсника. Это стыки линий с разными волновыми сопротивлениями, включенными навстречу друг другу, и отрезок линии передачи с диэлектриком. Граф расчетной модели представлен на рис. 8.2. Здесь S_{ij} – элементы матрицы рассеяния стыков пустого и заполненного волновода; $e^{-i\theta} = e^{-i\gamma L}$ – коэффициент передачи отрезка волновода с диэлектриком. Он отражает свойства образца с электрической длиной θ и физической длиной L . Электрическая длина образца зависит от постоянной распространения волны основного типа γ :

$$\gamma = \beta - i\alpha, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon' - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}, \quad \alpha = \frac{\pi\epsilon''}{\lambda \sqrt{\epsilon' - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}},$$

Здесь γ – комплексная постоянная распространения; β , α – коэффициент фазы и постоянная затухания волны основного типа в диэлектрике с потерями; k – постоянная распространения волны в свободном пространстве. Элементы матрицы соединений пустого и заполненного волноводов соответствуют стыкам

линий с разным волновым сопротивлением. Эквивалентная схема стыка – идеальный трансформатор с коэффициентом трансформации n :

$$S_{11} = \frac{n-1}{n+1}, \quad S_{22} = -S_{11}, \quad S_{21} = \frac{2\sqrt{n}}{n+1}, \quad n = \frac{k}{\beta} = \frac{2\pi/\lambda}{\beta}.$$

С помощью правила «некасающегося контура» для графа ячейки (см. рис.8.2) получим уравнение для общего коэффициента передачи измерительной ячейки:

$$\hat{S}_{21} = \frac{S_{21}^2 e^{-i\theta}}{1 - S_{22}^2 e^{-2i\theta}}.$$

Для обработки опытных данных используется программный калькулятор, реализованный в пакете Mathcad (файл eps.mcd).

Калькулятор решает следующую задачу: по измеренному ослаблению ΔA и фазе коэффициента передачи $\Delta\varphi$ при помещении диэлектрика в ячейку он позволяет найти диэлектрическую проницаемость исследуемого материала и его фактор потерь (рис. 8.3).

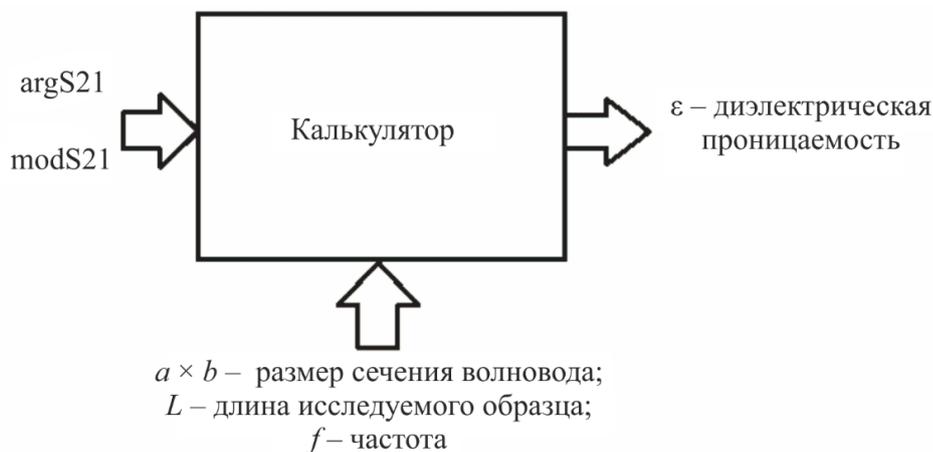


Рис. 8.3. Общий принцип работы калькулятора

Входными данными являются экспериментально полученные значения модуля и аргумента коэффициента передачи, сечение волновода, длина исследуемого образца, частота, на которой был проведен эксперимент. Выходным параметром является комплексная диэлектрическая проницаемость.

Для решения этой задачи используются функции поиска корня нелинейных уравнений Find и Minerr. В случае диэлектриков с малыми потерями удобно использовать двухступенчатый алгоритм поиска решения. На первом шаге вводят экспериментально полученные вариации фазового сдвига и ослабления,

а также примерное значение диэлектрической проницаемости и нулевой фактор потерь (начальная точка поиска). Далее осуществляется поиск значения диэлектрической проницаемости. На втором шаге реализован поиск минимума нелинейного уравнения по двум координатам с помощью функции Minerr. В качестве приближения используется значение диэлектрической проницаемости, полученное на предыдущем этапе. Успешность поиска результата во многом зависит от удачного начального приближения. Для диэлектриков с большими потерями первый шаг может не давать разумного приближения, поэтому в ряде случаев его можно пропустить.

В качестве проверки полученных решений используется программа моделирования измерительной ячейки в пакете Microwave Office (MWO 10). Для начала выбираем три одинаковых отрезка волновода (модель RWG_TE_{mn}) и соединяем их между собой (рис. 8.4). В настройках каждого элемента указываем необходимое сечение волновода (23×10 мм) и тип волны, проходящей в системе (TE₁₀).

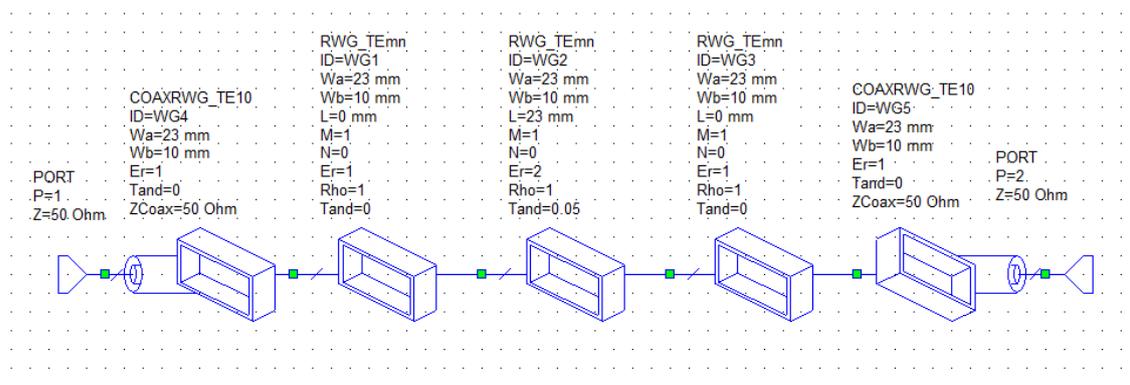


Рис. 8.4. AWR – модель измерительной волноводной ячейки

В центральном элементе WG2 задаем диэлектрическую проницаемость и длину образца. Остальные волноводные части (WG1 и WG3) представляем как отрезки волновода, заполненные воздухом с длиной L , равной нулю. Для подключения портов P1 и P2 используем стандартные идеальные модели WG4 и WG5 коаксиально-волноводных переходов COAXRWG_TE10 с портами $Z_{Coax}=50$ Ом (см. рис. 8.4).

Моделирование измерительной ячейки проводим в два этапа. На первом проводим калибровку пустой ячейки. Для этого вводим параметры ячейки WG2 ($E_r=1$ и $T_{and}=0$). Проводим расчет в диапазоне частот (рис.8.5) и записываем значения коэффициента передачи и фазового сдвига на рабочей частоте (в данном случае на 10 ГГц потери ΔA_0 практически равны нулю, фазовый сдвиг $\Delta\varphi_0$ составляет 150.4 градусов.).

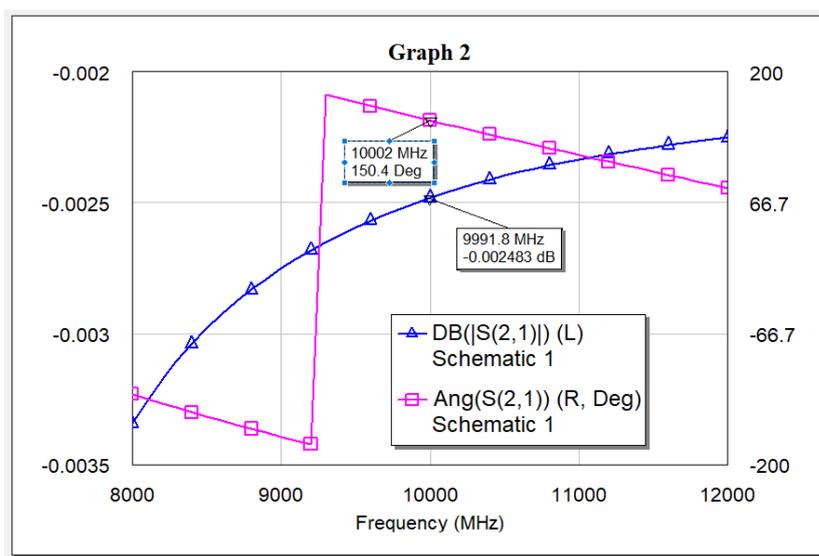


Рис. 8.5. Результаты расчета коэффициента передачи пустой волноводной ячейки

На втором этапе вводим значения E_r и T_{and} , полученные в результате обработки опытных данных программой eps.mcd, и проводим расчет коэффици-

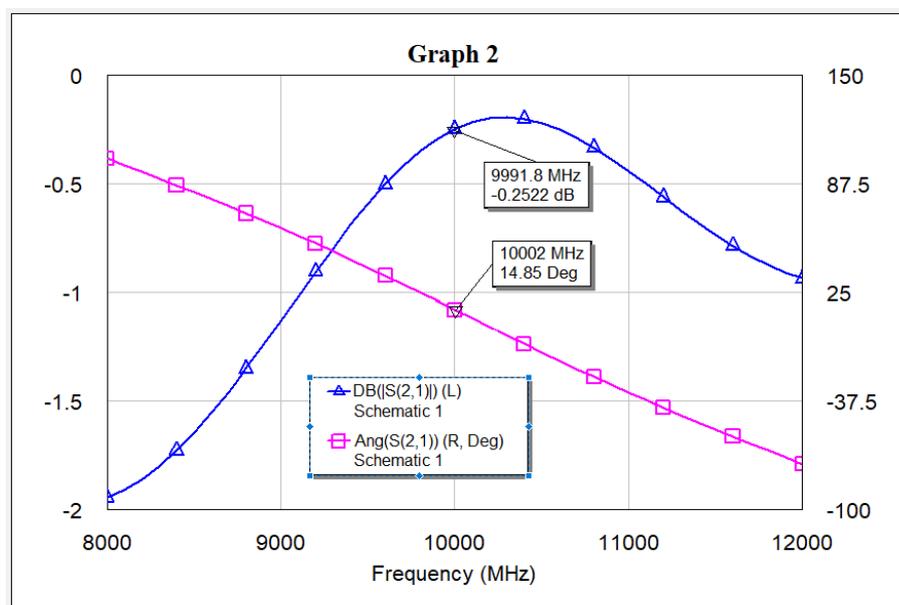


Рис. 8.6. Результаты расчета коэффициента передачи ячейки с диэлектриком

ента передачи и фазового сдвига (рис. 8.6).

Из полученных результатов расчета на рабочей частоте вычитаем значения ΔA_0 и $\Delta \varphi_0$, зафиксированные при калибровке (в примере на рис. 8.6 должны получиться $\Delta A=0.25$ и $\Delta \varphi= -135.6$ градусов). Данные моделирования сравниваем с экспериментальными ΔA_{exp} и $\Delta \varphi_{exp}$. Это позволяет проверить правильность полученных при измерениях результатов.

8.5. Технические характеристики амплифазометра ФК2-18

Комбинированный измеритель разности фаз (амплифазометр) ФК2-18 является многофункциональным прибором для измерения модуля и фазы комплексных коэффициентов передачи СВЧ-устройств на фиксированных частотах (рис. 8.7).



Рис. 8.7. Амплифазометр ФК2-18

Краткие технические данные прибора:

- диапазон рабочих частот – 110 МГц...12 ГГц;
- пределы измерения разности фаз $0... \pm 180^\circ$ с разбивкой на поддиапазоны $\pm 6, \pm 18, \pm 60, \pm 180^\circ$;
- пределы измерения модуля коэффициента передачи (ослабления) 60 дБ при мощности входного сигнала $10^{-3} \dots 10^{-11}$ Вт;
- основная погрешность измерения разности фаз не превышает $\pm(1.0 + 0.036\varphi_K + 0.075A_x)^\circ$, где φ_K – конечное значение шкалы установленного поддиапазона; A_x – ослабление исследуемого устройства;

– основная погрешность измерения ослабления не более $\pm(0.5 + 0.02A_k + 0.03A_x)$, дБ где A_k – предел шкалы измерения ослабления; A_x – измеряемое значение ослабления.

Измеритель разности фаз ФК2-18 представляет собой двухканальный супергетеродинный приемник-преобразователь СВЧ с измерительным блоком. Принцип работы прибора – перенос сигнала СВЧ на более низкие частоты и определение его параметров низкочастотным измерительным блоком (НЧ-фазометром). Упрощенная структурная схема СВЧ-тракта прибора представлена на рис. 8.8.

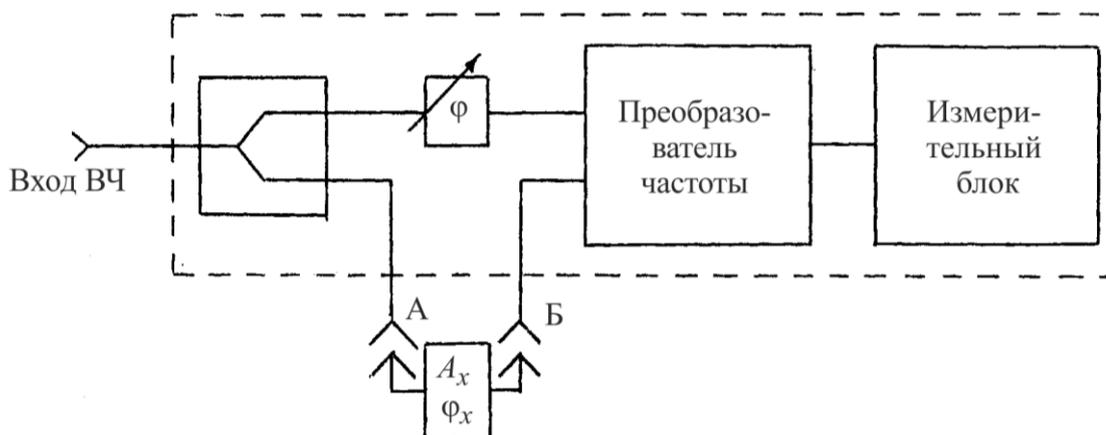


Рис. 8.8. Структурная схема измерителя разности фаз ФК2-18

Сигнал, подаваемый на вход ВЧ-прибора от внешнего генератора, делят пополам в полосковом делителе мощности. Один из сигналов является опорным, другой поступает в измерительный канал. В этот канал через СВЧ разъемы А и Б подключают исследуемое устройство. Для компенсации фазовых набегов в тракте (для калибровки прибора по фазе) в опорном канале предусмотрен плавный образцовый фазовращатель (ФВ), представляющий собой U-образную коаксиальную линию переменной длины (тромбонный ФВ). Градуировка ФВ выполнена в единицах длины L_2 [см]. При этом истинная длина линии в 2 раза больше значения цифрового индикатора L_2 , так как отображается длина только одного плеча тромбонного ФВ. Таким образом общая длина ФВ $L = 2 \cdot L_2$.

Структурная схема преобразователя частоты сигналов измерительного и опорного каналов представлена на рис. 8.9. Сигналы каналов подают на два смесителя *стробоскопического* типа. Такой смеситель представляет собой электронный быстродействующий ключ, управляемый коротким стробимпульсом. Импульс вырабатывают путем дифференцирования перепада напряжения

с малой ($<0,1$ нс) длительностью нарастания. Этот перепад формируют подачей управляющего импульса на СВЧ-диод с накоплением заряда (ДНЗ).

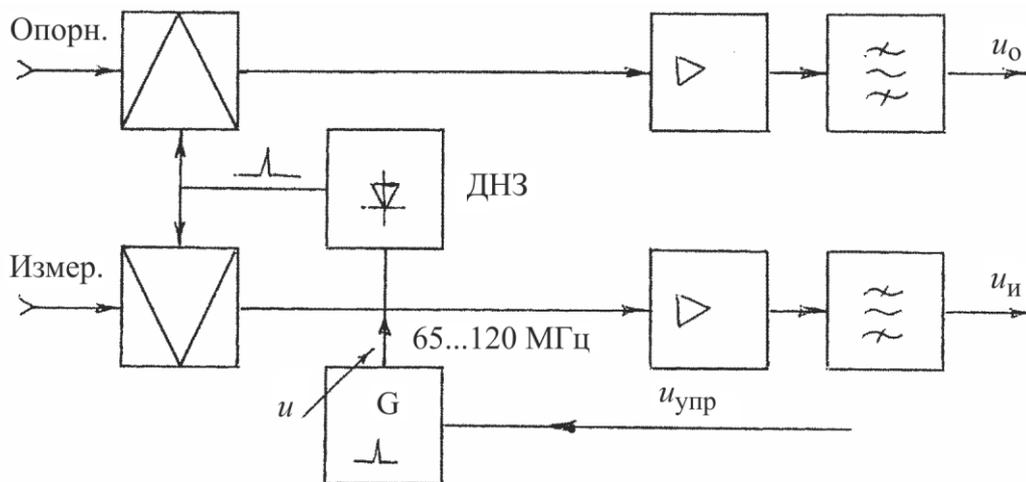


Рис. 8.9. Структурная схема преобразователя частоты

Генератор управляющих импульсов в режиме поиска перестраивается по частоте f_{Γ} напряжением до тех пор, пока не будет выполнено условие захвата частоты:

$$f_{\text{вх}} - nf_{\Gamma} = f_{\text{ПЧ1}} = 19,722 \text{ МГц}, \quad (8.1)$$

где n – номер одной из гармоник стробимпульса; $f_{\text{ПЧ1}}$ – первая промежуточная частота. Выходные сигналы со смесителей опорного и измерительного каналов фильтруют, усиливают и подают на низкочастотный измерительный блок, структурная схема которого представлена на рис. 8.10.

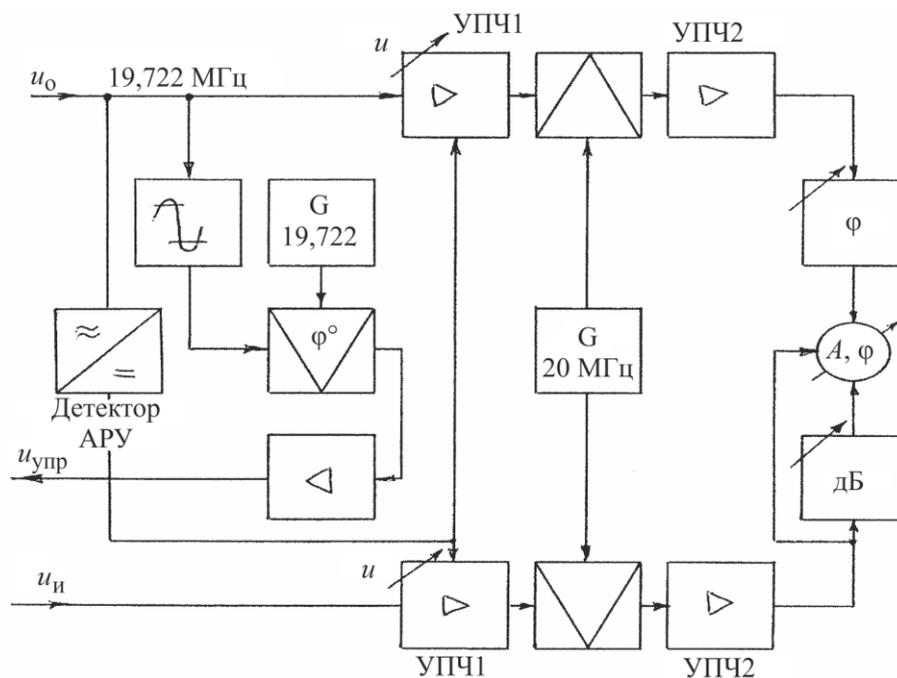


Рис. 8.10. Структурная схема НЧ измерительного блока

Опорный сигнал поступает на систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), управляющую частотой генератора стробимпульсов. Система ФАПЧ включает в себя опорный кварцевый генератор частоты 19,722 МГц, фазовый детектор и усилитель постоянного тока (УПТ). Если условие преобразования частоты (8.1) не выполняется ни для какого номера гармоники стробимпульса, то на выходе фазового детектора появляется пилообразное напряжение ошибки. Это напряжение управляет частотой генератора стробимпульсов, подстраивая ее до вхождения системы ФАПЧ в синхронизм с частотой входного сигнала. В дальнейшем система ФАПЧ автоматически удерживает частоту генератора, сохраняя условие захвата частоты. Применение стробоскопического смесителя и работа на высоких гармониках гетеродина позволяет перестраивать гетеродин в сравнительно небольшом диапазоне частот (в пределах 65...120 МГц), что обеспечивает автоматическую настройку прибора на входную частоту.

Сигналы опорного и измерительного каналов поступают на входы УПЧ1, охваченных цепью автоматической регулировки усиления (АРУ). Управляющий сигнал АРУ вырабатывается детектированием опорного сигнала, его величину контролируют по индикатору уровня опорного сигнала. Второе частотное преобразование опорного и измерительного сигналов осуществляют двумя смесителями, на которые подают сигнал фиксированного гетеродина 20 МГц. Вторая промежуточная частота $f_{ПЧ2}$ равна 278 кГц.

Преобразованный сигнал опорного канала поступает на плавный некалиброванный фазовращатель *ФАЗА*, позволяющий регулировать показания фазометра в пределах $\pm 40^\circ$ для установки нуля индикатора (калибровка по фазе). Предусмотрена также плавная калибровка уровня сигнала плавным регулятором *АМПЛИТУДА*.

В измерительном канале НЧ блока сигнал разделяется на два. Один из них проходит через ступенчатый аттенюатор (с шагом перестройки 1 дБ в пределах 0...60 дБ). Этот аттенюатор применяют в качестве образцового для измерения ослабления *методом замещения*. Второй сигнал подают на индикатор минуя аттенюатор и используют при измерении фазового сдвига.

Индикаторный блок прибора представляет собой комбинацию фазометра и амплитудного детектора. Фазометр построен по принципу преобразования фазового сдвига в напряжение. Для этого входные сигналы преобразуют в импульсы с длительностью, пропорциональной измеряемому $\Delta\varphi$ (преобразование фаза-время). Постоянная составляющая импульсов в свою очередь будет

пропорциональна измеряемому фазовому сдвигу. Упрощенная структурная схема фазометра с преобразователем фаза–напряжение приведена на рис. 8.11.

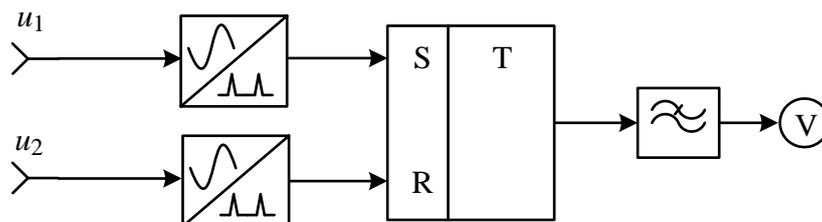


Рис. 8.11. Преобразователь фаза–напряжение

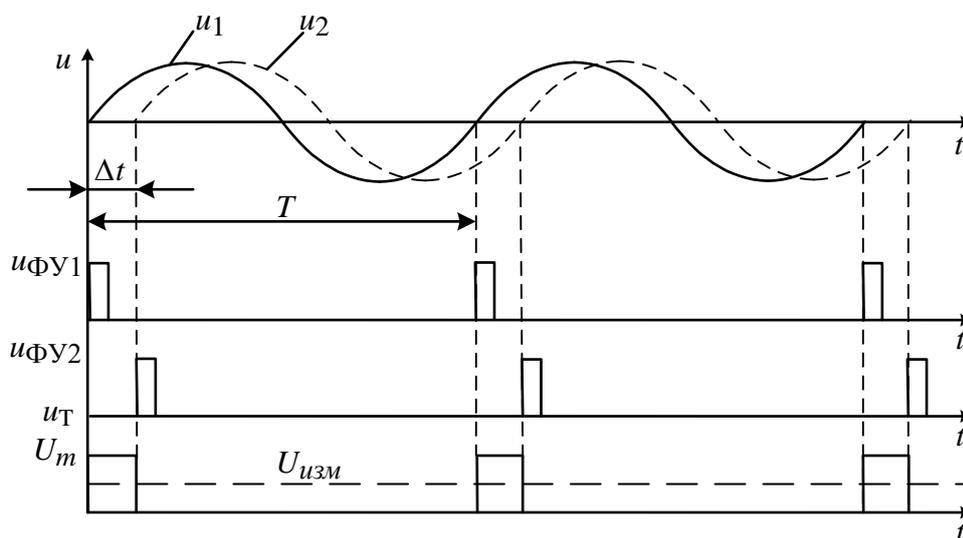


Рис. 8.12. Временные диаграммы напряжений преобразователя

Исследуемые напряжения подаются на два формирующих устройства. В момент перехода входных напряжений u_1 и u_2 через нуль в сторону увеличения на выходах ФУ вырабатываются кратковременные импульсы $u_{\text{ФУ1}}$ и $u_{\text{ФУ2}}$ (рис. 8.12). Импульс $u_{\text{ФУ1}}$, подаваемый на вход S триггера, устанавливает на его выходе постоянное значение U_m . Импульс $u_{\text{ФУ2}}$, пришедший на вход R триггера, сбрасывает выходной сигнал в ноль. Таким образом, на выходе триггера образуется последовательность прямоугольных импульсов u_T с длительностью Δt , пропорциональной фазовому сдвигу, и с периодом T , равным периоду входного сигнала (см. рис. 8.12). Постоянная составляющая сигнала u_T будет пропорциональна измеряемому фазовому сдвигу:

$$U_{\text{изм}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_T(t) dt = \frac{U_m \Delta t}{T} = \frac{U_m \Delta \varphi}{360^\circ}.$$

Если ее измерить вольтметром постоянного тока и подобрать амплитуду импульсов, равной максимальному значению шкалы, то показания вольтметра будут численно совпадать с искомым фазовым сдвигом.

Амплитудный детектор НЧ блока преобразует сигнал измерительного канала в постоянное напряжение, поступающее на логарифмический усилитель и стрелочный прибор. Шкала ослаблений градуирована в децибелах.

В индикаторном блоке предусмотрены 3 диапазона для измерения ослабления: 3, 10 и 30 дБ. На стрелочном индикаторе нанесены 2 шкалы: $-30...30$ для диапазонов 3 и 30 дБ и $-10...10$ для диапазона 10 дБ. При работе в диапазоне 3 дБ показания прибора нужно делить на 10. Для измерения разности фаз предусмотрены 4 поддиапазона: 6, 18, 60, 180° и 2 шкалы: 6 и 18. При работе в диапазонах 60 и 180° показания шкалы нужно умножать на 10.

8.6. Состав лабораторной установки

В лабораторную установку входят измеритель разности фаз ФК2-18 и внешний СВЧ-генератор с диапазоном частот, соответствующим рабочему диапазону волновода 23×10 мм (8...12 ГГц). Генератор СВЧ должен быть соединен с разъемом ВЧ на задней панели прибора ФК2-18. В состав измерительного СВЧ тракта входит измерительная ячейка с исследуемым диэлектриком, а также комплект коаксиально-волноводных переходов с согласующим СВЧ вентилем. Измерительная ячейка представляет собой толстый волноводный фланец – держатель диэлектрического образца (рис.8.13).



Рис. 8.13. Измерительная ячейка с образцом диэлектрика

Исследуемый материал должен полностью заполнять сечение волновода измерительной ячейки. В работе используется набор образцов из диэлектриков с малыми потерями (фторопласт, оргстекло), образцы дерева и поглотитель с

высоким содержанием углерода. Ориентировочные значения параметров этих диэлектриков приведены в таблице 8.1.

8.7. Задание и указания к выполнению работы

8.7.1. Подготовка лабораторной установки к работе

1. Включите прибор ФК2-18 и генератор СВЧ, дайте им прогреться в течение нескольких минут. На генераторе включите ручной режим перестройки частоты *РУЧ*, отключите внутреннюю модуляцию выходного сигнала нажатием кнопки *НГ*. Включите подачу мощности на выходной разъем кнопкой *СВЧ*.

2. Переключатель *ДИАПАЗОН ЧАСТОТ GHz* прибора ФК2-18 установите в положение, соответствующее используемому диапазону частот (8...12 ГГц). Установите на генераторе рабочую частоту, на которой будут выполняться измерения (первая частотная точка) в районе 8 ГГц. Отрегулируйте ручкой *СТАБИЛЬНОСТЬ* режим работы преобразователя так, чтобы индикатор *ОПОРНЫЙ УРОВЕНЬ* прибора ФК2-18 показывал ток в пределах 50...80 мкА. Этим обеспечивается оптимальный режим работы системы ФАПЧ преобразователя.

3. Убедитесь, что исследуемый образец в измерительной ячейке отсутствует и коаксиально волноводные переходы и измерительная ячейка надежно соединены винтами.

Лабораторная установка готова к калибровке СВЧ тракта.

8.7.2. Калибровка прибора ФК2-18

Задача калибровки – устранить систематические погрешности, связанные с наличием фазовых сдвигов в измерительном тракте и неодинаковыми ослаблениями в опорном и измерительном каналах.

1. Сначала выполните калибровку уровня нулевого ослабления. Для этого установите кнопочный переключатель *dB – φ* – в положение 30 дБ;

2. Затем переключателем *ОСЛАБЛЕНИЕ dB* и ручкой *АМПЛИТУДА* установите нулевое показание стрелочного индикатора. Повторите установку нуля на пределах 10 и 3 дБ переключателя *dB – φ*. Запишите «калибровочное» значение ослабления аттенюатора A_K (положение переключателя *ОСЛАБЛЕНИЕ dB*). Прибор откалиброван для измерения модуля коэффициента передачи (ослабления).

3. Проведите калибровку нулевого фазового сдвига. Установите дискретный переключатель *ФАЗА φ°* – в положение 0. На переключателе *dB – φ* нажмите кнопку *180°*. Ручкой *ДЛИНА ОПОРНОГО КАНАЛА (Cm)* блока СВЧ и – при необходимости – ручкой *ФАЗА* измерителя установите нулевое показание

ние стрелочного индикатора. Повторите операцию и уточните калибровку на пределах 60, 18 и 6° переключателя $dB - \varphi$. Прибор откалиброван для проведения фазовых измерений.

Обратите внимание, что **калибровку прибора следует повторять на каждой частоте измерений**. При этом исследуемый образец в измерительной ячейке должен отсутствовать.

8.7.3. Измерение модуля и фазы коэффициента передачи измерительной ячейки с исследуемым диэлектриком

Измерьте модуль и фазу коэффициента передачи ячейки с диэлектрическим образцом. В работе могут быть использованы 2 образца из фторопласта, 1 – из оргстекла, два деревянных и один – поглотитель. По указанию преподавателя выберите три образца:

- вариант №1 – фторопласт 23мм, дерево 12мм, поглотитель 8мм;
- вариант №2 – фторопласт 15мм, дерево 25 мм, поглотитель 8 мм;
- вариант №3 – оргстекло 13мм, дерево 25 мм, поглотитель 8 мм.

1. Убедитесь, что измерительная установка находится в исходном состоянии. Уровни ослабления и фазового сдвига на данной частоте находятся в нуле, исследуемый образец в измерительной ячейке отсутствует.

2. Убедитесь, что переключатель **ФАЗА φ°** установлен в исходное (нулевое) положение.

3. Восстановите положение аттенюатора A_K , зафиксированное при калибровке («калибровочное» значение ослабления аттенюатора **ОСЛАБЛЕНИЕ dB**).

4. Установите в ячейку первый исследуемый образец. Он должен быть помещен по центру переходного фланца так, чтобы диэлектрик не застревал в волноводе. Выполните грубое измерение фазового сдвига, вносимого диэлектрическим образцом. Для этого используйте максимальный диапазон измерения фазы (на переключателе $dB - \varphi$ нажмите кнопку 180°). Искомый фазовый сдвиг $\Delta\varphi_{exp}$ отсчитывается непосредственно по шкале ($\Delta\varphi_{exp} = \varphi_{шк}$) с учетом знака.

5. Для точного измерения используйте метод замещения (компенсационный метод). Переключением встроенного дискретного фазовращателя **ФАЗА φ°** добейтесь расположения стрелки вблизи нулевого значения шкалы. Полярность вносимого образцового сдвига меняют тумблером индикатора «±». Далее переключите шкалу в положение 18° (при возможности – и в положение 6°) и отчитайте остаточное значение фазового сдвига по шкале $\varphi_{шк}$ (показания стрелоч-

ного индикатора). Точное значение измеряемого фазового сдвига равно $\Delta\varphi_{exp} = \varphi_{шк} \pm \varphi_{ФВ}$, где $\varphi_{ФВ}$ – показание переключателя **ФАЗА** φ° с учетом знака тумблера « \pm ». После измерения верните переключатель **ФАЗА** φ° в исходное (нулевое) положение. Результаты грубого и точного измерений сведите в табл. 8.2.

6. Измерьте ослабление в диэлектрическом образце, для чего поставьте переключатель **dB** – φ в минимальное положение 3 дБ и отсчитайте значение модуля коэффициента передачи [дБ] по шкале прибора. Ослабление будет равно модулю коэффициента передачи с обратным знаком $\Delta A_{exp} = -|S_{21}|$, $\partial B = -A_{шк}$.

Обратите внимание, что $|S_{21}|$, дБ = $20 \cdot \lg(|S_{21}|)$ для пассивной цепи всегда ≤ 0 . Следовательно ослабление ΔA_{exp} , дБ = $-|S_{21}|$, ∂B всегда должно быть больше нуля!

7. Если ослабление велико, то для уточнения результата целесообразно использовать *метод замещения* с использованием калиброванного аттенюатора прибора. При этом для грубой оценки ослабления используйте шкалу 30 дБ. Если прибор «зашкаливает», то увеличьте ослабление $A_{атт}$ аттенюатора **ОСЛАБЛЕНИЕ dB** блока СВЧ до тех пор, пока стрелка не примет значение как можно ближе к нулю. Затем установите переключателем **dB** – φ минимальный предел измерения ослабления 3 дБ и повторите измерение. В этом случае искомое ослабление ΔA_{exp} определяется выражением $\Delta A_{exp} = /A_{атт} - A_{к} / - A_{шк}$ [дБ], где $A_{шк}$ – показание стрелочного индикатора (с учетом знака). Результаты грубого и точного измерений для данного образца сведите в табл. 8.2.

Таблица 8.2

f , ГГц	$\Delta\varphi_{exp} = \arg S_{21}$, °		$\Delta A_{exp} = - S_{21} $, дБ		ε	$tg\delta$
	Грубо	Точно	Грубо	Точно		
Материал: _____, L=___мм			$A_{к} =$			

NB! После измерения коэффициента передачи методом замещения не забудьте восстановить на аттенюаторе **ОСЛАБЛЕНИЕ dB** величину калибровочного ослабления $A_{к}$ и исходное (нулевое) положение переключателя **ФАЗА** φ° .

8. Включите компьютер и запустите программный калькулятор обработки опытных данных **eps.mcd**. Введите полученные данные ΔA_{exp} и $\Delta\varphi_{exp}$ в программу и проведите предварительную оценку диэлектрической проницаемости

и фактора потерь по методике, рассмотренной в п. 8.4. Сравните его с табличными значениями. В случае сильного расхождения (например, при получении отрицательного фактора потерь) повторите калибровку и измерения.

Аналогичным образом проведите исследование остальных образцов варианта задания.

9. Повторите калибровку и измерения для всех образцов на частотах порядка 9, 10 и 11 ГГц. Постройте графики частотных зависимостей параметров исследованных образцов.

8.7.3. Измерение длины волны и частоты сигнала СВЧ (по указанию преподавателя)

Наличие в амплифазометре плавного калиброванного трамбонного фазовращателя – линии переменной длины L с линейной фазочастотной характеристикой позволяет измерить длину волны, а, следовательно, и частоту входного сигнала. Величина L определяет вносимый фазовращателем сдвиг фазы на частоте f :

$$\Delta\phi = kL = \frac{360^\circ}{\lambda} L = \frac{360^\circ f \cdot L}{(2.998 \cdot 10^{-8})}$$

Отсюда следует, что при длине фазовращателя, равной длине волны, вносимый фазовый сдвиг ФВ будет равен 360° .

Методика измерения длины волны следующая.

1. Установите частоту порядка 10 ГГц и запишите ее в таблицу 8.3. Запишите также показания шкалы фазовращателя ДЛИНА ОПОРНОГО КАНАЛА (См) L_1 , установленного при калибровке прибора по нулевому фазовому сдвигу.

Таблица 8.3

$f_{\text{ген}}, \text{ ГГц}$	
$L_1, \text{ см}$	
$L_2, \text{ см}$	
$\lambda, \text{ см}$	
$f_{\text{измер}}, \text{ ГГц}$	
$\delta f/f_{\text{ген}}, \%$	

2. На переключателе $dB - \phi$ установите предел 180° и, вращая ручку ДЛИНА ОПОРНОГО КАНАЛА (См) в одну сторону, контролируйте положение

стрелки индикатора – она должна монотонно отклоняться в одну сторону до предела шкалы, затем скачком перейти к другому пределу и плавно перейти к нулевому показанию. Цель данного шага измерения подобрать такое положение фазовращателя, когда стрелка индикатора вновь будет указывать на сдвиг 0° .

3. Последовательно переходя на более узкие пределы (до 6°), установите точное положение фазовращателя, соответствующее нулевому фазовому сдвигу.

4. Запишите второе показание *ДЛИНА ОПОРНОГО КАНАЛА (См) L_2* . Удвоенная разность зафиксированных показаний $\Delta L = \lambda = 2 \times |L_2 - L_1|$ соответствует длине линии, обеспечивающей на рабочей частоте фазовый сдвиг 360° . Эта удвоенная разность и есть длина волны λ входного колебания.

Обратите внимание, что поскольку для изменения электрической длины линии опорного сигнала используется U-образная (тромбонная) линия задержки, значение на цифровом индикаторе нужно всегда умножить на 2.

5. Рассчитайте значение рабочей частоты $f_{\text{измер}}$ по формуле

$$f_{\text{измер}}[\text{ГГц}] = 29.98 / \lambda[\text{см}].$$

6. Сравните полученный результат со значением частоты $f_{\text{ген}}$ на генераторе и определите погрешность ее установки ($\delta f / f_{\text{ген}}$).

$$\delta f = \frac{\Delta f}{f_{\text{ген}}} = \frac{|f_{\text{измер}} - f_{\text{ген}}|}{f_{\text{ген}}} \cdot 100\%$$

8.7.5. Обработка опытных данных и расчет параметров диэлектрика

1. Для окончательной обработки полученных данных повторно используйте программный калькулятор **eps.mcd**. Введя экспериментально полученные изменения ослабления ΔA_{exp} и фазы коэффициента передачи $\Delta \varphi_{\text{exp}}$ при помещении диэлектрика в ячейку, найдите диэлектрическую проницаемость исследуемого материала и его фактор потерь. Для этого необходимо подобрать начальные значения вещественной и мнимой частей проницаемости, близкие к ожидаемым.

2. Для диэлектриков с малыми потерями целесообразно применить двухэтапный поиск: сначала по данным фазовых измерений определяется приближенное значение диэлектрической проницаемости (без учета потерь), затем это значение подставляется в качестве начального в блок поиска окончательного решения.

3. Проверьте полученное решение, построив частотную зависимость модуля и фазы коэффициента передачи измерительной ячейки с диэлектриком и без него в модели MW Office (**waveguide_eps.emp**). Методика моделирования подробно описана в п. 8.4. Используйте полученные опытным путем параметры диэлектрика. Сравните рассчитанные на модели изменения ослабления и фазы с полученными в эксперименте ΔA_{exp} и $\Delta \varphi_{exp}$ на тех же частотах, на которых проводились измерения.

8.8. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- протокол измерений;
- структурную схему лабораторной установки;
- структурную схему расчетной модели измерительного тракта в MW Office;
 - таблица 8.2 с результатами измерений и расчетов диэлектрической проницаемости исследуемых материалов и их фактора потерь;
 - таблица 8.3 с результатами измерения длины волны;
 - графики зависимостей параметров диэлектрика от частоты, частотной зависимости модуля и фазы коэффициента передачи измерительной ячейки с диэлектриком и без него в модели MW Office;
 - сравнение полученных расчетным путем в MW Office изменений ослабления ΔA_{exp} и фазы $\Delta \varphi_{exp}$ с полученными в эксперименте на тех же частотах, на которых проводились измерения.

8.9. Контрольные вопросы

1. Укажите назначение амплифазометра ФК2-18. Какие измерительные задачи можно решать с его помощью?
2. Для чего в состав амплифазометра включен плавный фазовращатель? Как с его помощью измеряют частоту входного сигнала? Почему показания цифрового индикатора длины опорного канала нужно умножать на 2?
3. Как производится калибровка амплифазометра по модулю и фазе коэффициента передачи?
4. Для чего в приборе ФК2-18 используют стробоскопическое преобразование частоты? В чем преимущества такого способа по сравнению с традиционным преобразователем частоты?
5. Почему в преобразователе частоты ФК2-18 используют в качестве гетеродина импульсный генератор, а не генератор гармонического сигнала? Почему длительность импульса выбирают очень малой (доли нс)?
6. Каким методом производят измерение фазового сдвига после преобразования частоты на НЧ?
7. В каких случаях используют метод замещения при измерении ослабления и фазового сдвига прибором ФК2-18?
8. Чем отличается амплифазометр СВЧ от измерителя комплексных коэффициентов передачи СВЧ устройств вида P4?
9. Чем определяется точность измерения и погрешность фазового сдвига в приборе ФК2-18?
10. За счет чего амплифазометр ФК2-18 позволяет измерять модуль и аргумент коэффициента передачи независимо от рабочей частоты внешнего генератора?
11. Почему в приборе ФК2-18 используется 4 поддиапазона измерения фаз и 3 предела измерения амплитуд? Что означают разные числовые шкалы, нанесенные на индикаторе прибора? Приведите пример снятия показаний со стрелочного индикатора.
12. Для чего в приборе ФК2-18 используют ступенчатый аттенюатор и фазовращатель?
13. Какие параметры диэлектриков необходимо измерять на СВЧ?
14. В чем разница «резонаторного» и «волноводного» методов измерения параметров диэлектриков на СВЧ? Укажите области применения этих методов.
15. Как обрабатывают данные измерения модуля и фазы коэффициента передачи для определения параметров диэлектрика?

Литература

1. Данилин А.А. Измерения в радиоэлектронике сверхвысоких частот: Учеб. пособие для вузов.- СПб: Лань, 2025.-348с.
2. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ: Учеб.пособие для вузов.- М.: Радиотехника, 2008.-184с.
3. Воскресенский Д.,М., Данилин А.А., Сосновский В.А. Измерения на СВЧ:лаб. Практикум /Под. ред. А.А. Данилина.- Спб.: Изд.СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021.- 112с.
4. Данилин А.А. , Лавренко Н.С. Измерения в радиоэлектронике: Учебное пособие /Под. ред. А.А. Данилина - Спб.: Изд-во «Лань», 2017. -408с
5. Силаев М.А. Брянцев С.Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. - М.: Сов. Радио, 1970.
6. Будурис Ж. Шеневье П. Цепи сверхвысоких частот. - М.: Сов. Радио, 1979.
7. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1981 -295с.
8. Микроэлектронные устройства СВЧ. Под ред. Г.И. Веселова , 1988-280с.
9. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи.

Оглавление

8. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА СВЧ	2
8.1. Общие вопросы измерения параметров диэлектриков	2
8.2. Методы измерения параметров диэлектриков	3
8.3. Волноводный метод измерения параметров диэлектриков	4
8.4. Математическое моделирование измерительной ячейки.....	5
8.5. Технические характеристики амплифазометра ФК2-18	9
8.6. Состав лабораторной установки.....	14
8.7. Задание и указания к выполнению работы.....	16
8.7.1. Подготовка лабораторной установки к работе	16
8.7.2. Калибровка прибора ФК2-18.....	16
8.7.3. Измерение модуля и фазы коэффициента передачи измерительной ячейки с исследуемым диэлектриком	17
8.7.5. Обработка опытных данных и расчет параметров диэлектрика.....	20
8.8. Содержание отчета.....	22
8.9. Контрольные вопросы	23
Литература	24