

Министерство образования Российской Федерации
Тамбовский государственный технический университет

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Методические указания по выполнению лабораторных работ
для студентов всех форм обучения специальности 200800

Тамбов
• Издательство ТГТУ •
2003

УДК 696:28.342
ББК 32.85к65
Т38

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Рецензент
профессор *Н.Я. Молотков*

Техническая электродинамика: Метод. указания / Сост. Н.А. Малков. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – 32 с.

Даны методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Техническая электродинамика» по программе ГОС-2, в которой изучаются методы измерения параметров электромагнитного поля и принципы действия устройств сверхвысоких частот, их основные параметры и конструкции.

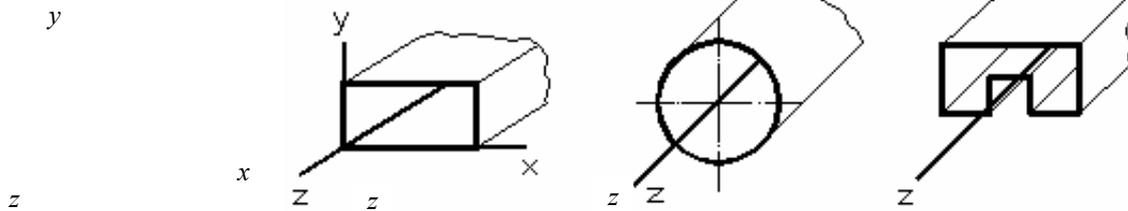
Методические указания предназначены для студентов специальности 200800.

УДК 696:28.342
ББК 32.85к65

© Тамбовский государственный
2003

технический университет (ТГТУ),

ТЕХНИЧЕСКАЯ
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА



• *ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ* •

Учебное издание

**ТЕХНИЧЕСКАЯ
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА**

Методические указания

Составитель
МАЛКОВ Николай Аркадьевич

Редактор Т. М. Глинкина

Компьютерное макетирование И. В. Евсеевой

Подписано к печати 29.04.2003

Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага газетная
Печать офсетная. Объем: 1,86 усл. печ. л.; 1,7 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. С. 307

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

Лабораторная работа № 1

Исследование волн типа Т в длинных линиях

Цель работы:

- 1 Изучить линии передач, работающие на волнах типа Т [1, 2, 5].
- 2 Приобрести навыки по исследованию структуры поля и определению сопротивления линии.

Содержание работы:

- 1 Исследовать распределение напряжения и тока вдоль линии.
- 2 Определить входное сопротивление с помощью круговой диаграммы полных сопротивлений.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1.1 Разновидности длинных линий

Линии передачи, содержащие не менее двух параллельных проводников, называются длинными линиями. Некоторые их разновидности представлены на рис. 1.1.

В линиях, полностью заполненных диэлектриком, волной основного типа является волна Т (ТЕМ), которая характеризуется следующими свойствами: 1) скорость ее распространения равна скорости света в среде, заполняющей линию; 2) электрическое и магнитное поля чисто поперечны и имеют статический характер в плоскостях, перпендикулярных оси линии; 3) критическая частота равна нулю, так что с помощью Т-волн можно передавать энергию на любых частотах, в том числе и на нулевой (постоянный ток) [1, 2].

В линиях, частично заполненных диэлектриком (рис. 1.1, з), Т-волна существовать не может; однако волна основного типа

в таких линиях обычно близка по свойствам к Т-волне (квази-Т-волна).

1.2 Распределения напряжения и тока вдоль линии.

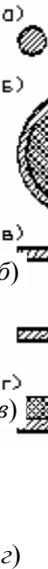
Входное сопротивление

1.2.1 В линии, на одном конце которой включен генератор, а на другом – нагрузка с сопротивлением z_k (рис. 1.2), в общем случае имеются две бегущие волны – падающая, которая распространяется от генератора к нагрузке, и отраженная, идущая в противоположном направлении. Если координату z отсчитывать от места подключения нагрузки (см. рис. 1.2), то распределения комплексных амплитуд напряжения и тока в линии представляются следующими суммами падающих и отраженных волн напряжения и тока:

$$\dot{U}(z) = \dot{U}_n e^{ikz} + \dot{U}_o e^{-ikz} = \dot{U}_n e^{ikz} [1 + \dot{\Gamma}(z)];$$

$$\dot{I}(z) = \dot{I}_n e^{ikz} + \dot{I}_o e^{-ikz} = \frac{\dot{U}}{\rho_{л}} e^{ikz} - \frac{\dot{U}}{\rho_{л}} e^{-ikz} = \frac{\dot{U}}{\rho_{л}} e^{ikz} [1 + \dot{\Gamma}(z)], \quad (1.1)$$

где $\rho_{л}$ – входное сопротивление линии.



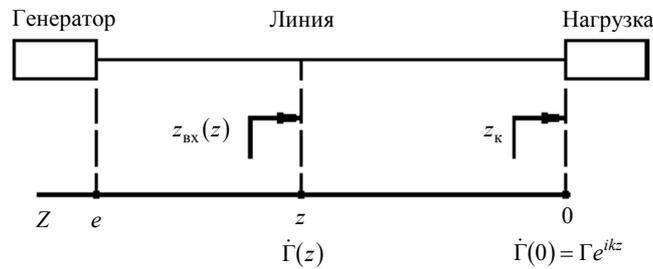


Рис. 1.2 Система генератор – линия – нагрузка

Отношение комплексных амплитуд напряжения отраженной и падающей волн в сечении z :

$$\dot{\Gamma}(z) = \frac{\dot{U}_0 e^{-ikz}}{\dot{U}_n e^{ikz}} = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_n} e^{-i2kz} = \dot{\Gamma}(0) e^{-i2kz} \quad (1.2)$$

называется коэффициентом отражения по напряжению. Входное сопротивление линии в сечении z связано с $\dot{\Gamma}(0)$ соотношением

$$z_{\text{вх}}(z) = \frac{\dot{U}(z)}{\dot{I}(z)} = \rho_{\text{л}} \frac{1 + \dot{\Gamma}(z)}{1 - \dot{\Gamma}(z)}, \quad (1.3)$$

из которого вытекает связь между $\dot{\Gamma}(0)$ и $z_{\text{н}}$:

$$\dot{\Gamma}(0) = \Gamma e^{i\varphi} = \frac{z_{\text{н}} - \rho_{\text{л}}}{z_{\text{н}} + \rho_{\text{л}}}.$$

1.2.2 Важными для практики являются случаи согласованной, короткозамкнутой и разомкнутой линий.

1.2.2.1 Согласованная линия: $z_{\text{к}} = \rho_{\text{л}}$; $\dot{\Gamma}(0) = 0$.

$$\dot{U}(z) = \dot{U}_n e^{ikz}; \quad \dot{I}(z) = \frac{\dot{U}_n}{\rho_{\text{л}}} e^{ikz}; \quad z_{\text{вх}} = \rho_{\text{л}}.$$

В согласованной линии имеет место режим бегущей волны, а входное сопротивление чисто вещественно и равно $\rho_{\text{л}}$.

1.2.2.2 Короткозамкнутая линия: $z_{\text{к}} = 0$; $\dot{\Gamma}(0) = -1$,

$$\dot{U}(z) = 2i\dot{U}_n \sin kz; \quad \dot{I}(z) = \frac{2\dot{U}_n}{\rho_{\text{л}}} \cos kz; \\ z_{\text{вх}}(z) = i\rho_{\text{л}} \operatorname{tg} kz.$$

1.2.2.3 Разомкнутая линия: $z_{\text{к}} = \infty$; $\dot{\Gamma}(0) = 1$;

$$\dot{U}(z) = 2\dot{U}_n \cos kz; \quad \dot{I}(z) = i \frac{2\dot{U}_n}{\rho_{\text{л}}} \sin kz; \quad z_{\text{вх}}(z) = -i\rho_{\text{л}} \operatorname{ctg} kz.$$

В короткозамкнутой и разомкнутой линиях устанавливаются стоячие волны напряжения и тока ($\cos kz$, $\sin kz$); входные сопротивления при любых z чисто мнимы.

1.2.3. Если на конце линии подключена произвольная комплексная нагрузка, то вдоль линии устанавливается режим смешанных волн. Распределения напряжения, тока и входного сопротивления легко

выявить, рассматривая функции $i \pm \dot{\Gamma}(z)$, входящие в формулы (1.1). На комплексной плоскости (рис. 1.3) первое слагаемое этих функций – единичный вещественный вектор, слагаемое $\dot{\Gamma}(z) = \Gamma e^{i\varphi} e^{-i4\pi z/\lambda}$ – вектор длиной Γ , ориентированный под углом $\varphi - \frac{4\pi z}{\lambda}$ к вещественной оси. Суммы $1 \pm \dot{\Gamma}(z)$ (аналогии напряжения и тока) будут при этом изменяться по модулю и фазе. Нетрудно убедиться в следующем:

а) Графики $|1 \pm \dot{\Gamma}(z)|$ (т.е., по существу, амплитудные распределения напряжения и тока) представляют собой идентичные периодические функции с периодом $\lambda/2$, сдвинутые друг относительно друга на $\lambda/4$.

б) В сечениях линии, где коэффициент отражения чисто веществен и положителен ($\dot{\Gamma}(z) = \Gamma$), наблюдается максимум напряжения и минимум тока.

В сечениях, где $\dot{\Gamma}(z) = -\Gamma$, ситуация противоположная.

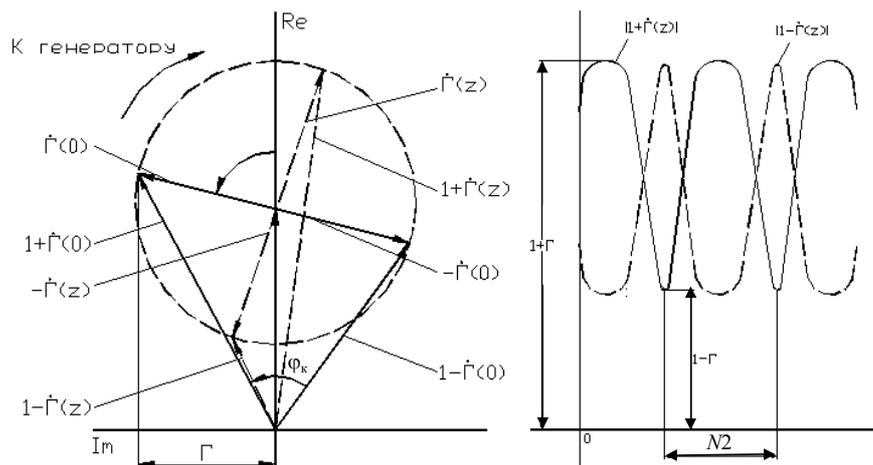


Рис. 1.3 Векторная диаграмма функций $1 \pm \dot{\Gamma}(z)$

в) Входное сопротивление линии в точках максимума $\dot{U}(z)$ чисто вещественно и больше $\rho_{л}$, в точках минимума вещественно и меньше $\rho_{л}$. Это легко видеть из формулы (1.3).

г) В точках линии, где $1 + \dot{\Gamma}(z)$ определяет по фазе $1 - \dot{\Gamma}(z)$, входное сопротивление комплексно и имеет индуктивную реакцию. В точках линии, где $1 + \dot{\Gamma}(z)$ отстает от $1 - \dot{\Gamma}(z)$, входное сопротивление комплексно и имеет емкостную реакцию.

д) Коэффициент бегущей волны в линии, определяемый как отношение

$$K_{бв} = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}, \quad (1.5)$$

связан с модулем коэффициента отражения Γ простым соотношением

$$K_{бв} = \frac{1-\Gamma}{1+\Gamma}. \quad (1.6)$$

1.2.4 По экспериментально снятой кривой распределения $U(z)$, зная, кроме того, $\rho_{л}$, можно определить нагрузочное сопротивление $z_{к}$.

По экспериментальным значениям U_{\min} и U_{\max} вычисляется $K_{бв}$ по формуле (1.5) и затем по формуле (1.6) Γ . На комплексной плоскости строится окружность радиуса Γ с центром в точке +1. Затем рассчитывается величина

$$|1 + \dot{\Gamma}(0)| = \frac{2U(0)}{U_{\max} + U_{\min}}. \quad (1.7)$$

Из начала координат проводится окружность радиуса $|1 + \dot{\Gamma}(0)|$, находятся ее точки пересечения с ранее построенной окружностью радиуса Γ . Если по экспериментальной кривой напряжение при удалении от конца линии возрастает (как на рис. 1.3), то концу линии соответствует левая точка пересечения, если

напряжение падает, то правая. Выбрав нужную точку пересечения, легко построить векторы $1 + \dot{\Gamma}(0)$ и $1 - \dot{\Gamma}(0)$; при этом определится угол φ_k (см. рис. 1.3). Вещественную и мнимую части z_k можно рассчитать по формулам

$$R_k = \rho_{\text{л}} \frac{|1 + \dot{\Gamma}(0)|}{|1 - \dot{\Gamma}(0)|} \cos \varphi_k; \quad X_k = \rho_{\text{л}} \frac{|1 + \dot{\Gamma}(0)|}{|1 - \dot{\Gamma}(0)|} \sin \varphi_k. \quad (1.8)$$

При этом $\varphi_k > 0$, если $|1 + \dot{\Gamma}(0)|$ опережает $|1 - \dot{\Gamma}(0)|$, и $\varphi_k < 0$ – в противоположном случае.

1.3 Круговая диаграмма полных сопротивлений

1.3.1 Диаграмма (монограмма) полных сопротивлений (рис. 1.4, а) содержит три семейства кривых, построенных в единичном круге на плоскости комплексного коэффициента отражения. Первое – семейство равных Γ или равных $K_{\text{бв}}$ (концентрические окружности с центром в начале координат). Перемещение по любой из таких линий соответствует вращению вектора $\dot{\Gamma}$, т.е. переходу от точки к точке вдоль длинной линии. На периферии единичного круга для удобства пользования нанесены шкалы, по которым можно отсчитывать эти перемещения в долях длины волны.

1.3.2 Поскольку каждой точке единичного круга соответствует определенный коэффициент отражения $\dot{\Gamma}$, то, в силу формулы (1.3), ей соответствует также определенное комплексное входное сопротивление

$Z = R + iX$. Его активная и реактивная части, нормированные к $\rho_{\text{л}}$, вычисляются по следующим формулам:

$$\frac{R}{\rho_{\text{л}}} = \operatorname{Re} \frac{1 + \dot{\Gamma}}{1 - \dot{\Gamma}}; \quad \frac{X}{\rho_{\text{л}}} = \operatorname{Im} \frac{1 + \dot{\Gamma}}{1 - \dot{\Gamma}}.$$

С помощью этих формул внутри единичного круга построены семейства линий $R/\rho_{л} = \text{const}$ и $X/\rho_{л} = \text{const}$.

1.3.3 Поскольку в точках максимума напряжения коэффициент отражения веществен и положителен, нижняя часть вещественной оси на круговой диаграмме является линией максимумов напряжения и минимумов напряжения и максимумов тока.

1.3.4 Пусть на конце линии подключена нагрузка с неизвестным сопротивлением z_k . Покажем, как найти z_k , зная распределение $U(z)$ и используя круговую диаграмму. Заметим, что входное сопротивление, равное z_k , будет наблюдаться также во всех сечениях линии, отстоящих от ее конца на расстоянии целого числа полуволн. На рис. 1.4, б показано одно такое сечение, обозначенное цифрой 2.

Обратимся к кривой распределения напряжения (сплошная линия на рис. 1.4, б). Ее минимум (сечения 1) в общем случае смещен в ту или иную сторону относительно сечения 2 на расстояние Δl (на рис. 1.4, б – к генератору). Если совершить вдоль линии переход от сечения 1 к сечению 2, то, очевидно, придем в точку, в которой $z_{вх} = z_k$. Этот переход и следует выполнить на круговой диаграмме. Сечения 1 изображается на ней точкой пересечения линии U_{\min} и линии $K_{бв} = \frac{U_{\min}}{U_{\max}}$ (точки 1 на диаграмме). Перехо-

ду от сечения 1 к сечению 2 соответствует перемещение на диаграмме по линии $K_{бв} = \text{const}$ на расстояние $\Delta l/\lambda$, которое отсчитывается по внешней шкале диаграммы. При этом, если минимум 1 сдвинут относительно точки 2 к генератору, то перемещение по диаграмме следует вести к нагрузке и наоборот. Иначе говоря, по диаграмме нужно двигаться в сторону, противоположную смещению минимума.

В конечном счете приходим в точку 2' и считываем с проходящих через нее линий значения $R_k/\rho_{л}$ и $X_k/\rho_{л}$. Для определения на шкале линии точки, соответствующей положению зонда в узле стоячей волны ($n\lambda/2$ от конца линии), линию на конце закорачивают, затем, перемещая каретку находят узел напряжения и считывают соответствующее показание со шкалы перемещений линии. Относительно этой точки и определяют в дальнейшем смещение Δl .

1.4 Лабораторная установка

Структурная схема установки изображена на рис. 1.5.

При определении напряжения и $K_{бв}$ следует учитывать, что показания прибора измерительного усилителя квадратичны отношению к измеряемо-



Рис. 1.5 Структурная схема лабораторной установки

му напряжению, ввиду квадратичности детектора измерительной линии. Поэтому $K_{\text{бв}} = \frac{a_{\text{min}}}{a_{\text{max}}}$, где a – отсчет по шкале прибора.

1.5 Задание и указания к выполнению работы

1.5.1 Ознакомиться с лабораторной установкой и дополнительными указаниями по работе с приборами. Включить генератор и измерительный усилитель. Настроить генератор на частоту, заданную преподавателем. Настроить линию на максимум показаний.

1.5.2 Снять распределение напряжения вдоль линии в режиме короткого замыкания на участке не менее длины волны через $0,1\lambda$. Определить λ , как удвоенное расстояние между соседними минимумами.

1.5.3 Установить каретку линии в положение U_{min} . Заменить КЗ заглушку коаксиальным плунжером и установить такую его длину, при которой по прибору снова будет наблюдаться минимум. При этом электрическая длина плунжера будет равна целому числу $\lambda/2$.

1.5.4 Увеличив длину плунжера на величину $l < \lambda/4$, снять распределение напряжения в линии левее условного конца на отрезке в $\lambda/2$. Используя методику 1.2.4, рассчитать величину сопротивления нагрузки и убедиться, что она имеет величину $Z_{\text{н}} = i\rho_{\text{л}} \operatorname{tg} kl$.

1.5.5 Повторить эксперимент и расчет п. 1.5.4 для $\lambda/4 < l < \lambda/2$.

1.5.6 Снять распределение напряжения вдоль линии, разомкнутой на конце, на расстоянии не менее λ примерно через $0,05\lambda$.

1.5.7. Снять распределение напряжения вдоль линии, нагруженной на сопротивление, близкое к волновому.

1.5.8. Включить на конце линии комплексную нагрузку, измерить ее сопротивление методом «смещения минимума и измерения $K_{\text{бв}}$ », описанным в п. 1.3.4.

Для более точного определения $K_{\text{бв}}$, с целью исключения влияния неточно известной характеристики детектора, можно воспользоваться методом калиброванного аттенюатора. Для этого, поставив каретку линии в минимум напряжения, установить по измерительному прибору усилителя какой-нибудь удобно фиксируемый отсчет a . Затем, переместив каретку в положение максимума напряжения и увеличивая затухание калиброванного аттенюатора, установить стрелку прибора в прежнее положение a . По градуировочной кривой найти разницу затуханий аттенюатора в максимуме и минимуме напряжений. Разделив эту разность на 20, получим $\lg 1/K_{\text{бв}}$.

1.6 Содержание отчета

- 1 Структурная схема установки.
- 2 Графики и таблицы экспериментальных данных по всем пунктам задания.
- 3 Векторные диаграммы по п. 1.5.4 и 1.5.5.
- 4 Расчет сопротивления на конце линии по п. 1.5.4, 1.5.7, 1.5.8.

1.7 Контрольные вопросы

- 1 Назовите характерные особенности волн типа Т (ТЕМ).
- 2 По какому закону изменяется вдоль линии коэффициент старения?
- 3 Как связаны друг с другом коэффициент отражения и входное сопротивление в произвольном сечении линии?
- 4 Назовите характерные особенности режима согласованной линии.
- 5 Назовите характерные особенности режимов короткозамкнутой и разомкнутой линии.
- 6 Каковы фазы коэффициента отражения в точках минимума и максимума напряжения?

- 7 Почему в точках максимумов и минимумов входные сопротивления линии чисто активны?
- 8 Как, зная Γ и пользуясь векторной диаграммой, выяснить знак реактивной составляющей входного сопротивления?
- 9 Что такое коэффициент бегущей волны?
- 10 Как, пользуясь экспериментально снятой зависимостью $U(z)$, найти величину нагрузочного сопротивления?

Лабораторная работа № 2

Исследование волн в волноводах

Цель работы:

- 1 Изучить особенности электромагнитных волн в волноводах [1, 2, 5].
- 2 Исследовать структуру электромагнитного поля в волноводах при разных нагрузках.

Содержание работы:

исследовать структуру электромагнитного поля в волноводах при падающих и отраженных волнах при различных нагрузках.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

2.1 Особенности электромагнитных волн в волноводах

2.1.1 Волноводами называют линии передачи СВЧ, представляющие собой металлические трубы прямоугольного, круглого и других сечений (рис. 2.1). Собственные волны однородного по длине волновода разделяются на два класса: H (ТЕ)-волны и E (ТМ)-волны или волны магнитного (H) и электрического (E) типа. Оба класса содержат бесконечное множество модов или типов волн (H_{nm}, E_{nm}) [1, 2].

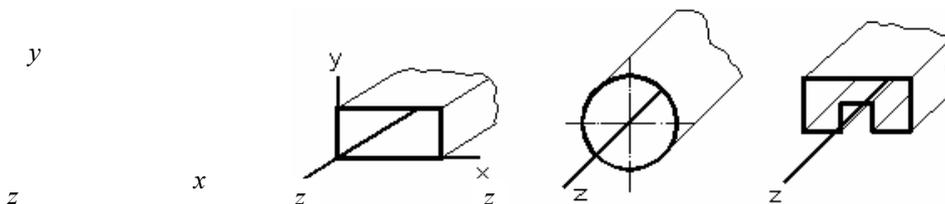


Рис. 2.1 Волноводы прямоугольного, круглого и П-образного сечений

Структура электромагнитного поля волн класса H характерна наличием продольной составляющей \vec{H}_z и отсутствием продольной составляющей \vec{E}_z ($H_z \neq 0, E_z = 0$). У волн класса E , наоборот $H_z = 0, E_z \neq 0$.

2.1.2 Зависимость от z всех компонент электромагнитного поля волноводных волн – экспоненциальная:

$$\vec{E}(x, y, z) = \hat{E}(x, y)e^{\pm iK_z z}; \quad \vec{H}(x, y, z) = \hat{H}_{\pm}(x, y)e^{\pm iK_z z} \quad (2.1)$$

(знак \wedge указывает на независимость соответствующей функции от z).

Величина K_z , входящая в показатель экспоненты $e^{\pm iK_z z}$, называется продольным волновым числом и для любого полноводного мода представляется формулой

$$K_z = \sqrt{K^2 - K_t^2} = \sqrt{\omega^2 \epsilon \mu - K_t^2} . \quad (2.2)$$

Величина K_t (поперечное волновое число) зависит от размеров поперечного сечения волновода и типа волны. При этом, чем выше тип волны, тем больше поперечное волновое число. Волны, у которых $K_t = 0$, в волноводах существовать не могут.

Если K_z вещественно ($\omega^2 \varepsilon \mu > K_t^2$), то волна распространяется по волноводу. Длина волны λ_b и фазовая скорость распространения V_ϕ связаны с K_z соотношением

$$\lambda_b = \frac{2\pi}{K_z} = \frac{2\pi}{\sqrt{K^2 - K_t^2}}; \quad V_\phi = \frac{\omega}{K_z} = \frac{\omega}{\sqrt{K^2 - K_t^2}}. \quad (2.3)$$

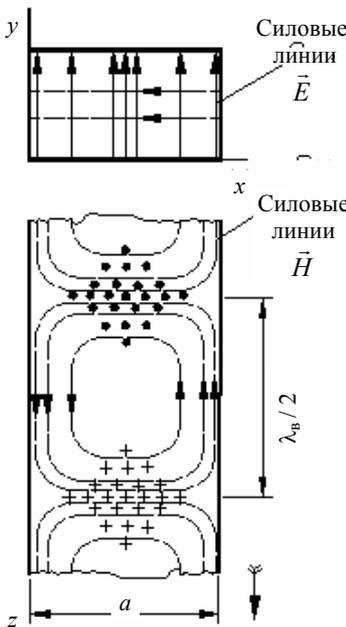
Поскольку $K_z = \sqrt{K^2 - K_t^2} < K$, фазовая скорость V_ϕ больше, чем скорость света в свободном пространстве $C = \omega/K$. Таким образом, волноводные волны являются «быстрыми». Длина волны в волноводу λ_b по той же причине больше длины волны $\lambda = 2\pi/K$ в свободном пространстве. Если K_z мнимо ($\omega^2 \varepsilon \mu < K_t^2$), то экспоненциальный множитель в формуле (2.1) становится вещественной экспонентой: $e^{\pm iK_z z} = e^{\mp |K_z| z}$. Волна при этом не распространяется, не бежит вдоль волновода. Ее амплитуда в зависимости от z монотонно увеличивается или уменьшается.

2.1.3 Частота, при которой $K_z = 0$ ($\omega \sqrt{\varepsilon \mu} = K_t$), называется критической ($\omega_{кр}$) для данного мода. На частотах ниже $\omega_{кр}$ этот мод не распространяется, на частотах $\omega > \omega_{кр}$ – распространяется. Критическая частота пропорциональна поперечному волновому числу:

$$\omega_{кр} = \frac{K_t}{\sqrt{\varepsilon \mu}}. \quad (2.4)$$

Критической длиной волны $\lambda_{кр}$ называется длина волны в свободном пространстве, соответствующая критической частоте:

$$\lambda_{кр} = \frac{2\pi}{K_t}. \quad (2.5)$$



Волноводный мод, обладающий наименьшим значением поперечного волнового числа среди всех модов данного волновода, называется волной основного типа. Он имеет также наименьшую критическую частоту.

2.1.4 Наиболее употребительными в практике СВЧ являются волноводы прямоугольного сечения. Волной основного типа для них является волна H_{10} . Ее электромагнитное поле представляется следующими выражениями:

$$\vec{E}_\mp = \vec{e}_y E_{\max} \sin \frac{\pi x}{a} e^{\mp i K_z z};$$

$$\vec{H}_\mp = (\mp \vec{e}_x K_z \sin \frac{\pi x}{a} + i \vec{e}_z \frac{\pi}{a} \cos \frac{\pi x}{a}) \frac{E_{\max}}{\omega \mu} e^{\mp i K_z z}. \quad (2.6)$$

Индекс (-) соответствует волне, распространяющейся в направлении $+z$, индекс (+) – волне обратного направления. Поперечное волновое число волны H_{10} равно $K_t = \pi/a$, критическая частота $\omega_{кр} = \pi/a \sqrt{\varepsilon \mu}$, а критическая длина волны $\lambda_{кр} = 2a$.

Длина волны в волноводу равна

$$\lambda_b = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}. \quad (2.7)$$

Рис. 2.2 Конфигурация

Конфигурация силовых линий электромагнитного поля представлена на рис. 2.2.

2.2 Падающие и отраженные волны в волноводах

2.2.1 Обычно размеры поперечного сечения волновода выбираются таким образом, чтобы в рабочем диапазоне частот по нему распространялся только основной тип волны.

В данной работе исследуются случаи, когда отрезок такого волновода является линией передачи и соединяется генератор СВЧ с нагрузкой (рис. 2.3).

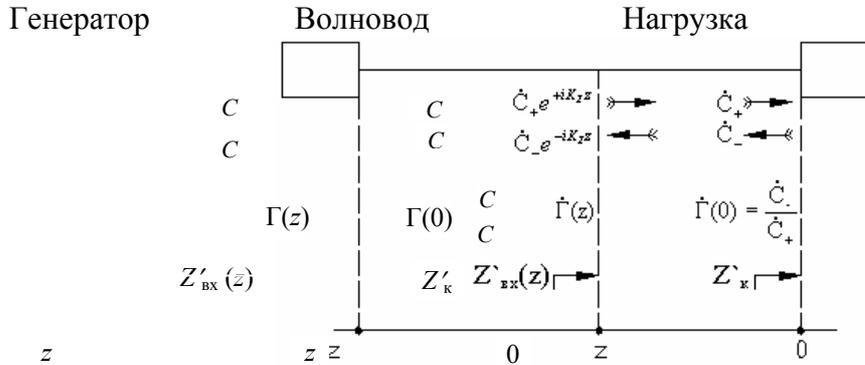


Рис. 2.3 Система генератор – волновод – нагрузка

2.2.2 В общем случае нагрузка не является согласованной, т.е. волна, создаваемая генератором и имеющая на конце линии амплитуду \dot{C}_+ , частично отражается от нагрузки и распространяется в направлении к генератору в виде волны того же типа, но с амплитудой \dot{C}_- . Распределение электрического и магнитного полей волн основного типа в волноводе выражается суммами падающих и отраженных волн:

$$\vec{E}(x, y, z) = \dot{C}_+ \hat{E}_+ e^{iK_z z} + \dot{C}_- \hat{E}_- e^{-iK_z z};$$

$$\vec{H}(x, y, z) = \dot{C}_+ \hat{H}_+ e^{iK_z z} + \dot{C}_- \hat{H}_- e^{-iK_z z}. \quad (2.8)$$

Для волны H_{10} справедливо соотношение $\hat{E}_+ = \hat{E}_-$. Поэтому распределение электрического поля можно представить так:

$$\vec{E}(x, y, z) = \hat{E}_+ (\dot{C}_+ e^{iK_z z} + \dot{C}_- e^{-iK_z z}) = \dot{C}(z) \hat{E}_+. \quad (2.9)$$

2.2.3 Зависимость амплитуды $\dot{C}(z)$ от координаты z точно такая же, как для напряжения $\dot{U}(z)$ в линиях с волнами ТЕМ (см. 1.2.1). Это позволяет перенести некоторые понятия теории длинных линий в теорию волноводов. Вынося в $\dot{C}(z)$ за скобки амплитуду падающей волны в сечении $z - (\dot{C}_+ e^{iK_z z})$, получаем

$$\dot{C}(z) = \dot{C}_+ e^{iK_z z} [1 + \dot{\Gamma}(z)]. \quad (2.10)$$

Величина $\dot{\Gamma}(z)$ представляет собой коэффициент отражения по электрическому полю:

$$\dot{\Gamma}(z) = \frac{\dot{C}_- e^{-iK_z z}}{\dot{C}_+ e^{iK_z z}} = \frac{\dot{C}_-}{\dot{C}_+} e^{-i2K_z z} = \dot{\Gamma}(0) e^{-i2K_z z}, \quad (2.11)$$

который является комплексной величиной с модулем, не зависящим от z , и фазой, линейно зависящей от z , причем период $\dot{\Gamma}(z)$ равен $\lambda_b/2$. Коэффициент отражения на конце линии $\dot{\Gamma}(0)$ должен рассматриваться как первичная характеристика нагрузки. Величина $\dot{\Gamma}(0)$, вообще говоря, зависит от частоты.

2.2.4 По аналогии с длинными линиями вводят понятие «нормированного входного сопротивления волновода»

$$Z'_{\text{вх}}(z) = \frac{1 + \dot{\Gamma}(z)}{1 - \dot{\Gamma}(z)}. \quad (2.12)$$

При $z = 0$ нормированное входное сопротивление равно нормированному сопротивлению нагрузки:

$$Z'_{\text{вх}}(0) = Z'_H = \frac{1 + \dot{\Gamma}(z)}{1 - \dot{\Gamma}(z)}. \quad (2.13)$$

Необходимо иметь в виду, что эта величина, равно как и $Z'_{\text{вх}}$, не может быть трактована, по аналогии с ТЕМ-линиями, как отношение сопротивления нагрузки к «волновому сопротивлению волновода». Понятие сопротивления как отношения напряжения к току для нагрузок СВЧ неприменимо. Не имеет однозначного смысла и понятие «волнового сопротивления волновода».

2.3 Распределение электрического поля вдоль волновода при различных нагрузках

2.3.1 Распределение электрического поля вдоль волновода (2.10) целиком определяется коэффициентом отражения от нагрузки $\dot{\Gamma}(0)$ или ее нормированным сопротивлением Z'_H . Анализ распределения $C(z)$ может быть проведен так же, как в случае длинных линий (п. 1.2.2 и 1.2.3), поэтому здесь достаточно привести окончательные выводы с некоторыми комментариями.

2.3.2 Когда $\dot{\Gamma}(0) = 0 (Z'_H = 1)$, говорят о режиме согласованной нагрузки. В волноводе при этом имеется только падающая волна, бегущая от генератора и полностью поглощаемая нагрузкой. Практически в качестве такой нагрузки может использоваться вставка специальной формы из поглощающего материала (ферроэпоксид); такие согласованные нагрузки часто применяются при измерениях на СВЧ. Теми же свойствами идеально согласованной нагрузки могут обладать и иные потребители энергии СВЧ, например антенны, питаемые через волноводные линии. В этих случаях принимаются специальные меры, чтобы снизить до минимума отражения от входов таких антенн.

2.3.3 Если волновод на конце закорочен металлической заглушкой, то для обеспечения равенства нулю поперечной (касательной к заглушке) составляющей электрического поля амплитуды отраженной и падающей волны должны быть на конце волновода равны по величине и противофазны. При этом $\dot{\Gamma}(0) = -1$, и в волноводе устанавливается стоячая волна с нулем электрического поля на конце (сравните с подпунктом 1.2.2.2). Поперечное магнитное поле также будет распределено по закону стоячей волны, но с максимумом на конце.

2.3.4 Случай открытого конца волновода на первый взгляд аналогичен случаю линии, разомкнутой на конце. Однако, эта аналогия кажущаяся. Разомкнутая линия – это линия, нагруженная на сопротивление $z_k = \infty$. Такая нагрузка не может поглощать мощность, в связи с чем падающая волна полностью отражается от разомкнутого конца, и в линии устанавливается стоячая волна.

Между тем открытый конец волновода, имеющий поперечные размеры, сравнимые с длиной волны, представляет собой небольшую антенну, которая излучает мощность в окружающее пространство. Поэтому для волновода его открытый конец соответствует нагрузке с ненулевой активной частью. В линии устанавливается режим смешанных волн.

2.3.5 В случае произвольной нагрузки распределение электрического поля вдоль линии аналогично распределению напряжения в длинной линии в аналогичной ситуации (см. 1.2.3). Модуль $|1 + \dot{\Gamma}(z)|$ представляет собой функцию координаты z с периодически следующими максимумами и минимумами. Расстояние между соседними максимумами (минимумами) равно $\lambda_b / 2$, расстояние между соседними максимумами и минимумами равно $\lambda_b / 4$. В сечениях, где имеет место максимум (минимум), падающая и отраженная волна синфазны (противофазны), коэффициент отражения в этих сечениях веществен и положителен (отрицателен), а входное сопротивление $Z'_{\text{вх}}$ больше (меньше) единицы.

2.3.6 Так как нормированное входное сопротивление волновода в длинной линии выражается аналогичными формулами, при выполнении расчетов волноводных линий можно использовать круговую диаграмму (см. подраздел 1.3).

При определении Z'_k методом смещения минимума и измерения $K_{\text{бв}}$ круговая диаграмма используется точно так же, как в п. 1.3.4. Следует только помнить, что расстояния вдоль волновода должны представляться в долях $\lambda_{\text{в}}$ (а не λ).

2.4 Лабораторная установка

Структурная схема лабораторной установки представлена на рис. 2.4.



Рис. 2.4 Структурная схема лабораторной установки

Измерительная линия (ИЛ) № 1 имеет поперечное сечение 23×10 мм, соответствующее диапазону генератора ($\lambda \sim 3 \dots 4$ см); таким образом, в этой линии волна H_{10} будет иметь характер распространяющейся волны. Измерительная линия № 2 имеет сечение 16×10 мм и предназначена для исследования нераспространяющейся волны.

2.5 Задания и указания к выполнению работы

2.5.1 Ознакомиться с лабораторной установкой и дополнительными указаниями по работе с приборами. Настроить генератор на частоту, заданную пользователем. Включить усилители.

2.5.2 Собрать схему в соответствии с рис. 2.4, но без измерительной линии № 2 и соответствующего усилителя. Закоротить ИЛ № 1 короткозамыкающей заглушкой. Настроить ИЛ № 1 на максимум показаний. Перемещая каретку линии, убедиться, что в ней имеет место стоячая волна. Определить координаты двух соседних минимумов (методом вилки) и найти по ним длину волны $\lambda_{\text{в}}$. Рассчитать $\lambda_{\text{в}}$ по формуле (2.7) и сравнить с экспериментально найденным значением.

2.5.3 Присоединить на конце ИЛ № 1 согласованную нагрузку. Снять распределение электрического поля вдоль волновода, передвигая каретку через $\Delta z \sim 0,1\lambda_{\text{в}}$ в пределах ее полного перемещения. По полученной кривой $a(z)$ (a – показания прибора усилителя) найти $K_{\text{бв}}$ нагрузки

$$K_{\text{бв}} = \sqrt{\frac{a_{\text{mincp}}}{a_{\text{maxcp}}}},$$

где $a_{\text{min cp}}$; $a_{\text{max cp}}$ – усредненные значения минимумов и максимумов кривой распределения $a(z)$.

2.5.4 Снять нагрузку с выходного фланца ИЛ № 1, реализовав тем самым режим волновода с открытым концом. Измерить $K_{\text{бв}}$ и смещение минимума относительно его положения при коротком замыкании на конце (п. 2.5.3). По этим данным рассчитать Z'_k , руководствуясь методикой п. 1.3.4.

2.5.5 Собрать схему (рис. 2.4.) (с ИЛ № 2). Присоединить к выходному фланцу ИЛ № 2 согласованную нагрузку. Настроить ИЛ № 2 на максимум показаний прибора соответствующего усилителя. Снять распределение электрического поля в волноводе $a \times b = 16 \times 10$ мм ИЛ № 2 в полных пределах шкалы перемещений этой линии. Измерения провести на критической частоте узкого волновода и на двух частотах ниже критической. При изменении частоты производить каждый раз настройку обеих линий. По длине, на которой поле нераспространяющейся волны спадает в e раз, найти ее волновое число K_z .

2.5 Содержание отчета

- 1 Структурная схема установки.

- 2 Таблицы экспериментальных данных и графики.
- 3 Результаты расчета по круговой диаграмме в соответствии с п. 2.5.3, 2.5.4.

2.6 Контрольные вопросы

- 1 В чем состоит отличие волн класса E от волн класса H с точки зрения структуры электромагнитного поля?
- 2 Как связаны между собой предельное волновое число K_z , волновое число среды и поперечное волновое число K_t ?
- 3 От чего зависит величина поперечного волнового числа?
- 4 При каких K_z волна является распространяющейся (не распространяющейся)?
- 5 Отличается ли длина волны в волноводе и ее фазовая скорость от длины и скорости в свободном пространстве?
- 6 Дайте определение критической частоты и критической длины волны для волноводных модов.
- 7 Какой тип волны считается основным для данного волновода?
- 8 Изобразите конфигурации силовых линий волны H_{10} прямоугольного волновода.
- 9 Как связаны критическая частота и критическая длина волны с размерами поперечного сечения волновода?
- 10 Из каких соображений выбирают обычно размеры поперечного сечения волновода?
- 11 Каково распределение поля в волноводе в случае произвольной нагрузки на его конце?
- 12 Что такое коэффициент отражения $\Gamma(z)$ и каков закон его изменения вдоль волновода?
- 13 Чем определяется коэффициент отражения на конце линии $\Gamma(a)$?
- 14 Какой смысл вкладывается в понятие нормированного входного сопротивления волновода и нормированного сопротивления нагрузки?
- 15 Каковы распределения электрического поля вдоль волновода при коротком замыкании и согласованной нагрузке на его конце?
- 16 Почему случай открытого волновода не эквивалентен случаю разомкнутой на конце линии?
- 17 Как распределено электрическое поле по длине волновода в случае произвольной нагрузки на его конце (качественное описание)?
- 18 Какова последовательность измерений и расчетов при определении сопротивления нагрузки методом измерения $K_{бв}$ и смещения максимума?

Лабораторная работа № 3

Измерение электрических свойств диэлектриков

Цель работы: познакомиться с методами определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь радиоматериалов в широком диапазоне частот.

Содержание работы:

исследовать метод измерения диэлектрической проницаемости с помощью куметра.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

3.1 Общие положения

Твердые диэлектрики используются для электроизоляции и крепления токонесущих элементов в передающих линиях, трансформирующих устройствах, для изготовления фазовращателей, электроваку-

умных приборов и др. Свойства диэлектрика на СВЧ описываются относительным комплексным значением диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon' = \varepsilon - j\varepsilon'',$$

где ε и ε'' – действительная и мнимая части относительной комплексной диэлектрической проницаемости ε' .

Потери высокочастотной мощности в диэлектрике характеризуются так называемым углом потерь, тангенс которого равен отношению мнимой и действительной составляющих ε' :

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

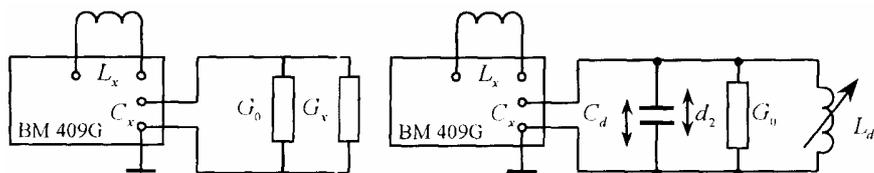
Большинство диэлектриков имеют относительную диэлектрическую проницаемость от 2 до 7 и тангенс угла потерь от $5 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-2}$. Непосредственно ε и $\operatorname{tg} \delta$ не могут быть измерены, поэтому их вычисляют по результатам измерений каких-либо других величин.

3.2 Описание принципа измерения

Принципом измерения является метод подстановки при измерении составляющих импеданса конденсатора, подключаемого к зажимам измерителя. При совместной работе с Q -метром ВМ 4095 измеряется добротность Q колебательного контура, к которому присоединяется пластинчатый конденсатор C_d , диэлектриком которого является образец измеряемого материала. Для определения $\operatorname{tg} \delta$ измеряемого диэлектрика необходимо знать два значения добротности Q контура:

- а) с подключенным измеряемым конденсатором;
- б) без подключенного измеряемого конденсатора.

Для расширения частотного диапазона и снижения воздействия остаточных параметров измерительный пластинчатый конденсатор, между пластинами которого устанавливается образец диэлектрика, постоянно подключен к зажимам C_x Q -метра. Вспомогательная переменная индуктивность L_d регулируется таким образом, чтобы реактивная составляющая сопротивления индуктивности компенсировала реактивную составляющую сопротивления пластинчатого конденсатора C_d . Таким образом, пластинчатый конденсатор проявляется внешне только как вещественное сопротивление, подключенное к зажимам C_x Q -метра, и измерение в данном случае аналогично измерению резонансных сопротивлений. Сначала измеряется Q_1 контура с измеряемым диэлектриком, установленным между пластинами конденсатора C_d . При этом расстояние d_1 между пластинами конденсатора C_d равно толщине образца (рис. 3.1, а). После вынимания образца диэлектрика устанавливается емкость конденсатора такой, какой она была при наличии диэлектрика (изменяется расстояние между пластинами – d_2) и отсчитывается увеличенное значение Q_2 контура (рис. 3.2). Емкость конденсатора с образцом диэлектрика равна емкости пластинчатого конденсатора C_d при расстоянии между пластинами d_2 . Коэффициент потерь образца материала составляет:



а)

б)

Рис. 3.1

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{G_x}{\omega G_d} - \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2 Q_1} \frac{C}{C_d}, \quad (3.1)$$

где C – резонансная емкость Q -метра; C_d – емкость пластинчатого конденсатора при расстоянии между электродами d_2 .

Относительная диэлектрическая постоянная равна отношению расстояний между пластинами конденсатора:

$$\varepsilon_r = \frac{d_1}{d_2}. \quad (3.2)$$

Приспособление для измерения параметров диэлектриков в комплекте с измерительным прибором ВМ 4095 (куметр 20 ... 300 МГц) предназначено для измерения коэффициента потерь и диэлектрической постоянной твердых радиоматериалов в диапазоне частот 20 ... 300 МГц. Образцы измеряемого материала имеют форму диска диаметром 50 мм и толщиной

1 ... 5 мм. В случае необходимости можно измерять образцы и меньших и некруглых размеров.

Пределы измерения $\operatorname{tg} \delta$ материалов	$5^{-1} \dots 1^{-4}$
Точность	до 100 МГц $\pm 10\% \pm 5^{-5}$ до 300 МГц $+10\% +1,5^{-4}$
Пределы измерений диэлектрической постоянной	1 ... 40
Точность	$\pm 4\%$
Диаметр электродов конденсатора держателя	50 мм
Диапазон температур	+10 ... +35 °С

3.3 Порядок выполнения измерений

3.3.1 С левого среднего (токонесущего) зажима куметра отвинтить гайку и вместо нее привинтить специальный зажим, который является частью принадлежностей измерительного приспособления. Измерительное приспособление установить внутренним шрифтом к этому зажиму и зафиксировать его тремя крепежными винтами. В зависимости от требуемой частоты подключить к держателю вспомогательную индуктивность L_d .

К зажимам L_x куметра подключить такую вспомогательную катушку L_x , чтобы получить резонанс на требуемой частоте с емкостью в пределах 7 ... 110 пФ (подходящим являются катушки индуктивности ВР 4091). Переключатель перевести в положение О (отключено) и установить требуемую частоту, а затем, настраивая емкость куметра, установить резонанс так же, как и при измерении добротности катушек. Величину емкости при резонансе обозначить в качестве C .

3.3.2 Между платами держателя вставить круглый образец испытываемого материала. Путем вращения диска управления микрометра зажать образец так, чтобы диск проскальзывал. Затем отметить показание шкал, определяющих толщину диэлектрического образца d_1 . Вспомогательную колебательную индуктивность установить грубо по резонансу, т.е. по максимальному отклонению стрелки куметра. Точная установка осуществляется подстроечным конденсатором. Затем измеряется Q так же, как и при измерении добротности катушек. Отсчитанное значение обозначить через Q_1 . При этом убедиться в том, что стрелка прибора <ВЧ> находится в положении метки V на шкале.

3.3.3 Освободить измеряемый образец с помощью диска управления микрометра и вынуть образец из держателя. Затем опускать верхний электрод до тех пор, пока не наступит резонанс. После точной установки резонанса и контроля правильной установки прибора <ВЧ> отсчитать показание Q_2 . Установка микрометра, отсчитанная по шкалам, определяет расстояние между пластинами конденсатора (d_2).

Коэффициент потерь измеряемого образца определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2 Q_1} \frac{(C + 1,3)d_2}{17,36} b, \quad (3.3)$$

где b – корректирующий коэффициент, отсчитанный по графику.

Коэффициент корректирует влияние остаточной индуктивности пластинчатого конденсатора держателя. Для частоты приблизительно 100 МГц можно пренебрегать коэффициентом b , причем дополнительная погрешность будет не более 5 %.

Относительная диэлектрическая постоянная измеряемого материала составляет:

$$\varepsilon_r = \frac{d_1}{d_2}. \quad (3.4)$$

3.3.4 При измерении материалов с малым $\operatorname{tg} \delta$ (ниже 10^{-3}) на частотах ниже 50 МГц с точки зрения чувствительности и, следовательно, точности измерения целесообразно производить измерение без вспомогательной индуктивности L .

1 К зажимам куметра подключить держатель диэлектриков и прикрепить его винтами. Между пластинами держателя вставить образец диэлектрика и зажать его диском. Расстояние между пластинами равно d_1 . Установить требуемую частоту и подключить подходящую катушку к зажимам L_x куметра.

Конденсатором куметра установить резонанс, показание емкости отсчитать и обозначить в качестве C . Отсчитать значение Q_1 . Убедиться в том, что стрелка прибора <ВЧ> дает отклонение по метке V на шкале.

2 Вынуть образец диэлектрика и опускать электроды до тех пор, пока не наступит резонанс. Затем рассчитать показание Q_1 . При этом проконтролировать правильно показания прибора <ВЧ>. Расстояние между пластинами конденсатора приспособления составляет d_2 .

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2 Q_1} \frac{(C + 1,3 + C_d)d_2}{17,36} c, \quad (3.5)$$

где c – корректирующий коэффициент, полученный из графика коррекции, который корректирует влияние остаточной индуктивности пластинчатого конденсатора (речь идет об индуктивности выводов от катушек куметра до собственно платы конденсатора); C_d – общая емкость приспособления в положении d_2 . Эту емкость можно просто определить путем замены измерительным конденсатором куметра при отключении и подключении конденсатора. Если для этого измерения по методу замещения ранее используемая катушка L_x является неподходящей при данной частоте, то следует изменить частоту автогенератора так, чтобы при подключенном конденсаторе приспособления конденсатор куметра давал еще достаточный резерв для определения по методу замещения.

Относительная диэлектрическая постоянная равна:

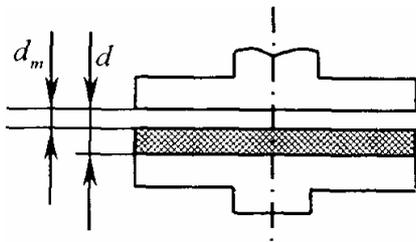


Рис. 3.3

верхней пластинкой был воздушный зазор. Толщину воздушного зазора отсчитать по микрометру и обозначить через d_m (рис. 3.3). В остальном процесс измерения такой же, как и раньше – отсчитываются значения Q_1 и C_1 .

2 Отсчитать значения Q_2 и d_2 .

Коэффициент диэлектрических потерь материала составляет:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2 Q_1} \frac{(C + 1,3) d_2 b}{17,36} \left(1 + \frac{d_m}{d_2 - d_m} \right).$$

Относительная диэлектрическая постоянная измеряемого материала следующая:

$$\varepsilon_r = \frac{d_1}{d_2}.$$

Точность полученных в этом случае значений $\operatorname{tg} \delta$ может быть хуже, чем указано в спецификации ввиду наличия емкостей рассеяния краев образца и вероятной неточности при определении толщины воздушного зазора d_m .

3.3.6 В некоторых случаях при 1-м этапе основного измерения невозможно достичь резонанса (максимального отклонения) путем настройки вспомогательной коаксиальной индуктивности L_d .

Сказанное относится особенно к случаю измерения постоянной на высоких частотах (200 ... 300 МГц).

В этих случаях необходимо использовать образцы с диаметром D , меньшим 50 мм (рис. 3.4). Этот способ измерений можно в принципе использовать только в том случае, если нет образца нужных размеров. Порядок измерений такой же, как и при измерении образцов диаметром 50 мм:

1 Отсчитать значения Q_1 , C_1 , d_1 .

2 Провести измерения Q_2

и d_2 .

Коэффициент потерь образца материала:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2 Q_1} \frac{(C + 1,3) b}{17,36} \frac{1}{\frac{17,36}{d_2} - \frac{17,36}{d_1} (1 - 0,04 D^2)}.$$

Относительная диэлектрическая постоянная определяется по формуле:

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{25}{D^2} \left(\frac{d_1}{d_2} - 1 \right).$$

В том случае, когда образец материала не имеет круглую форму, справедлива формула:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{Q_2 - Q_1 (C + 1,3)b}{Q_2 Q_1} \frac{1}{\frac{17,36}{d_2} - \frac{0,8842}{d_1} (19,63 - P)},$$

где P – площадь используемого образца, см^2 .

Относительная диэлектрическая постоянная в этом случае определяется по формуле:

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{19,63}{P} \left(\frac{d_1}{d_2} - 1 \right).$$

Точность полученных значений ε_r , $\operatorname{tg} \delta$ может быть хуже, чем дано в спецификации ввиду наличия емкостей расстояния краев образца.

С учетом эквивалентного воздушного зазора d_m действительная относительная постоянная измеряемого материала определяется по формуле:

$$\varepsilon_r = \frac{d_1}{d_2} \frac{1 - \frac{d_m}{d_1}}{1 - \frac{d_m}{d_2}},$$

и действительное значение коэффициента потерь определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_x \left(1 + \frac{d_m}{d_2 - d_m} \right),$$

где $\operatorname{tg} \delta_x$ – это значение, рассчитанное по данным инструкции. Процентное влияние эквивалентного воздушного зазора d_m в обоих случаях практически одинаково. В нижеследующей таблице даны погрешности в процентах для $d_m = 0,01$ и $0,005$ при толщинах образцов $d_1 = 1$ и 3 мм и диэлектрических постоянных $\varepsilon_r = 3$ и 10 .

	Погрешность, %	
	$\varepsilon_r = 3$	$\varepsilon_r = 10$

d_m , мм	0,005	0,01	0,005	0,01
$d_1 = 1$ мм	15 %	3 %	5 %	10 %
$d_2 = 3$ мм	0,5 %	1 %	1,5 %	3 %

Из значений погрешностей, указанных в таблице, вытекают требования, предъявляемые к качеству плоских поверхностей образца.

3.4 Содержание отчета

- 1 Схема лабораторной установки с указанием типов приборов.
- 2 Таблицы всех величин, полученных в результате измерений и расчетов.
- 3 Выводы и замечания по работе.

3.5 Контрольные вопросы

- 1 Дайте характеристику электрических параметров диэлектриков.
- 2 Какие методы измерений ε и $\operatorname{tg} \delta$ диэлектриков вы знаете?
- 3 Как на основе резонансных измерений можно определить ε и $\operatorname{tg} \delta$?
- 4 Каким методом и с помощью каких средств измеряют основные параметры радиоматериалов?
- 5 От чего зависит точность измерения ε и $\operatorname{tg} \delta$?

СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

\vec{E}, \vec{H} – напряженности электрического и магнитного полей;
 \hat{E}, \hat{H} – векторные функции, представляющие распределения электрического и магнитного полей волны основного типа в передающей линии в зависимости от поперечных координат;
 $\vec{E}_{\mp}, \vec{H}_{\mp}$ – напряженности электрического и магнитного полей волн основного типа в передающей линии, распространяющихся в направлении $+Z$ или $-Z$;
 \dot{U}, \dot{I} – комплексные амплитуды напряжения и тока;
 $\dot{U}_{\text{п}}, \dot{I}_{\text{п}}, \dot{U}_{\text{о}}, \dot{I}_{\text{о}}$ – комплексные амплитуды напряжений и токов падающих и отраженных волн передающей линии;
 $\dot{U}_{i-}, \dot{I}_{i+}$ – комплексные амплитуды напряжений падающих и расходящихся волн на i -м входе четырехполюсника СВЧ;
 Z, R, X – полное комплексное сопротивление, его активная часть и реактивная составляющие;
 Y, G, B – полная комплексная проводимость, ее активная и реактивная составляющие;
 \dot{C}_{\mp} – комплексные амплитуды волн в передающей линии, распространяющихся в направлениях $\pm Z$;
 $\dot{C}_{i\mp}$ – комплексные амплитуды падающей и расходящейся волн на i -м входе четырехполюсника СВЧ;
 $K = \sqrt{\varepsilon\mu}$ – волновое число среды с параметрами ε, μ ;
 K_z – продольное волновое число волны в волноводе;
 K_i – продольное волновое число волны в i -м волноводе;
 $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ – орты декартовой системы координат;
 λ – длина волны;
 $\lambda_{\text{в}}$ – длина волны в волноводе;
 ω – круговая частота;
 ε, μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды;
 $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$, Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума;
 $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Г/м – магнитная проницаемость вакуума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Фальковский О.И. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1978. – 429 с.
- 2 Конструирование экранов и СВЧ-устройств / Под ред. А.М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1990. – 352 с.
- 3 Фрайдин А.З., Рыжков Е.В. Измерения параметров антенно-фидерных устройств. – М.: Связь, 1972. – 430 с.
- 4 Молорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. – М.: Сов. Радио, 1976. – 216 с.
- 5 Малков Н.А., Барышев Г.А. Основы технической электродинамики: Учебное пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – 143 с.
- 6 Вальднер О.А., Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. Учебная лаборатория. – М.: Атомиздат, 1974. – 232 с.
- 7 Микаэлян А.Д. Теория и применение ферритов на СВЧ. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 345 с.
- 8 Альтман Дж. Устройства СВЧ. – М.: Мир, 1968. – 534 с.
- 9 Малков Н.А., Шелохвостов Н.П. Микроэлектронные устройства СВЧ: Учебное пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. – 123 с.

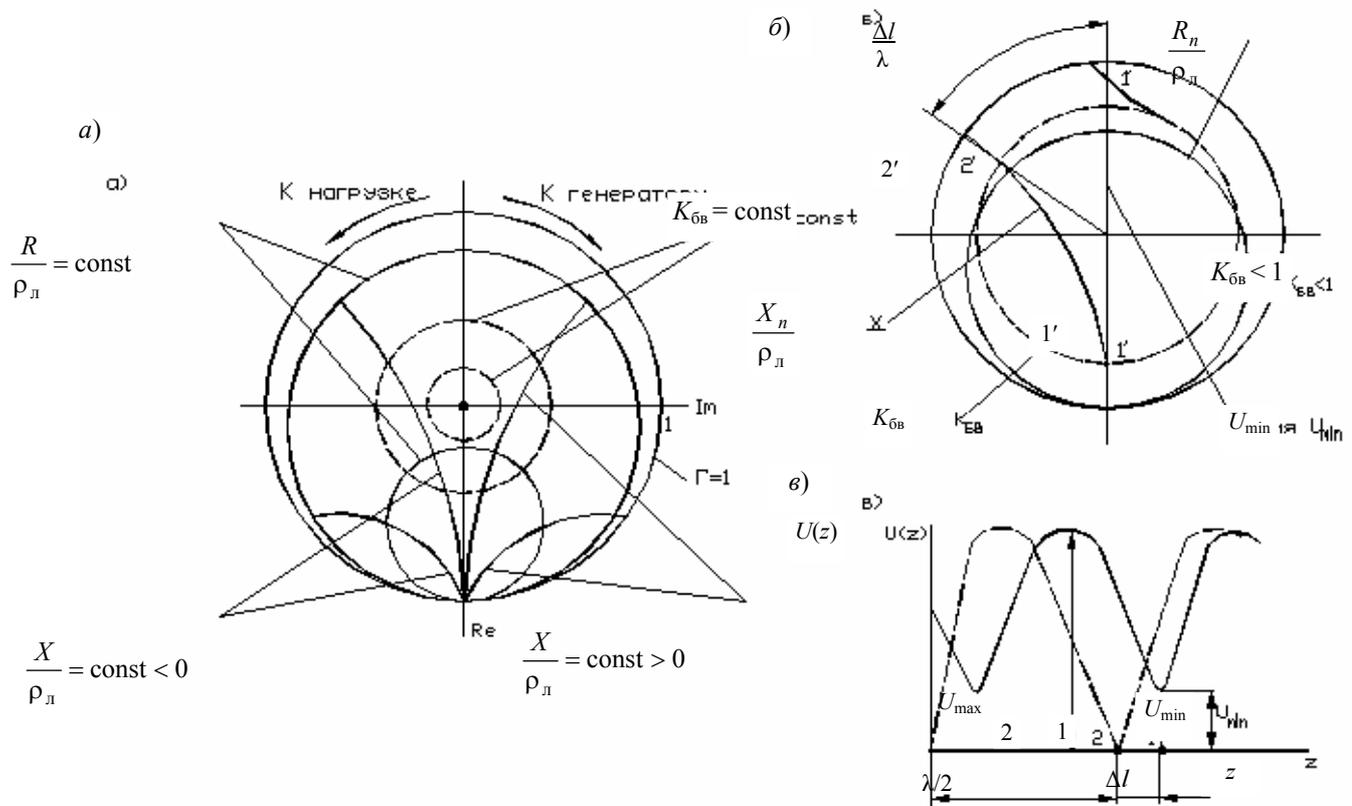


Рис. 1.4 Диаграмма полных сопротивлений