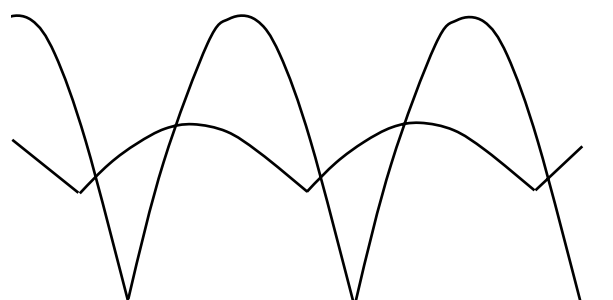


ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН



◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов 3 курса направления 210300 и
специальностей 210303, 210201 очной и заочной форм обучения



Тамбов
Издательство ТГТУ
2008

УДК 621.3.09
ББК 3841-019я73-5
М194

Р е ц е н з е н т

Кандидат технических наук, профессор ТГТУ
Ю.А. Брусенцов

С о с т а в и т е л ь

Н.А. Малков

М194 Электродинамика и распространение радиоволн : метод. указания / сост. Н.А. Малков. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 28 с. – 50 экз.

Содержат основные теоретические положения, необходимые для определения электромагнитных параметров электропередачи, описание лабораторных установок и методики проведения экспериментов.

Предназначены для студентов 3 курса направления 210300 и специальностей 210303, 210201.

УДК 621.3.09
ББК 3841-019я73-5

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет» (ТГТУ), 2008

Учебное издание

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Методические указания

С о с т а в и т е л ь

МАЛКОВ Николай Аркадьевич

Редактор Т.М. Глинкина

Компьютерное макетирование Т.Ю. Зотовой

Подписано в печать 18.04.2008

Формат 60×84/16. 1,63 усл. печ. л. Тираж 50 экз. Заказ № 198

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛН ТИПА Т В ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ

Цель работы:

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

При выполнении лабораторной работы необходимо:

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].



Рис. 1.1. Поперечные сечения длинных линий

В линиях, частично заполненных диэлектриком (см. рис. 1.1, г), Т-волна существовать не может; однако волна основного типа в таких линиях обычно близка по свойствам к Т-волне (квазиТ-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 (\dot{U}) и тока (\dot{I}) в линии представляются следующими суммами падающих и отраженных волн напряжения (U_n , U_o) и тока (I_n , I_o):

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

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

где $\rho_{л}$ – входное сопротивление линии; k – волновое число.

Отношение комплексных амплитуд напряжения отраженной (U_o) и падающей (U_n) волн в сечении z

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

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

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

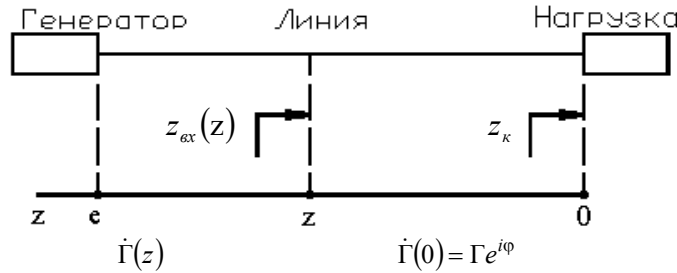


Рис. 1.2. Система генератор – линия – нагрузка

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

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

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

1.2.2.1. Согласованная линия: $z_{\text{к}} = \rho_n$, $\dot{\Gamma}(0) = 0$.

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

В согласованной линии имеет место режим бегущей волны, а входное сопротивление чисто вещественно и равно ρ_n .

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

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

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

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

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 $\lambda/4$;

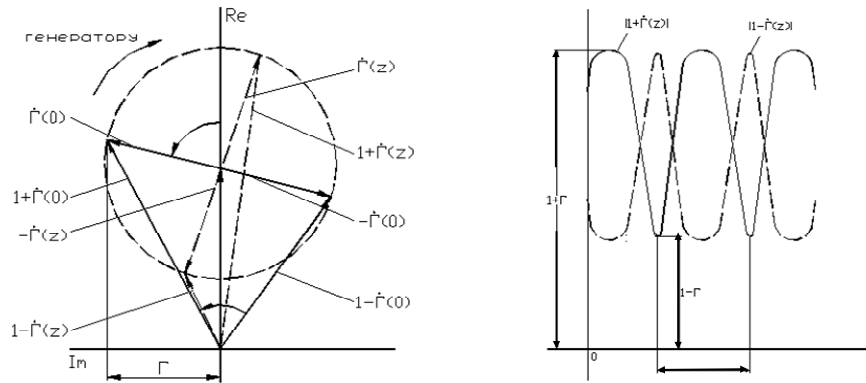


Рис. 1.3. Векторная диаграмма функций $1 \pm \dot{\Gamma}(z)$

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;

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 увидеть 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

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

связан с модулем коэффициента отражения Γ простым соотношением:

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

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 $K_{\text{бв}}$ 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

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

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 – правая. Выбрав нужную точку пересечения, легко построить векторы $1 + \dot{\Gamma}(0)$ и $1 - \dot{\Gamma}(0)$; при этом определится угол φ_{R} (см. рис. 1.3). Вещественную и мнимую части $z_{к}$ можно рассчитать по формулам

$$R_{к} = \rho_{л} \frac{|1 + \dot{\Gamma}(0)|}{|1 - \dot{\Gamma}(0)|} \cos \varphi_{к}; \quad X_{к} = \rho_{л} \frac{|1 + \dot{\Gamma}(0)|}{|1 - \dot{\Gamma}(0)|} \sin \varphi_{к}. \quad (1.8)$$

При этом $\varphi_{к} > 0$, если $|1 + \dot{\Gamma}(0)|$ опережает $|1 - \dot{\Gamma}(0)|$, и $\varphi_{к} < 0$ – 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).

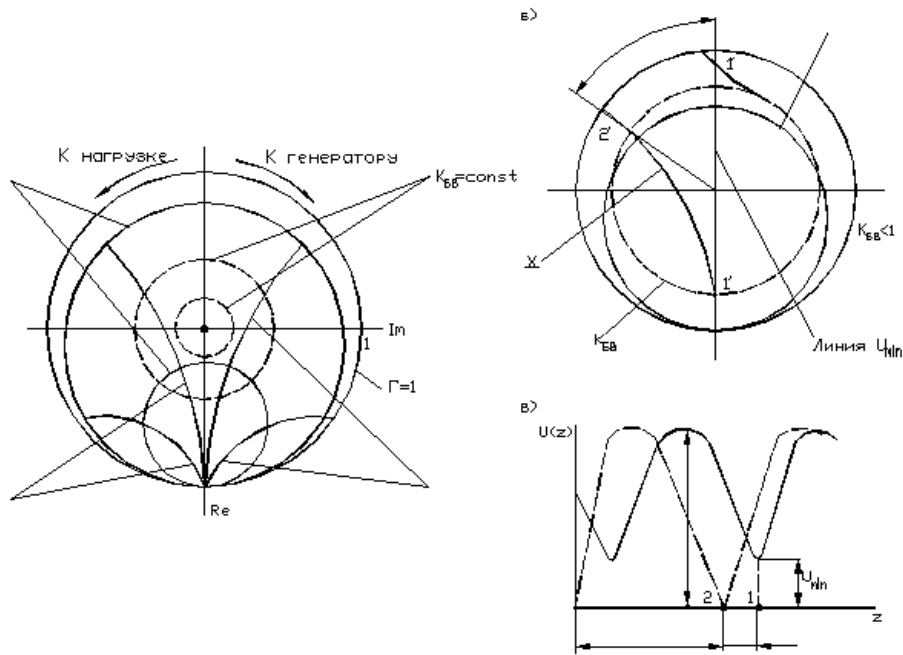


Рис. 1.4. Диаграмма полных сопротивлений

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. Δl

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 $\rho_{л}$, вычисляются по следующим формулам:

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

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 $Z_{к}$. Покажем, как найти $Z_{к}$, зная распределение $U(z)$ и используя круговую диаграмму. Заметим, что входное сопротивление, равное $Z_{к}$, 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 (сечение 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 2, то, очевидно, придем в точку, в которой $Z_{вх} = Z_{к}$. Этот переход и следует выполнить на круговой диаграмме. Сечение 1 изображается на ней точкой пересечения линии U_{\min} и линии $K_{\text{св}} = \frac{U_{\min}}{U_{\max}}$ (точки 1 на диаграмме). Пере-

ходу от сечения 1 к 2 соответствует перемещение на диаграмме по линии $K_{\text{св}} = \text{const}$ 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 $R_{к}/\rho_{л}$ и $X_{к}/\rho_{л}$. 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, на-

ходят 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 $K_{\text{бв}}$ следует учитывать, что показания прибора измерительного усилителя квадратичны отношению к измеряемому 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 заглушкой 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 $Z_{\text{н}} = i\rho_{\text{л}}\text{tg}kl$.



Рис. 1.5. Структурная схема лабораторной установки

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 α . Затем, переместив каретку в положение максимума напряжения и увеличивая затухание калиброванного аттенюатора, установить стрелку прибора в прежнее положение α . 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 – 5, 7 – 8.

1.7. Контрольные вопросы

- 1) Назовите характерные особенности волн типа Т (ТЕМ).

- 2) По какому закону изменяется вдоль линии коэффициент стоячей волны?
- 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 линий.
- 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 $\dot{\Gamma}$ 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

При выполнении лабораторной работы необходимо:

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 (TE)-волны и E (TM)-волны или волны магнитного (H) и электрического (E) типа. Оба класса содержат бесконечное множество мод или типов волн (H_{nm} , E_{nm}) [1, 2].

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:

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

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

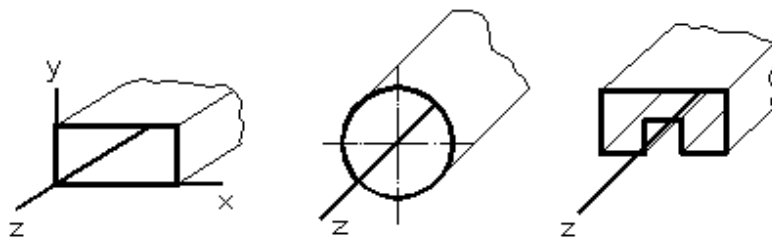


Рис. 2.1. Волноводы прямоугольного, круглого и П-образного сечений

Величина K_z , входящая в показатель экспоненты $e^{\pm iK_z z}$, называется продольным волновым числом и для любого волноводного 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 прямоугольно сечения. Волной основного типа для них является волна H_{10} . Ее электромагнитное поле представляется следующими выражениями:

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

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

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

Конфигурация силовых линий электромагнитного поля представлена на рис. 2.2.

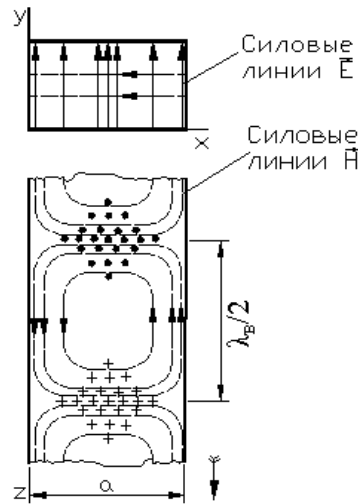


Рис. 2.2. Конфигурация силовых линий волны H_{10}

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).

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:

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

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

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

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 (2.9) за скобки амплитуду падающей волны в сечении $z - (\dot{C}_+ e^{iK_z z})$, получаем

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

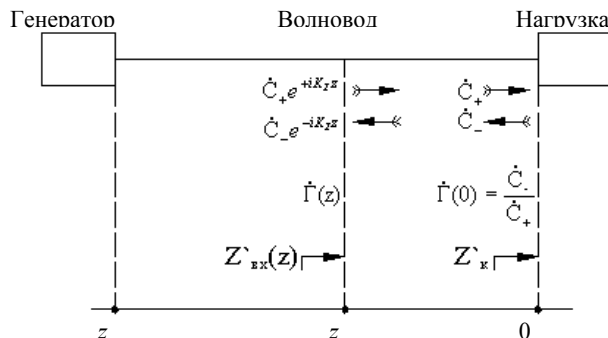


Рис. 2.3. Система генератор – волновод – нагрузка

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:

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

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'_n . 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 $\dot{\Gamma}(0) = Z'_k(0) - 1$, 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 (феррооксид); 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 ми-

нимумами. Расстояние между соседними максимумами (минимумами) равно $\lambda_v/2$, расстояние между соседними максимумами и минимумами равно $\lambda_v/4$. 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 $Z'_{вх}$ 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 $Z'_к$ методом смещения минимума и измерения $K_{обв}$ круговая диаграмма используется точно так же, как в п. 1.3.4. Следует только помнить, что расстояния вдоль волновода должны представляться в долях λ_v (а не λ).

2.4. Лабораторная установка

Структурная схема лабораторной установки представлена на рис.2.4.

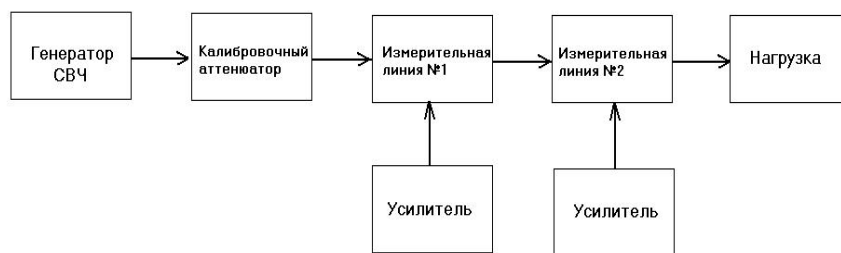


Рис. 2.4. Структурная схема лабораторной установки

Измерительная линия (ИЛ) № 1 имеет поперечное сечение 23×10 мм, соответствующее диапазону генератора ($\lambda \sim 3 - 4$ 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. Задание и указание 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 λ_v . Рассчитать λ_v 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 $\Delta z \sim 0,1\lambda_v$ в пределах ее полного перемещения. По полученной кривой $a(z)$ (a – показания прибора усилителя) найти $K_{обв}$ нагрузки:

$$K_{обв} = \sqrt{\frac{a_{\min \text{ ср}}}{a_{\max \text{ ср}}}},$$

где $a_{\min \text{ ср}}$, $a_{\max \text{ ср}}$ – 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 $K_{обв}$ и смещение минимума относительно его положения при коротком замыкании на конце (п. 2.5.3.). По этим данным рассчитать $Z'_к$, 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 .

2.6. 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.

2.7. 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 (нераспространяющейся)?
- 5) Отличаются 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 $\dot{\Gamma}(z)$ и каков закон его изменения вдоль волновода?
- 13) Чем определяется коэффициент отражения на конце линии $\dot{\Gamma}(a)$?
- 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 $K_{об}$ и смещения максимума?

Лабораторная работа 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

Цель работы: приобретение навыков и приемов измерения полных сопротивлений элементов волноводных трактов.

Методические указания

3.1. Общие положения

Чтобы определить параметры эквивалентных схем для расчета различных СВЧ-устройств и их частотных характеристик, а также для согласования узлов и деталей волноводных трактов, необходимо знать их полное сопротивление.

Значение сопротивлений определяют, в частности, с помощью измерительной линии. На установке, схема которой приведена на рис. 3.1, измерительный генератор через развязывающий аттенюатор и адаптерную головку возбуждает измерительную линию, соединенную с исследуемым объектом, после которого устанавливается оконечная согласованная нагрузка.

Частота колебаний, на которой производится определение сопротивлений, измеряется частотомером.

Принцип измерения основан на известной связи между сопротивлением объекта – нагрузки и распределением напряженности электрического поля вдоль однородной линии передачи, соединяющей измеряемую нагрузку с генератором. Если сопротивление нагрузки Z_n отличается от волнового сопротивления передающей линии Z_0 , то в последней устанавливается стоячая волна, которая характеризуется коэффициентом отражения Γ_n , представляющим отношение напряженности электрического поля E_0 отраженной от нагрузки волны к напряженности электрического поля падающей волны E_n в месте расположения нагрузки: $\Gamma_n = E_0 / E_n$.

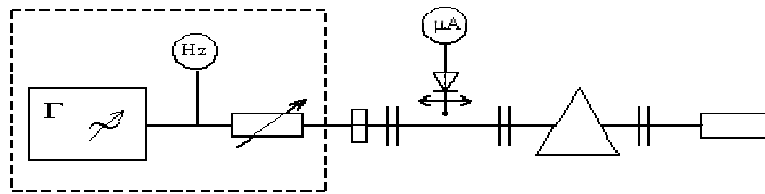


Рис. 3.1. Функциональная схема измерительной установки для определения полных сопротивлений

В общем виде коэффициент отражения является комплексной величиной, которую удобно представить в экспоненциальной форме:

$$\Gamma_n = |\Gamma_n| \exp(i\varphi_n),$$

где $|\Gamma_n|$ – модуль отношений указанных напряженностей; φ_n – фазовый сдвиг между ними в месте расположения нагрузки.

Комплексный коэффициент отражения Γ_n и полное сопротивление нагрузки связаны соотношением

$$\Gamma_n = (Z_n - Z_0) / (Z_n + Z_0). \tag{3.1}$$

Сопротивление элементов ВЧ-тракта выражают в значениях, относя их к сопротивлению основной передающей линии, которое принимается за единицу, тогда

$$Z'_n = Z_n / Z_0 = (1 + \Gamma_n) / (1 - \Gamma_n); \tag{3.2}$$

$$|\Gamma_n| = (p - 1) / (p + 1);$$

$$\varphi_n = 4\pi z_{\min} / \lambda_v, \tag{3.3}$$

где λ_v – длина волны в передающей линии; z_{\min} – расстояние от нагрузки до первого минимума напряжения в линии; p – коэффициент стоячей волны (КСВ).

Таким образом, зная распределение напряженности электрического поля вдоль передающей линии, легко находят значения r , z_{\min} , Γ_n , а значит, и относительную величину полного сопротивления $Z'_n = Z_n / Z_0$. Подобные расчеты рационально проводить с помощью круговых диаграмм полных сопротивлений (диаграмм Вольперта-Смита), где все указанные коэффициенты связаны с сеткой полных сопротивлений.

Измерительные линии, при помощи которых находятся две основные исходные величины (r , z_{\min}) для определения полного сопротивления, имеют различные конфигурации.

В устройстве первого типа в стенке линии передачи (волноводной или коаксиальной) прорезается продольная щель, которая не пересекает линии высокочастотных токов. Вдоль щели перемещается электрический зонд, которой возбуждается электрическим полем распространяющейся в линии волны. Движение зонда обеспечивается специальным устройством, снабженным линейкой с нониусом для точного отсчета положения зонда. Регистрируя в различных точках линии ток, который протекает через детектор, соединенный с зондом и индикаторным прибором, находят распределение напряженности поля в зависимости от продольной координаты. Это позволяет найти КСВ и z_{\min} .

В конструкциях измерительной линии второго типа зондовая головка неподвижна, а картина электромагнитного поля в линии как бы перемещается относительно зонда с помощью хорошо согласованного фазовращателя, который включается в высокочастотный тракт между зондом и исследуемым объектом.

Наиболее ответственный узел измерительной линии – зондовая головка. Для получения достаточного уровня сигнала индикаторного блока при малом искажающем воздействии зонда на структуру измеряемого поля в конструкцию головки вводят настраиваемые резонансные элементы так, чтобы детектор попадал в максимум (пучность) электрического поля.

В последние десятилетия появился и третий конструктивный вариант волноводной цилиндрической линии – так называемый поляризационный измеритель полных сопротивлений. Принцип действия такого прибора заключается в следующем (рис. 3.2). В широкой стенке волновода 1 прямоугольного сечения прорезаются три отверстия 2 специальной формы. Эти отверстия соединяют волновод прямоугольного сечения с круглым цилиндрическим волноводом 3 , к выходному концу которого присоединена согласованная нагрузка 4 .

Электромагнитная волна, распространяющаяся в волноводе прямоугольного сечения в прямом направлении, возбуждает в цилиндрическом волноводе волну типа H_{11} с круговой поляризацией. Аналогично этому волна в прямоугольном волноводе, распространяющаяся в обратном направлении, также возбуждает волну H_{11} с круговой поляризацией, но имеющую обратное направление вращения. Суперпозиция двух волн в цилиндрическом волноводе образует по его окружности стоячую волну с КСВ и фазой минимума, строго соответствующими аналогичным параметрам в прямоугольном волноводе. Поместив зонд 5 , перемещающийся по окружности, можно снять эпюру напряженности поля, что позволяет найти КСВ и положение минимума в прямоугольном волноводе.

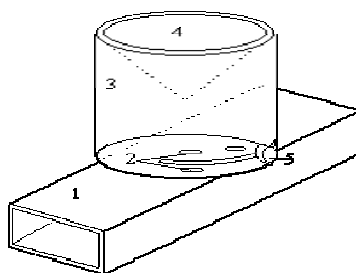


Рис. 3.2. Схема поляризационного измерителя полных сопротивлений:
 1 – прямоугольный волновод; 2 – отверстия; 3 – круглый цилиндрический волновод; 4 – согласованная нагрузка; 5 – зонд

Кроме описанных конструкций существуют автоматические измерители КСВ и автоматические измерители полных сопротивлений. В этих приборах применяются генераторы с частотной модуляцией (свип-генераторы) и индикаторы в виде электронно-лучевой трубки.

В автоматических измерителях полных сопротивлений предусмотрена установка в основном тракте четырех зондов, комбинируя сигналы с которых, можно получить не только значение КСВ, но и положение минимума стоячей волны. В результате на экране трубки с нанесенной в виде сетки диаграммой полных сопротивлений наблюдается характеристика изучаемого объекта, т.е. этот прибор позволяет измерять фазу и модуль коэффициента отражения в зависимости от частоты.

Работая с измерителями полных сопротивлений или с измерительными линиями, следует иметь в виду наличие конечных значений погрешностей измеряемых величин КСВ и z_{\min} . Основной вклад в погрешность измерения КСВ и положения минимума стоячей волны (z_{\min}) вносит искажающе воздействующий на исследуемое поле зонд линии. Зонд в измерительной линии можно представить в виде некоторой шунтирующей проводимости $Y_3 = G_3 + iB_3$, имеющей в общем случае комплексный характер. Наличие реактивной компоненты искажает форму стоячей волны, смещая максимумы напряженности поля, однако положения минимумов меняются мало. Чтобы уменьшить реактивную составляющую B_3 , не-

обходимо в процессе измерений тщательно настраивать головку в резонанс, а для избежание погрешностей при отсчете фаз их необходимо определять по положению минимума, а не максимума напряженности поля.

Активная составляющая проводимости зонда объясняется отбором мощности из основной линии в цепь зонда, что приводит к получению заниженных значений КСВ. Активную составляющую проводимости можно уменьшить, ослабив связь зонда с основной линией, например, за счет изменения глубины его погружения. Однако это приводит к снижению чувствительности измерительной линии.

Кроме погрешностей, возникающих из-за шунтирующего действия зонда, есть еще некоторые источники погрешности при измерении полных сопротивлений. Это погрешность из-за неравномерности перемещения зонда (изменения глубины погружения и боковые перемещения), погрешность за счет влияния щели. Измерительные линии позволяют измерить КСВ с погрешностью, не превосходящей 4 – 5 % в диапазоне $0 < r < 1$, а положение минимума – с погрешностью не более 0,01 – 0,1 мм.

Для выпрямления высокочастотного тока в головке измерительной линии используется кристаллический детектор. Хотя характеристика детектора близка к квадратичной, тем не менее для проведения точных измерений измерительная линия должна быть градуирована. Эта операция состоит из двух процедур:

1. Нахождение «условного конца линии», или «начала отсчета».
2. Определение связи тока индикаторного прибора с величиной напряженности электрического поля в линии $I = f(E)$ (градуировочная кривая детектора).

Градуировку детектора проводят следующим способом. Выходной фланец измерительной линии закорачивают металлической пластинкой. От измерительного генератора через регулирующий аттенуатор (рис. 1) в линию подают СВЧ-сигнал заданной частоты и устанавливают уровень мощности так, чтобы показания индикаторного прибора соответствовали полной шкале при установке зонда в максимуме напряженности поля.

При закороченном конце в измерительной линии устанавливается чисто стоячая волна, для которой напряженность поля вдоль линии изменяется по синусоидальному закону:

$$E = E_{\max} \sin(k_z z), \quad (3.4)$$

где k_z – фазовая постоянная; z – продольная координата.

Перемещая зондовую головку измерительной линии, находят положение минимума напряженности поля, которое в данном случае соответствует нулевому значению тока индикаторного прибора. Положение минимума при этом желательно найти вблизи середины продольного размера щели линии. Это значение координаты z_0 принимается в дальнейшем за условный конец линии – начало отсчета фаз. Для более точного определения величины z_0 рекомендуется найти его методом «вилки». Далее производят градуировку детектора зондовой головкой. Для этого методом «вилки» находят координату ближайшего максимума напряженности поля z_{\max} (ток индикатора соответствует полной шкале прибора).

Разность координат положения зондовой головки при максимуме и минимуме тока прибора должна соответствовать четверти длины волны в линии $|z_0 - z_{\max}| = l_B/4$.

Плавное передвижение зондовой головки линии от положения максимума к минимуму, заносят в таблицу значения координат, соответствующих некоторым выбранным значениям тока индикаторного прибора (5 – 10 значений). Для удобства выбирают i равной 100 единицам.

Таблица

I_i	z_i	$z_0 - z_i$	$\sin 2p(z_0 - z_i)/l_B$	$E_i = 100 \sin 2p(z_0 - z_i)/l_B$
$i = 100$				
90				
...				
20				
10				
0				

Рассчитав величины E_i , строят график зависимости $E = f(I)$, который и является градуировочным для детектора линии. При измерении сопротивлений с помощью измерительной линии значение тока индикатора рекомендуется устанавливать равным полной шкале прибора. При этом нетрудно получить зондовый график, непосредственно связывающий величину КСВ с током прибора, соответствующим положению зонда в минимуме напряженности поля $r = f(I_{\min})$. Такой метод обеспечивает минимальное значение погрешностей и сокращает время измерений. После градуировки измерительной линии ее присоединяют к исследуемому объекту, затем устанавливают заданную частоту и надлежащий уровень мощности измерительного генератора, определяют величину I_{\max} , I_{\min} и координату z_{\min} . По градуировочным графикам находят величину КСВ.

Сопротивление объекта можно найти с помощью построения на круговой диаграмме полных сопротивлений. Проведем окружность радиусом, соответствующим измеренному КСВ. Определим расстояние в линии между найденным положением минимума z_{\min} и началом отсчета z_0 в относительных единицах $j = |z_{\min} - z_0|/l_B$. Эта величина соответствует углу, определяющему точку на окружности, отображающую искомое сопротивление нагрузки. Угол отсчитывается от полуоси минимумов в направлении «к нагрузке», если измеренная координата z_{\min} сдвинута относительно z_0 в сторону генератора.

Выбор направления отсчета углов можно пояснить, рассмотрев эпюры напряженности полей, представленные на рис. 3.3 для двух случаев:

1. Линия закорочена на конце.
2. На конце линии включена нагрузка с сопротивлением, не равным волновому сопротивлению линии $Z_H \neq Z_0$.

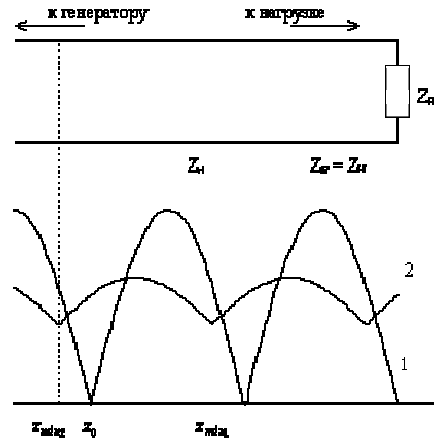


Рис. 3.3. Эпюры напряженности электрического поля

Пусть начало отсчета (при закороченной линии) имеет координату z_0 , а положение двух соседних минимумов напряженности поля для измеряемого сопротивления определяются координатами $z_{\min 1}$, $z_{\min 2}$. Отсюда следует, что сопротивление нагрузки равно значению сопротивления в сечении начала отсчета z_0 . Таким образом, если положение точки А, изображенной на круговой диаграмме (рис. 3.4), соответствует координате $z_{\min 1}$ (ближайший минимум со стороны нагрузки), то сопротивление Z_n можно найти, смещая точку А на угол $\varphi_1 = |z_{\min 1} - z_0|/\lambda_{\text{в}}$ в направлении «к генератору», т.е. к сечению z_0 .

Наоборот, если координата минимума смещена относительно начала отсчета z_0 в сторону генератора ($z_{\min 2}$), то сопротивление нагрузки находится перемещением точки В на угол $\varphi_2 = |z_{\min 2} - z_0|/\lambda_{\text{в}}$ в сторону «к нагрузке». В результате такого построения на круговой диаграмме сопротивлений получаем точку В, которая определяет сопротивление нагрузки $Z'_n = R'_n + iX'_n$.



Рис. 3.4. Нахождение входного сопротивления по круговой диаграмме полных сопротивлений

Приведенное значение проводимости Y'_n можно найти обычным путем, перемещая точку В по окружности постоянного КСВ на угол 180° (точка С на рис. 3.4). Можно и непосредственно получить значение проводимости нагрузки Y'_n , если начало отсчета фаз на круговой диаграмме вести от точки короткого замыкания (точка У стремится к бесконечности).

3.2. Предварительное задание

3.2.1. Рассчитать значение реактивной проводимости индуктивной и емкостной диафрагм с размерами a , a' , b и b' , заданными преподавателем.

Расчеты вести по следующим формулам:

а) для индуктивной диафрагмы

$$B = (-\lambda_{\text{в}}/a) \text{ctg}^2(pa'/2a); \quad (3.5)$$

б) для емкостной диафрагмы

$$B = (4b/\lambda_{\text{в}}) \ln \text{cosec}(pb'/2b). \quad (3.6)$$

3.2.2. Показать существование синусоидального закона распределения напряженности электрического поля в передающей линии без потерь, закороченной на конце.

3.3. Описание экспериментальной установки

Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.1. СВЧ-сигнал от измерительного генератора подается на измерительную линию и связанный с ней объект измерения. К выходному фланцу объекта присоединена согласованная нагрузка. Чтобы измерить частоту сигнала, в схему можно ввести частотомер. Для регулировки уровня мощности в измерительной линии предусмотрена возможность установки регулируемого аттенюатора. Если измерительный генератор имеет встроенную схему частотомера и регулирующих аттенюаторов, то последние в схему вводить не надо.

3.4. Задание и порядок выполнения работы

3.4.1. Ознакомиться с аппаратурой, входящей в экспериментальную установку. Проверить правильность соединений приборов в схеме.

3.4.2. Подготовить приборы к работе и включить измерительный генератор согласно инструкции.

3.4.3. Отградуировать измерительную линию на частоте, заданной преподавателем. Проверить совпадение расчетной длины волны с экспериментально найденной. Построить градуировочные графики $E = f(I_{\min})$ и $p = f(I_{\min})$.

3.4.4. Установить между согласованной нагрузкой и выходным фланцем измерительной линии исследуемый объект (диафрагмы, штыри) по указанию преподавателя.

3.4.5. Определить полное сопротивление и проводимость исследуемого объекта. Результаты измерений нанести на круговую диаграмму сопротивлений.

3.4.6. Исключив из схемы исследуемый объект, измерить полное сопротивление согласованной нагрузки.

Указание: при измерениях в данной работе необходимо соблюдать следующие основные требования:

а) частоту колебаний поддерживать постоянной, при необходимости производить подстройку измерительного генератора;

б) уровень мощности в измерительной линии поддерживать таким, чтобы ток индикатора соответствовал полной шкале измерительного прибора при установке зонда в максимум напряженности поля;

в) измерение координаты минимума производить методом «вилки» (среднее из двух произведенных отсчетов);

г) элементы зондовой головки линии необходимо точно настраивать в резонанс.

3.5. Оформление отчета

3.5.1. Начертить функциональную схему измерительной установки. Выписать основные технические характеристики измерительных приборов.

3.5.2. Привести данные градуировки измерительной линии: таблицу замеров, графики зависимостей $E = f(I_{\min})$ и $r = f(I_{\min})$, сравнение экспериментальной и расчетной длины волны.

3.5.3. Определить показатель степени n для зависимости тока детектора от напряженности электрического поля волны $I = E^n$. Величину n вычислить для трех-четырех значений тока I .

3.5.4. Привести данные полных проводимостей измеряемого объекта (диафрагм, штырей).

3.5.5. Найти погрешность проведенных измерений, используя технические характеристики измерительных приборов, а также найденное значение проводимости согласованной нагрузки.

3.6. Факультативное задание

Экспериментально определить зависимость проводимости объекта (штыря или диафрагмы) от его геометрических размеров и длины волны в волноводе l_v (для штыря найти также зависимость проводимости от расстояния от стенки волновода до оси штыря).

3.7. Контрольные вопросы

3.7.1. На чем основан принцип измерения полных сопротивлений с помощью измерительной линии?

3.7.2. Почему перед измерением полных сопротивлений измерительная линия должна быть отградуирована?

3.7.3. Как производится градуировка измерительной линии?

3.7.4. Укажите источники основных погрешностей в определении КСВ и положения минимума при работе с измерительной линией.

3.7.5. Какие конструкции измерителей полных сопротивлений вы знаете? На чем основан принцип их работы?

3.7.6. Найдите значение реактивной диафрагмы или штыря, согласующее заданное сопротивление нагрузки (Z_n не равно Z_0). На каком расстоянии следует установить диафрагму? Задачу решить с применением круговой диаграммы полных сопротивлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милованов, О.С. Техника сверхвысоких частот / О.С. Милованов, Н.П. Собенин. – М. : Атомиздат, 1980. – 464 с.
2. Вальднер, О.А. Техника сверхвысоких частот. Учебная лаборатория / О.А. Вальднер, О.С. Милованов, Н.П. Собенин. – М. : Атомиздат, 1974. – 232 с.