

**МИНИСТЕРСТВО ПО РАЗВИТИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ И КОММУНИКАЦИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ имени Мухаммада Аль-Хорезми**

ФАКУЛЬТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра
«Системы телерадиовещания»

**СБОРНИК МЕТОДИЧЕСКИХ РУКОВОДСТВ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**

по дисциплинам «Электромагнетизм» и «Электромагнитные поля и волны»
для студентов направления образования 5350100 - «Телекоммуникационные
технологии» и «Специального факультета»

Ташкент 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3	17
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5	40
ЛИТЕРАТУРА	50

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 «ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 «ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОАКСИАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В результате выполнения лабораторной работы студенты должны приобрести знания особенностей распространения электромагнитных волн в прямоугольном и коаксиальном волноводах, устройства волноводных измерительных линий, умения в настройке линий передач в режиме бегущей волны, количественном определении степени согласования линии с нагрузкой и величины самой нагрузки, и настройке измерительной линии.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Волны в направляющих системах

В дециметровом и сантиметровом диапазонах, в основном, используются линии передачи закрытого типа, в которых вся энергия сосредоточена в пространстве, экранированном от внешней среды металлической оболочкой.

Основными, широко используемыми линиями передачи закрытого типа, являются коаксиальный волновод (состоящий из соосных круглых провода и экрана), прямоугольный, круглый и эллиптический волноводы.

В направляющих системах могут распространяться направленные волны которые делятся на поперечные (Т), магнитные (Н), электрические (Е) и смешанные.

Поперечными, волнами класса Т, называют волны, у которых в продольном направлении т. е. в направлении распространения энергии, отсутствуют составляющие векторов напряженности электрических и магнитных полей ($H_z = E_z = 0$). Необходимо отметить, что волны класса Т могут распространяться только в тех направляющих системах, в которых имеются два изолированных друг от друга проводника, по которым возможна передача энергии постоянного тока. Вектора Е и Н лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространению.

Магнитными или волнами Н, называют волны, у которых вектор магнитного поля, помимо поперечных составляющих, имеет продольную составляющую. Продольная составляющая вектора электрического поля равна нулю ($H_z \neq 0, E_z = 0$). Волны класса Н иногда называют поперечными электрическими волнами ТЕ.

Электрическими, или волнами **Е**, называют волны, у которых вектор электрического поля, помимо поперечных составляющих имеет продольную составляющую. Продольная составляющая вектора магнитного поля равна нулю ($E_z \neq 0$, $H_z = 0$). Волны **Е** иногда называют поперечными магнитными волнами **ТМ**.

Смешанными (гибридными) **НЕ** ($H > E$) или **ЕН** ($E > H$), называют волны, у которых векторы электрического и магнитного полей имеют как продольную, так и поперечные составляющие ($H_z \neq 0$, $E_z \neq 0$)

В любой направляющей системе возможно существование большого числа типов волн (из классов **Е** и **Н**), количество которых зависит от выбора рабочей длины волны λ_p (расстояние, на котором фаза волны изменяется на 2π называется длиной волны). Однако существует область длин волн, при которой распространение электромагнитных волн в волноводе невозможно (область отсечки), то есть когда рабочая длина волны λ_p больше или равна критической длине волны основного типа волны $\lambda_{кр}$ ($\lambda_p \geq \lambda_{кр}$). Основным типом волны в волноводе называется волна, обладающая максимальной критической длиной волны (критическая длина – это длина волны, начиная с которой дальнейшей ее рост приводит к невозможности распространения направленной волны в линии передач). С учётом относительной диэлектрической проницаемости материала, заполняющего волновод, рабочая длина волны должна выбираться из условия

$$\lambda_p = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon}} < \lambda_{кр}, \quad (2.1)$$

где λ - длина волны генератора (длина волны в свободном пространстве).

В воздухе $\epsilon = 1$ и $\lambda_p = \lambda$.

На рис.2.1-2.3 приведены картины мгновенного распределения электрического и магнитного полей (в продольном и поперечном сечениях) для основных типов волн волноводах. Крестиками на этих рисунках показаны силовые линии, идущие «от нас», а кружочками – идущие «к нам».

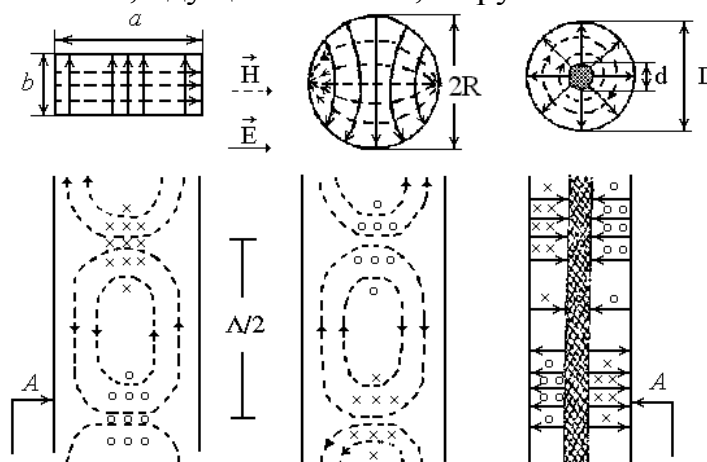


Рис.2.1. Структура поля в прямоугольном волноводе

Рис.2.2. Структура поля в прямоугольном волноводе

Рис.2.3. Структура поля в прямоугольном волноводе

Значения волнового сопротивления Z_B , фазовой V_ϕ и групповой $V_{гр}$ скоростей и длины волны Λ в волноводе в одноволновом режиме можно рассчитать по формулам:

- для прямоугольного волновода:

$$Z_B = \frac{2b}{a} \cdot \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (\lambda_p/2a)^2}}, \quad (2.2)$$

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{1 - (\lambda_p/2a)^2}}, \quad (2.3)$$

$$v_{гр} = c \cdot \sqrt{1 - (\lambda_p/2a)^2}, \quad (2.4)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda_p}{\sqrt{1 - (\lambda_p/2a)^2}}, \quad (2.5)$$

- для коаксиального волновода:

$$Z_B = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \ln \frac{D}{d}, \quad (2.6)$$

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (2.7)$$

$$v_{гр} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (2.8)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (2.9)$$

где c – скорость света в вакууме;
 a – внутренний размер широкой стенки прямоугольного волновода;
 b – внутренний размер узкой стенки прямоугольного волновода;
 D – диаметр оплётки коаксиального кабеля;
 d – диаметр центральной жилы коаксиального кабеля.

То, что длина волны в прямоугольном волноводе Λ больше длины волны в свободном пространстве λ , имеет простое физическое объяснение. Так как электромагнитные волны, распространяясь в волноводе, отражаются от его стенок (как показано на рис.2.4), то фронт волны, проходя расстояние λ_p вдоль направления распространения волны, одновременно пройдёт вдоль волновода расстояние, равное Λ .

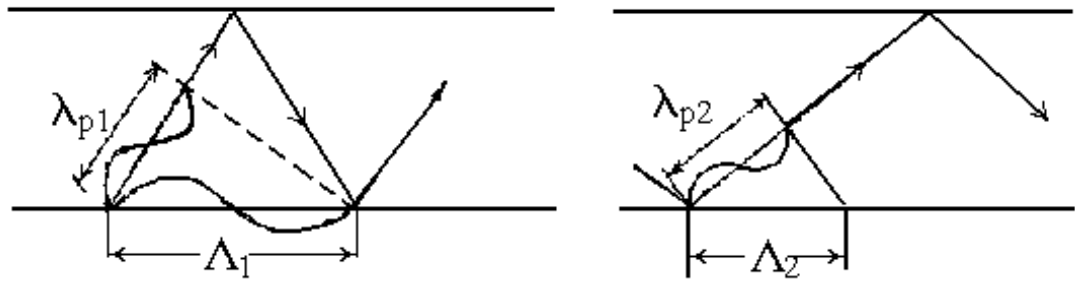


Рис.2.4. К объяснению разницы длины волны в волноводе и в воздухе

2.2. Выбор рабочей длины волны (частоты) для создания одноволнового режима

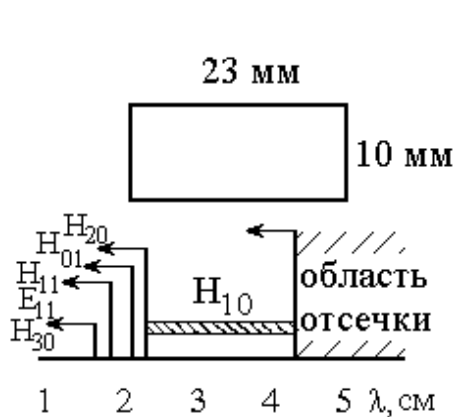


Рис.2.5. Волны в прямоугольном волноводе

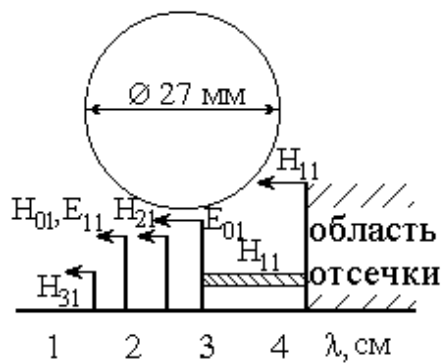


Рис.2.6. Волны в круглом волноводе

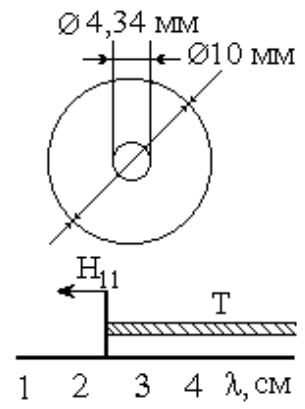


Рис.2.7. Волны в коаксиальном волноводе

Для наглядности на рис.2.5...2.7 приведены распределения критических длин волн по шкале λ_p для прямоугольного, круглого и коаксиального волноводов. В случае одноволнового (одномодового) режима по волноводу распространяется основная волна. Как видно из рис.2.5, основной волной для прямоугольного волновода является волна H_{10} с критической длиной волны $\lambda_{кр}^{H_{10}} = 2a$. Первая волна высшего порядка в прямоугольном волноводе – волна H_{20} с $\lambda_{кр}^{H_{20}} = a$. Следовательно, одноволновый режим будет наблюдаться при выполнении условия

$$a < \lambda < 2a. \quad (2.10)$$

Для круглого волновода (рис.2.6) основной волной является волна H_{11} ($\lambda_{кр}^{H_{11}} = 3,41R$), а первой волной высшего порядка – E_{01} ($\lambda_{кр}^{E_{01}} = 2,62R$), таким образом, одноволновый режим будет выполняться при условии

$$2,61R < \lambda_p < 3,41R. \quad (2.11)$$

В коаксиальном волноводе (рис.2.7) основной волной является волна класса Т ($\lambda_{кр}^T = \infty$), а первой волной высшего порядка – волна H_{11} с $\lambda_{кр}^{H_{11}} \approx \pi(D+d)/2$, т.е. одноволновый режим будет выполняться при условии

$$\pi(D+d)/2 < \lambda_p < \infty. \quad (2.12)$$

На практике, обычно, из-за большого поглощения в области более длинных волн, т.е. близких к критической длине волны основного типа, значение рабочей длины волны выбирают на 20...30% ниже критической длины волны.

2.3. Виды амплитудных распределений в волноводе

Рассмотрим влияние характера нагрузки, установленной на конце волновода, на амплитудное распределение вдоль волновода. Вдоль оси волновода, с одноволновым режимом формируется распределение поля, аналогичное распределению поля в обычной двухпроводной линии, которая работает в режиме длинной линии.

Если на конце волновода установлена короткозамыкающая нагрузка, то возникает отраженная волна, сдвинутая по фазе на 180° относительно падающей волны. Амплитуда отраженной волны равна амплитуде падающей волны. В результате наложения этих двух волн возникает стоячая волна (режим стоячей волны). Амплитудное распределение в режиме стоячей волны показано на рис.2.8 сплошной линией. Расстояние между двумя соседними минимумами напряженности поля равно половине длины волны в волноводе. При замене короткозамыкающей нагрузки на согласованную, равную по величине характеристическому сопротивлению волновода, отраженной от нагрузки волны не будет и в волноводе установится режим бегущей волны, при котором амплитудное распределение будет характеризоваться постоянным значением амплитуды распределения поля (пунктирная линия на рис.2.8).

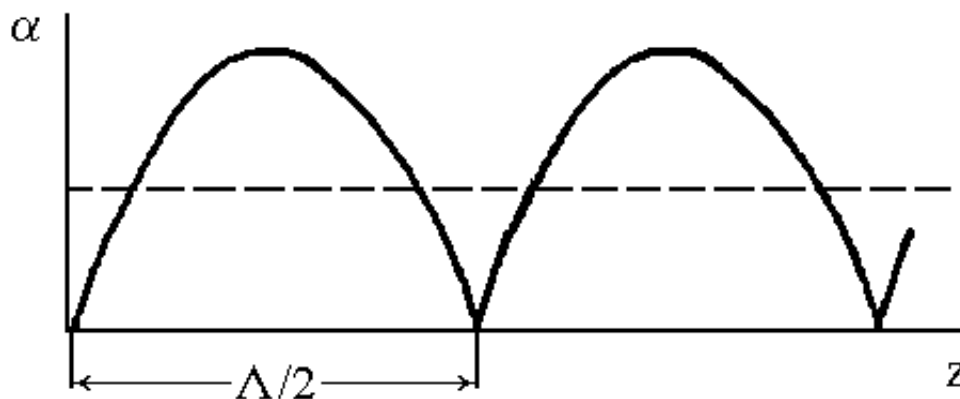


Рис.2.8. Амплитудное распределение для идеально согласованной нагрузки (пунктирная линия), короткозамыкающей и реактивной нагрузок (сплошная линия)

В тех случаях, когда от сопротивления нагрузки отражается часть падающей волны, в волноводе устанавливается смешанный режим, амплитудное распределение которого показано на рис.2.9. Амплитудное распределение в волноводе удобно характеризовать значением коэффициента бегущей волны $K_{БВ} = E_{\min}/E_{\max}$.

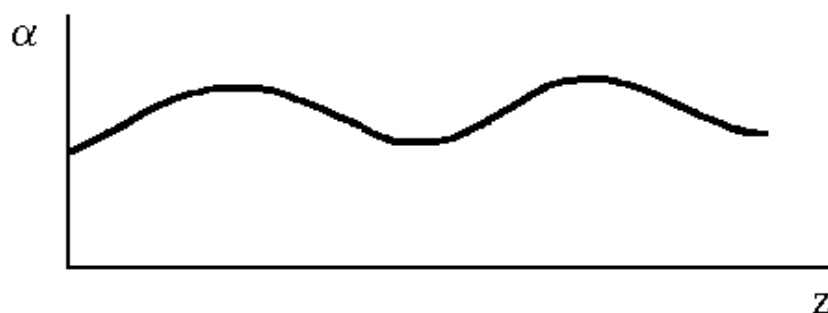


Рис.2.9. Амплитудное распределение для согласованной нагрузки

2.4. Конструкция волноводных измерительных линий

Для регистрации амплитудного распределения в волноводах используются волноводные измерительные линии. С помощью измерительной линии можно определить длину волны волноводе (Λ), коэффициент бегущей волны (КБВ) и сопротивления нагрузки (Z_n). Конструкции этих линий, выполненные на отрезках прямоугольного или жесткой коаксиального волноводов с двумя фланцами, позволяющими включать волновод в тракт между генератором и нагрузкой. В измерительной линии имеется продольная щель, у прямоугольного волновода в середине широкой стенке. Вид измерительной линии показана рис.2.11. Отличие измерительных линий состоит в разнице конструкций направляющих систем, вдоль щели перемещается измерительная головка с зондом, принцип действия которой и конструкция одинаковы для обеих измерительных линий.

Измерительная головка представляет собой объемный резонатор с короткозамыкающим поршнем, служащим для настройки объемного резонатора, с СВЧ диодом. Зонд располагается вдоль силовых линий электрического поля в волноводе. Электродвижущая сила (ЭДС), возникающая в зонде, пропорциональна напряженности поля в месте расположения зонда.

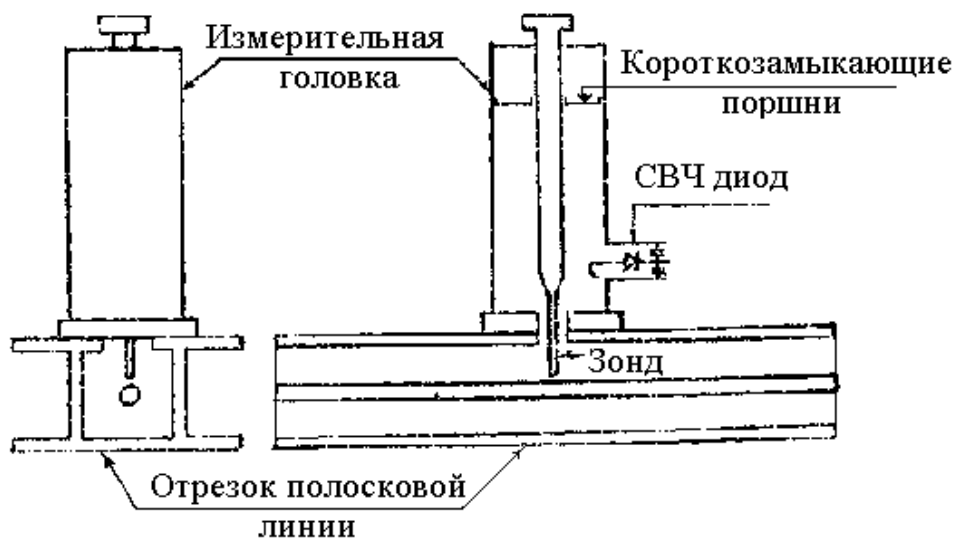


Рис.2.11. Конструкция коаксиальной измерительной линии

Эта ЭДС возбуждает объемный резонатор, создавая в нем электромагнитные колебания. Резонатор настраивается на частоту колебаний в направляющей системе, что приводит к максимальному усилению сигнала на выходе резонатора. С объемным резонатором связан кристаллический СВЧ диод, играющий роль преобразователя СВЧ колебаний в низкую частоту модуляции генератора. По принципу действия объемный резонатор схож с обычным колебательным контуром на более низких частотах.

Перемещая зонд вдоль волновода, можно найти распределение амплитуд напряженности поля (см. рис. 2.8 и 2.9), длину волны в волноводе. Регистрация амплитудного распределения производится при помощи микроамперметра, подключенного к СВЧ диоду. Ввиду того, что СВЧ диода имеет квадратичную характеристику, при определении значений КБВ, необходимо взять корень из показаний микроамперметра ($\alpha_{\min}$ и $\alpha_{\max}$)

$$КБВ = \frac{E_{\min}}{E_{\max}} = \sqrt{\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}}.$$

Иногда на практике используется коэффициент стоячей волны

$$КСВ = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \sqrt{\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}}}.$$

Коэффициент бегущей волны связан с модулем коэффициента отражения $|\Gamma|$ соотношениями:

$$КБВ = \frac{1-|\Gamma|}{1+|\Gamma|}, \quad |\Gamma| = \frac{1-КБВ}{1+КБВ}.$$

2.5. Виды нагрузочных сопротивлений

В настоящей лабораторной работе используются следующие виды нагрузок: согласованная нагрузка, короткозамыкающая нагрузка и реактивная нагрузка. Согласованная нагрузка представляет собой отрезок волновода, в котором находится вставка из смеси порошкового железа с полистиролом, поглощающая электромагнитную энергию волны (см. лаб. работу 4). Реактивная нагрузка представляет собой отрезок волновода, вдоль которого перемещается короткозамыкающий поршень. Амплитудное распределение, получаемое при реактивной нагрузке, сходно с амплитудным распределением при короткозамыкающей нагрузке, однако минимумы напряженности поля этих распределений смещены на величину Δz . Иногда на практике встречаются произвольные нагрузки, характеризующиеся активным и реактивным сопротивлениями.

2.6. Расчет сопротивления нагрузки с помощью круговой диаграммы полных сопротивлений (диаграммы Вольперта)

Круговая диаграмма полных сопротивлений устанавливает взаимную связь между составляющими полного сопротивления нагрузки, нормированных к волновому сопротивлению волновода (R_H/Z_B , X_H/Z_B), и

модулем и фазой коэффициента отражения $|\Gamma_H|$ и φ_H . Вместо значений $|\Gamma_H|$ можно использовать значения коэффициента бегущей волны КБВ или коэффициента стоячей волны КСВ, т.к. они связаны между собой.

Приведенные вместе на одном рисунке, окружности $R_H/Z_B = \text{const}$ (рис.2.12) и окружности $X_H/Z_B = \text{const}$ (рис. 2.13), образуют круговую диаграмму полных сопротивлений в полярной системе координат. Каждая точка этой круговой диаграммы соответствует нормированному комплексному сопротивлению.

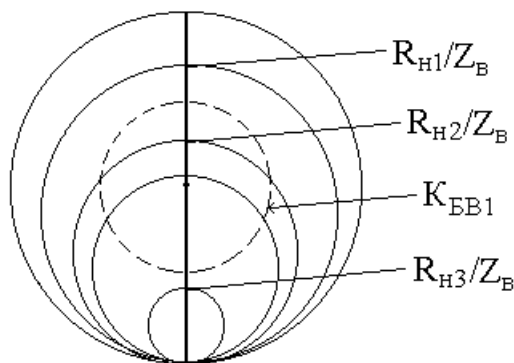


Рис.2.12. Расположение окружностей активного нормированного сопротивления на диаграмме Вольперта

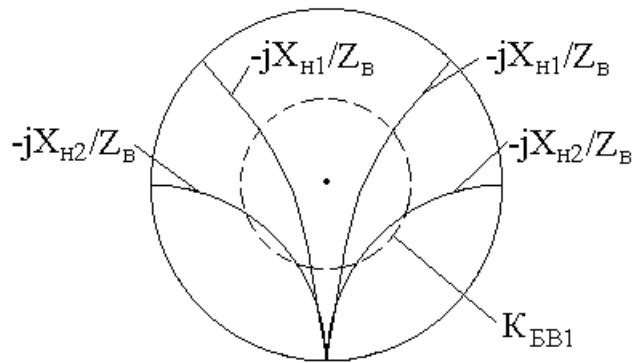


Рис.2.13. Расположение дуг реактивного нормированного сопротивления на диаграмме Вольперта

Центры окружностей постоянных значений активного нормированного сопротивления лежат на прямой, которая является осью симметрии круговой диаграммы. На этой оси нанесены значения активных нормированных сопротивлений от нуля до бесконечности. Значения КБВ совпадают на этой оси со значениями нормированного активного сопротивления от 0 до 1, а значения КСВ совпадают со значениями нормированного активного сопротивления на этой оси от 1 до бесконечности.

Центры окружностей постоянных значений нормированного реактивного сопротивления лежат на прямой, перпендикулярной оси симметрии круговой диаграммы и находятся вне диаграммы. Значения реактивных сопротивлений нанесены на внешней окружности, центр которой находится на оси диаграммы в точке $R_H/Z_B = 1$. Две внешние окружности круговой диаграммы отградуированы в относительных сдвигах волн $\Delta z/\lambda = (z_{\min} - z_{\min K3})/\lambda$ к генератору и к нагрузке (за точку отсчета берется координата узла $z_{\min K3}$ при короткозамыкающей нагрузке).

Значения нормированных реактивных сопротивлений в правой части круговой диаграммы имеют индуктивный, а в левой части – емкостной характер. На круговой диаграмме может быть укреплен прозрачный линейка, вращающийся относительно центра диаграммы. На линейке могут быть нанесены деления, соответствующие значениям КБВ, $|\Gamma|$ или КСВ.

Исходными данными для определения нормированного значения сопротивления нагрузки являются величина нормированного сдвига $\Delta z/\lambda$,

значение КБВ (K_{CB} или $|\Gamma_H|$). Сначала определяется величина нормированного сдвига $\Delta z/\lambda = (Z_{\min_{PH}} - Z_{\min_{K3}})/\lambda$, причем за положительное направление принимается такое, при котором координата минимума амплитудного распределения $z_{\min}$ ближе к генератору, чем координата узла при коротком замыкании.

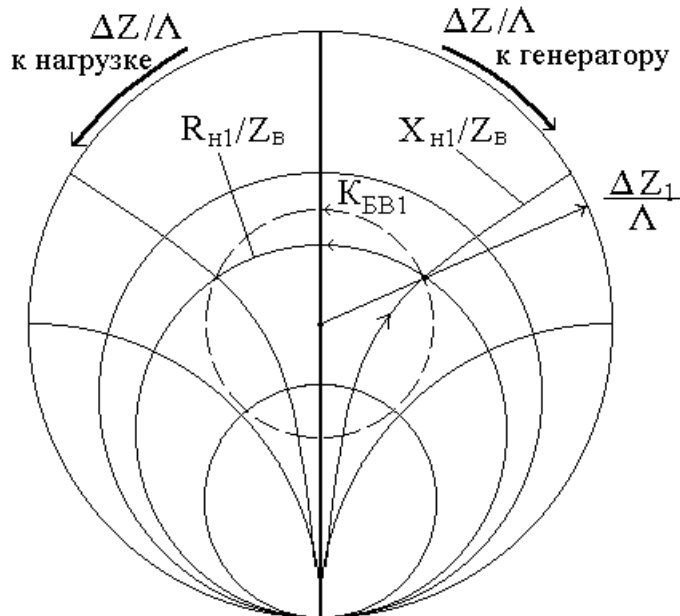


Рис.2.14. Направления для отсчета нормированного сдвига

Найдя значение нормированного сдвига волны $\Delta z/\lambda$ к генератору (к нагрузке), необходимо отложить это значение на внешней окружности круговой диаграммы и соединить эту точку воображаемой прямой линией (прозрачной линейкой) с центром диаграммы ($R_H/Z_B=1$). Далее необходимо провести окружность с радиусом, равным значению КБВ в волноводе. Центр этой окружности также находится в центре круговой диаграммы. Точка пересечения, проведенной прямой линии и окружности КБВ, обладает комплексным нормированным сопротивлением. Значение активной составляющей этого сопротивления определяется путем переноса этой точки по линиям окружности активного сопротивления (или параллельно ей) на ось симметрии круговой диаграммы, где отложены значения R_H/Z_B , а значение реактивного сопротивления – путем переноса точки пересечения по линии окружности реактивного сопротивления (или параллельно ей) на внутреннюю окружность круговой диаграммы (см. рис.2.14, 2.15).

Пример 1: $\Delta z/\lambda$ (к генератору)=0,112; КБВ=0,33; $Z_H/Z_B=0,5+i0,7$.

Пример 2: $\Delta z/\lambda$ (к нагрузке)=0,188; КБВ=0,33; $Z_H/Z_B=1,4-il,4$.

Полное комплексное сопротивление нагрузки определяется путем перемножения комплексного нормированного сопротивления на волновое сопротивление направляющей системы Z_B .

Значение Z_B для коаксиального волновода равно 50 Ом, а для прямоугольного волновода Z_B можно рассчитать по формуле (2.2).

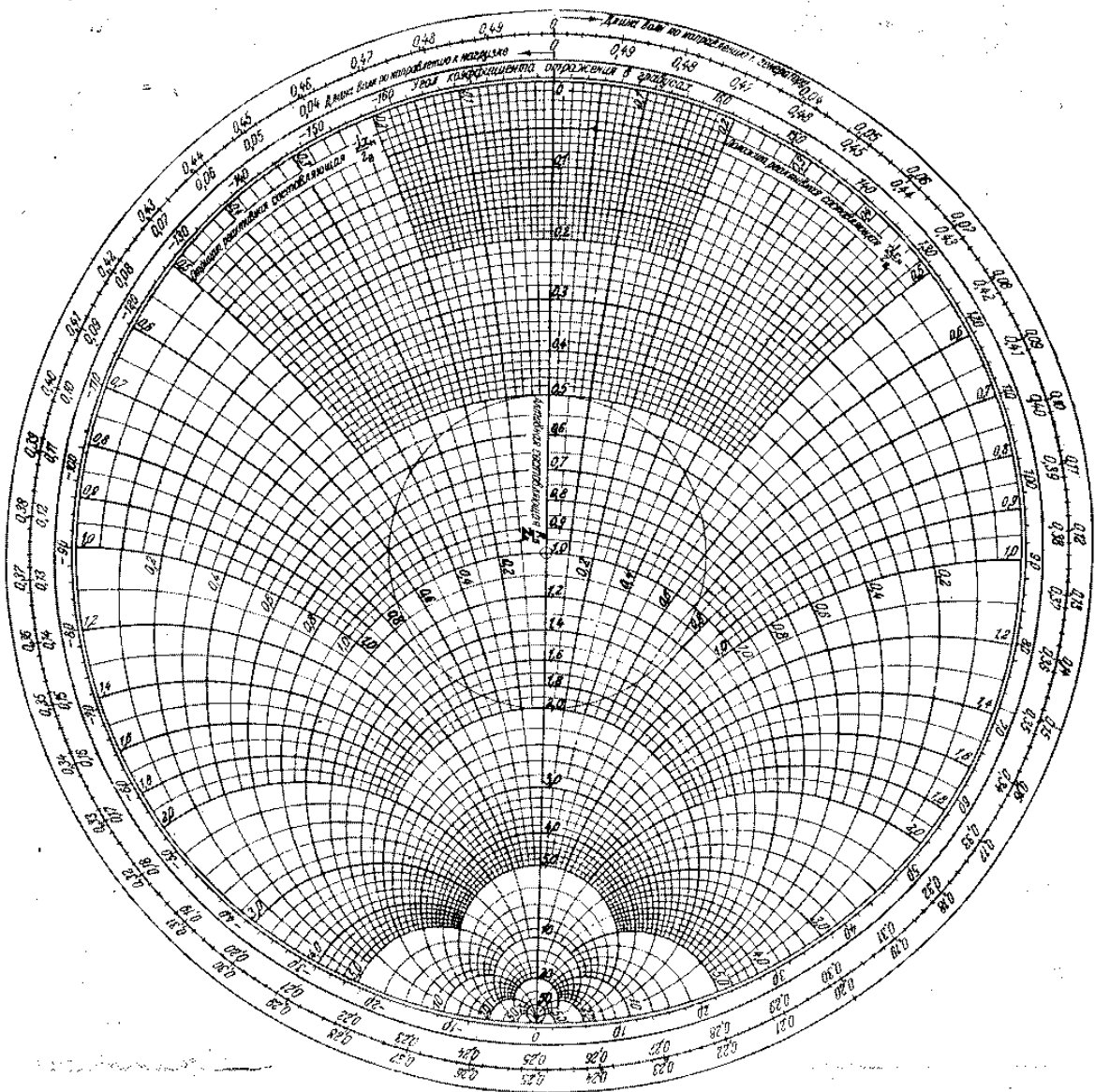


Рис. 2.15. Круговая диаграмма полных сопротивлений
(диаграмма Вольперта)

3. ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

3.1. Изучить устройство, принцип действия волноводной измерительной линии.

3.2. Рассчитать и установить одноволновый режим в волноводе.

3.3. Снять амплитудное распределение поля в волноводе при различных нагрузках. Определить значения длины волны и коэффициент бегущей волны (КБВ) в линии.

3.4. По экспериментальным данным определить характер и величину сопротивления нагрузки. Сравнить расчётные и полученные с помощью диаграммы Вольперта значения сопротивления нагрузки.

3.5. Рассчитать значения длин волн в прямоугольном волноводе при поочередном заполнении его различными видами диэлектриков.

4. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка позволяет определить вид амплитудного распределения поля вдоль волновода, длину волны в волноводе и комплексное сопротивление нагрузки. Структурная схема установки приведена на рис.4.1.

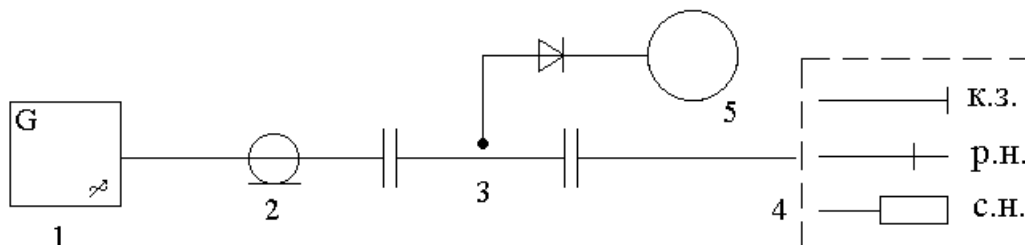


Рис.4.1. Структурная схема лабораторной установки (1- генератор; 2 – соединительный отрезок волновода; 3 – измерительная линия; 4 – набор волноводных нагрузок; индикаторный прибор)

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Расчётная часть к первому заданию

5.1.1. Определить рабочую длину волны $\lambda = c/f$

5.1.2. Рассчитать значения длины волны в волноводе Λ , с воздушным заполнением, соответствующим частоте f , по формуле (2.5) и (2.9).

5.2. Порядок проведения эксперимента на первом занятии

Построение амплитудных распределений при короткозамыкающей и согласованной нагрузках. Измерение длины волны в волноводе

5.2.1. Включить генератор и дать ему прогреться в течение 10...15 минут.

5.2.2. Установить в волноводе режим стоячей волны, для чего к выходу измерительной линии подключить короткозамыкающую нагрузку.

5.2.3. Настроить измерительную линию на частоту генератора при помощи перемещения короткозамыкающих поршней в измерительной головке линии, добиваясь максимального показания индикаторного прибора. При отсутствии показаний индикаторного прибора изменить местоположение головки на измерительной линии и настройку повторить.

5.2.4. Перемещая головку вдоль измерительной линии (изменяя координату z), снять амплитудное распределение поля в волноводе $\alpha = \varphi(z)$, то есть зависимость показаний индикаторного прибора α от расстояния z .

5.2.5. Результаты экспериментального измерения внести в табл.5.1 и по ним построить график амплитудного распределения поля в волноводе $\alpha = \varphi(z)$.

5.2.6. Определить экспериментально значения длины волны в волноводе Λ : $\Lambda=(Z_{\min 2}-Z_{\min 1}) \cdot 2$ или $\Lambda=(Z_{\max 2}-Z_{\max 1}) \cdot 2$ и сравнить их с рассчитанными значениями.

5.2.7. Установить на выходе измерительной линии согласованную нагрузку вместо короткозамыкающей нагрузки и снять амплитудное распределение аналогично пункту 5.2.4. Результаты измерений занести в таблицу типа табл. 5.1 и построить график амплитудного распределения.

5.2.8. Сделать выводы.

Таблица 5.1

Результаты экспериментального определения вида амплитудного распределения при нагрузке

		min			max			min			max		
α , мкА													$f_1=\dots$ МГц
z , мм													

5.3. Порядок проведения эксперимента на втором занятии

Измерение и расчёт значений нормированного сдвига, определения полного сопротивления нагрузки

5.3.1. Для частоты f определить координаты всех узлов амплитудного распределения в режиме стоячей волны. Данный пункт выполняется, если после выполнения пунктов 5.2.1...5.2.4 генератор выключался.

5.3.2. Определить длину волны Λ в волноводе. $\Lambda=(Z_{\min 2}-Z_{\min 1}) \cdot 2$ или $\Lambda=(Z_{\max 2}-Z_{\max 1}) \cdot 2$

5.3.3. Подключить к выходу измерительной линии реактивную нагрузку, предварительно отключив короткозамыкающую или согласованную нагрузку.

5.3.4. Определить координаты узлов $z_{\min \text{ п.н.}}$ амплитудного распределения в волноводе для трёх положений L короткозамыкающего поршня.

5.3.5. Определить значения КБВ в волноводе при короткозамыкающей и согласованной нагрузках.

5.3.6. Определить величину и направление сдвига $\Delta z=Z_{\min \text{ п.н.}}-Z_{\min \text{ кз}}$ – расстояния между ближайшими узлами амплитудных распределений при реактивной и короткозамыкающей нагрузках (для трёх положений короткозамыкающего поршня L). Направление сдвига определяется относительно координаты узла при коротком замыкании.

5.3.7. Отнормировать значения Δz к длине волны Λ в волноводе.

5.3.8. Результаты измерений и расчётов занести в таблицу типа табл. 5.2.

Результаты экспериментального исследования реактивной нагрузки

L	10 (15)	20 (25)	30 (35)
$Z_{\min\kappa z}$			
$Z_{\min\rho n}$			
Δz			
$\Delta z/\Lambda$			
КБВ			

5.4. Определение полного сопротивления нагрузки

5.4.1. По известным значениям $\Delta z/\Lambda$ и КБВ с помощью диаграммы полных сопротивлений (диаграммы Вольперта) определить нормированные значения составляющих комплексного сопротивления нагрузки. Методика определения приведена в разделе 2 описания настоящей лабораторной работы.

5.4.2. Определить значение комплексного сопротивления волноводной нагрузки.

5.4.3. Сделать выводы.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

- 6.1. Структурную схему лабораторной установки.
- 6.2. Расчёт диапазона частот одноволнового режима.
- 6.3. Результаты расчёта длин волн в волноводе.
- 6.4. Амплитудные распределения поля в волноводе в виде таблиц и графиков.
- 6.5. Результаты определения комплексного сопротивления нагрузки.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Нарисуйте коаксиальную линию, прямоугольный и круглый волноводы ([1] §9.1 [2] §13.1, [3] §3.1, §4.1, §5.1, [4] §19.1, §19.11, §19.19).

7.2. По какому признаку классифицируются направляемые электромагнитные волны? Какие направляемые электромагнитные волны называются поперечными (**Т**), какие – электрическими (**Е**), а какие – магнитными (**Н**)? ([1] §9.1 [2] §13.2, [3] §2.7, [4] §17.3).

7.3. Какие классы направляемых электромагнитных волн могут существовать в коаксиальной линии, а какие – в волноводах? ([1] §9.2, §9.4 [2] §13.5, [4] §17.3. [5] §10.3)

7.4. Что называется длиной волны? ([2] §13.4, [4] §18.2. [5] §3.5)

7.5. Что называется критической частотой (или критической длиной волны) направляющей системы? При каком соотношении рабочей частоты (рабочей длины волны) и критической частоты (критической длины волны) волна определённого типа будет распространяться по волноводу? ([1] §9.3, [2] §13.4, [3] §2.4, §3.7, [4] §18.2).

7.6. Напишите выражение для длины волны в волноводe ([1] §13.4, [3] §18.2,)

7.7. Какая волна называется основной (низшей) волной направляющей системы? ([1] §10.1.2, 10.2, 10.4, [2] §14.1, §14.2, §14.4, [3] §2.7, [4] §18.8)

7.8. Нарисуйте график распределения напряжённости электрического поля вдоль прямоугольного (коаксиального) волновода при следующих видах нагрузок: короткое замыкание; согласованная нагрузка; комплексная нагрузка ([1] §12.1.3, [2] §16.1, §16.2, [3] §7.1, [4] §21.2,).

7.9. Объясните принцип действия измерительной линии ([3] §8.7, ([6])).

7.10. Объясните смысл коэффициентов КБВ, КСВ. Как связаны между собой модуль коэффициента отражения, КБВ, КСВ? ([2] §16.2 [3] §7.1, §7.2, [4] §21.2).

7.11. Разъясните понятие «критическая длина волны» волновода ([1] §9.3, [2] §13.4, [4] §18.2).

7.12. Каково условие одноволнового режима в прямоугольном (коаксиальном) волноводe? ([1] §10.1.4, [2] §14.4, §15.7, [3] §4.4).

7.13. В чём преимущества одноволнового режима? ([1] §10.1.4 [2] §14.4, §15.7, [3] §4.4).

7.14. Нарисуйте структуру поля основной волны в прямоугольном волноводe ([1] §10.1.1, стр.275 [2] §14.1, [3] §3.5, ([4] §19.6).

7.15. Нарисуйте структуру поля основной волны в коаксиальном волноводe ([1] §10.4.2, [3] §4.4, [6])).

7.16. Объясните, почему длина волны в прямоугольном волноводe больше, чем в свободном пространстве ([1] §9.5, [2] §13.8).

7.17. Как изменится длина волны в волноводe при изменении его диэлектрического заполнения? ([3] §5.5).

7.18. Нарисуйте и объясните зависимость фазовой и групповой скоростей от длины волны для основной волны в прямоугольном волноводe ([1] §9.3, [2] §13.6 стр.248, §13.9, [3] §2.6).

7.19. Где на круговой диаграмме полных сопротивлений шкалы модуля коэффициента отражения, КБВ, КСВ? ([1] §12.1.4, [2] §16.4, [3] §7.3).

7.20. Приведите методику определения полного сопротивления нагрузки по круговой диаграмме полных сопротивлений (диаграмме Вольперта) ([1] §12.1.4, [2] §16.4, [3] §7.3).

7.21. Как можно определить значение КБВ по круговой диаграмме полных сопротивлений, если известно значение комплексного нормированного сопротивления нагрузки? ([1] §12.1.4, [2] §16.4, [3] §7.3).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

«ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНОГО НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить свойства волноводного направленного ответвителя и приобрести навыки определения его параметров с помощью лабораторной установки.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Направленный ответвитель (НО) – прибор, служащий для ответвления из основного высокочастотного тракта части мощности одной из двух бегущих волн, распространяющихся по линии в противоположных направлениях. Простейшим НО является узкополосным. Он выполнен следующим образом. Два волновода, основной и ответвляющий, имеют общую стенку с двумя отверстиями связи (рис.2.1).

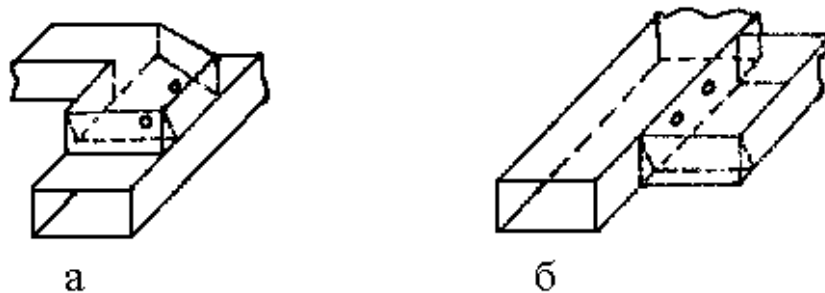


Рис.2.1. Эскизы узкополосного направленного ответвителя с отверстиями связи

Отверстия связи малы по сравнению с длиной волны в волноводе Λ и располагаются на расстоянии $\Lambda/4$. Проанализируем работу направленного ответвителя по схеме рис. 2.2.

Пусть два волноводных отрезка имеют общую стенку с двумя отверстиями связи, центры которых находятся в точках "с" и "b". Слева по основному волноводу распространяется прямая волна типа H_{10} с мощностью P_1^+ . Второй волновод, в который следует ответить часть мощности, слева имеет согласованную нагрузку $Z_{н2}=Z_0$, где Z_0 – волновое сопротивление волновода. Прямая волна P_1^+ возбуждает через отверстия связи волны в ответвляющем волновод. Вправо в ответвляющем волновод будет распространяться волна, сформировавшаяся из волн, направляющихся по путям «асd» и «abd». Поскольку расстояния, проходимые этими волнами, одинаковы, то они складываются в фазе.

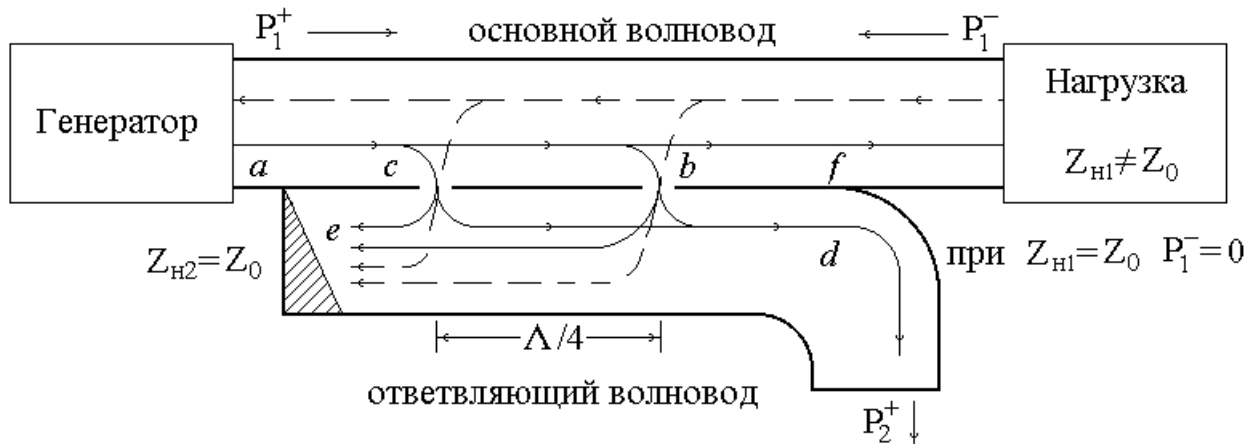
Влево, в ответвляющем волновод, (к нагрузке $Z_{н2}$) волны распространяются по путям "асе" и "abe" и имеют разность хода в половину

длины волны $\Lambda/2=(\Lambda/4+\Lambda/4)$, т.е. находятся в противофазе, и энергия волны не распространяется в этом направлении.

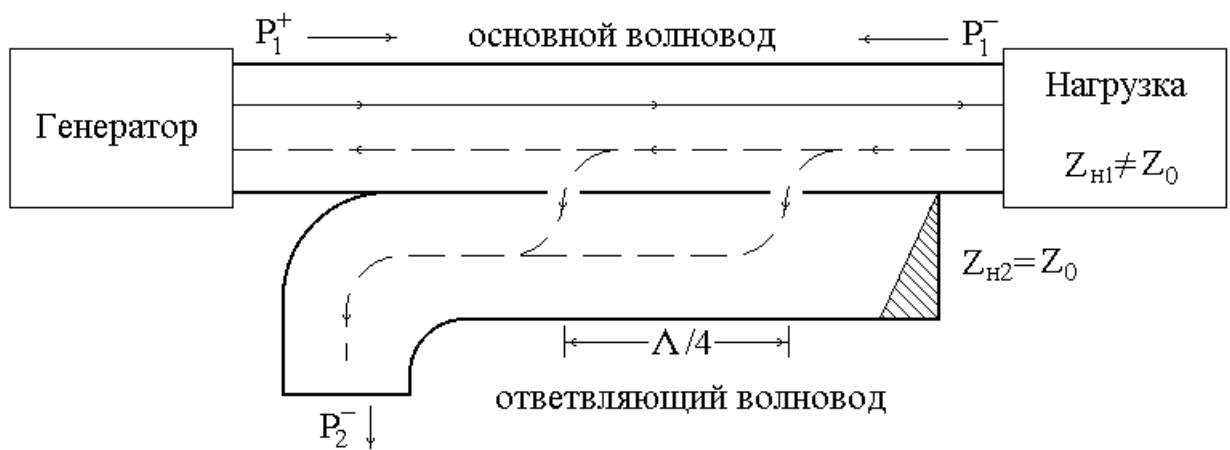
При произвольной нагрузке $Z_{н1}$ в основном волновоме формируется обратная волна с мощностью P_1^- . Части отраженной волны, пришедшие из основного волновода по путям «fce» и «fbe», сложатся в фазе в ответвляющем волновоме и поглотятся в поглощающей нагрузке $Z_{н2}$.

Таким образом, в ответвляющем волновоме прямая волна с мощностью P_2^+ и обратная волна с мощностью P_2^- разделены.

При $Z_{н1}=Z_0$ значение P_2^+ пропорционально мощности P_1^+ .



а) прямое включение направленного ответвителя



б) обратное включение направленного ответвителя

Рис.2.2. Принцип действия направленного ответвителя

Если перевернуть ответвляющий волновод так, как показано на рис. 2.2.б, то можно выделить часть мощности отраженной волны P_2^- , пропорциональную P_1^- .

Таким образом, используя два направленных ответвителя, включённых в противоположных направлениях, можно измерить значения P_2^+ и P_2^- и рассчитать значение модуля коэффициента отражения Γ из формулы

$$\Gamma^2 = P_2^- / P_2^+. \quad (2.1)$$

Если имеется один направленный ответвитель, то значения P_2^+ и P_2^- можно измерить при поочерёдном включении направленного ответвителя в прямом и обратном направлениях.

Мощность, поступающая в нагрузку, на выходе направленного ответвителя (рис.2.3) определяется выражением

$$P_n = P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}} = P_{\text{пад}}(1 - P_{\text{отр}}/P_{\text{пад}}) = P_{\text{пад}}(1 - \Gamma^2) = P_1^+(1 - \Gamma^2). \quad (2.2)$$

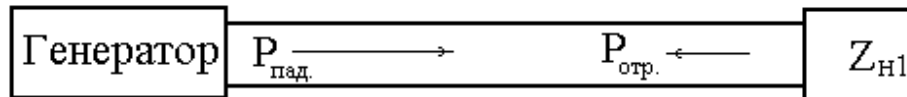


Рис.2.3. К пояснению падающей и отраженной волн в направленном ответвителе

Узкополосность направленного ответвителя следует из фиксированного расстояния в четверть длины волны между отверстиями связи. При изменении длины волны в ответвляющем волноводе волны у нагрузки $Z_{н2}$ полностью не компенсируются (сдвиг фаз не равен 180°), что наблюдается также и при неточном изготовлении направленного ответвителя.

Для широкополосности НО увеличивают число отверстий.

Основными параметрами направленного ответвителя являются *переходное ослабление* и *направленность*.

Переходное ослабление $L_{\text{пер}}$, которая характеризует отношение мощности волны P_1^+ распространяющейся по основному тракту в прямом направлении к мощности P_2^+ , ответвляемая от падающей волны в том же направлении. Переходное ослабление измеряется в децибелах и определяется по формуле

$$L_{\text{пер}} = 10 \lg(P_1^+ / P_2^+), \quad (2.3)$$

где P_1^+ - мощность волны, распространяющейся в прямом направлении по основному волноводу;

P_2^+ - мощность, ответвляемая во второй волновод в том же направлении.

Направленность $L_{\text{напр}}$, которая характеризует отношение мощности P_2^+ , ответвленной в «нормальном» направлении, к мощности P_2^- , ответвленной в обратном или «ненормальном» направлении. Направленность измеряется в децибелах и определяется по формуле

$$L_{\text{напр}} = 10 \lg(P_2^+ / P_2^-), \quad (2.4)$$

где P_2^+ - мощность, ответвленная в прямом направлении;

P_2^- - мощность, ответвленная в обратном направлении.

Для двухдырочного НО направленность $L_{\text{напр}}$ не превышает 20-25 дБ. Величина направленности быстро уменьшается при отклонении от расчетной длины волны. Это объясняется тем, что в основе действия данного

ответвителя лежит интерференция волн от двух дискретных элементов связи. Малая направленность и узкополосность являются недостатками двухдырочного ответвителя. Более широкое применение находят другие системы направленных ответвителей, в том числе однодырочные и многодырочные ответветители, также ответветители щелевого типа.

Направленные ответветители широко применяются в измерительной технике, а также для контроля работы аппаратуры сверхвысоких частот, например для измерения мощности, поступающей в нагрузку, двойной направленный ответветитель в качестве измерителя КСВ (рефлектометр).

3.ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

3.1. Исследовать направленный ответветитель: ознакомиться с устройством и областью применения; измерить переходное ослабление и направленность.

3.2. Измерить мощность СВЧ поля, поглощаемую нагрузкой, с помощью направленного ответвителя.

4. МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Измерение переходного ослабления и направленности направленного ответвителя

Собрать установку, как показано на рис.4.1. Для этого необходимо подключить направленный ответветитель к выходу волноводного тракта от генератора (например, к выходу измерительной линии).

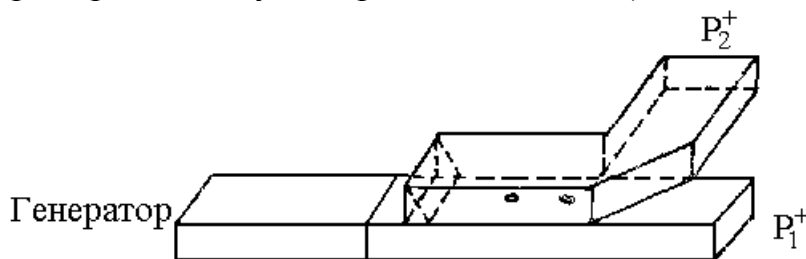


Рис.4.1. К определению мощностей на плечах направленного ответвителя прямого подключения

Подсоединяя измеритель мощности поочередно к ответвляющему и основному волноводам направленного ответвителя, измерить значения мощности P_1^+ и P_2^+ . Перевернуть направленный ответветитель (см. рис.4.2) и измерить значения мощности P_1^- и P_2^- . При этих измерениях на свободные выходы направленного ответвителя устанавливается согласованная нагрузка.

При включении направленного ответвителя в обратном направлении с согласованной нагрузкой на выходе основного волновода ответвляемая мощность будет очень мала. Поэтому, если Вы не увидите отклонения стрелки индикаторного прибора, можно условно принять $P_2^- = 0,02$ мВт.

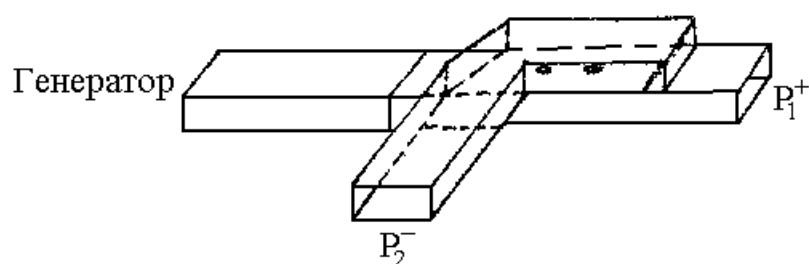


Рис.4.2. К определению мощностей на плечах направленного ответвителя обратного подключения

Параметры $L_{\text{пер}}$ и $L_{\text{напр}}$ рассчитываются по формулам (2.3) и (2.4).
Результаты измерений и расчёта занести в таблицу типа табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты экспериментального исследования характеристик
направленного ответвителя на частоте МГц

P_1^+ , мВт	P_2^+ , мВт	P_2^- , мВт	$L_{\text{перех}}$, дБ	$L_{\text{напр}}$, дБ
	при КЗ:	при КЗ:		
	при СЗ:	при СЗ:		
	при ПН:	при ПН:		

4.2. Определение величины мощности электромагнитного поля, поглощаемой нагрузкой, при помощи направленного ответвителя

В волноводном тракте непосредственное измерение уровня мощности электромагнитного поля СВЧ, распространяющегося в волноводе, затруднено.

Измерение и контроль уровня мощности производят с помощью направленных ответвителей, включенных в волноводный тракт.

В настоящей лабораторной работе измерение мощности, поступающей в нагрузку, размещенную на конце волновода, производится с помощью одного НО. Для этого необходимо выполнить следующие операции.

Установить произвольную волноводную нагрузку (сопротивление нагрузки не равно волновому сопротивлению волновода) на выходе основного волновода направленного ответвителя (рис.4.3) и измерить значение мощности P_2^- .

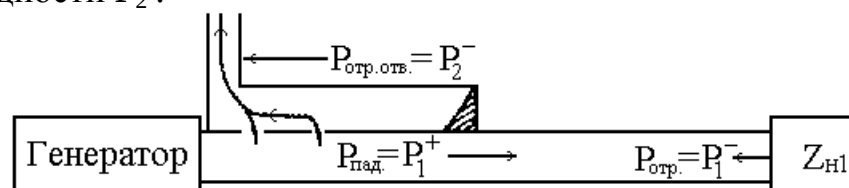


Рис.4.3. К пояснению мощностей на плечах направленного ответвителя обратного подключения

Включить направленный ответвитель в противоположном направлении (рис.4.4) и измерить значение мощности P_2^+ .

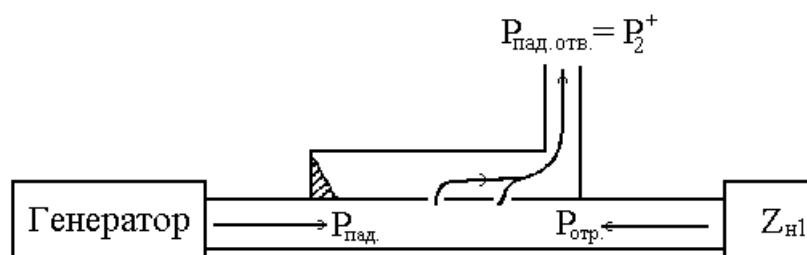


Рис.4.4. К пояснению мощностей на плечах направленного ответвителя прямого подключения

Отсоединить произвольную нагрузку от основного волновода направленного ответвителя и вместо неё подключить измеритель мощности, измерить значение мощности P_1^+ .

С помощью формулы (2.2) рассчитать значение мощности P_n электромагнитного поля, поглощаемой произвольной нагрузкой.

Результаты измерений и расчёта занести в таблицу типа табл. 4.2

Таблица 4.2

Результаты определения величины мощности, поглощаемой произвольной нагрузкой на частоте МГц

P_1^+ , мВт	P_2^+ , мВт	P_2^- , мВт	P_n , мВт

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчёт должен содержать:

5.1. Структурные схемы для определения переходного ослабления и направленности направленного ответвителя. Значения измеренных мощностей P_1^+ , P_2^+ и P_2^- и результаты расчета параметров $L_{пер}$ и $L_{напр}$ (табл.4.1).

5.2. Структурные схемы измерения мощности.

5.3. Результаты расчета мощности, поступающей в нагрузку, на выходе направленного ответвителя (табл.4.2).

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Какое устройство называется направленным ответвителем? ([1] §14.1.1, [2] §17.5, [3] §8.8, [4] §24.10).

6.2. Нарисуйте волноводный двухдырочный направленный ответвитель и объясните его принцип действия ([1] §14.1.1, [2] §17.5, [3] §8.8, [4] §24.10)

- 6.3. Какими параметрами характеризуются направленные ответвители? ([3] §8.8, [4] §24.10).
- 6.4. Дайте определения переходного ослабления и направленности направленного ответвителя ([3] §8.8, [4] §24.10).
- 6.5. Нарисуйте структурную схему установки для измерения и контроля мощности в волноводном тракте с помощью направленного ответвителя ([3] §8.9).
- 6.6. Нарисуйте структурные схемы установок для определения параметров направленного ответвителя. ([3] §8.8).
- 6.7. Нарисуйте структурную схему установки для определения модуля коэффициента отражения с помощью двух направленных ответвителей ([3] §8.9).
- 6.8. Почему волноводный двухдырочный ответвитель является узкополосным устройством? Как можно увеличить рабочую полосу частот направленного ответвителя? ([1] §14.1 [2] §17.5, [3] §8.8, [4] §24.15).
- 6.9. Для чего предназначена детекторная секция (головка)? Нарисуйте волноводную детекторную секцию и объясните принцип её действия ([3] §8.6).
- 6.10. Для чего предназначена поглощающая (согласованная) нагрузка? Нарисуйте поглощающую нагрузку для прямоугольного волновода, объясните принцип её действия ([3] §8.3, [4] §24.2)
- 6.11. Объясните принцип работы многодырочного волноводного направленного ответвителя ([1] §14.1 [2] §17.5, [3] §8.8, [4] §24.15).
- 6.12. Объясните функцию отверстия связи как возбуждающего устройства ([1] §14.1 [2] §17.4, [3] §8.8).
- 6.13. Где применяется направленные ответвители ([3] §8.9).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 «ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛНОВОДНЫХ ТРАКТОВ»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Приобретение умений по измерению параметров элементов и узлов трактов СВЧ на основе знаний об их свойствах.

Получение навыков расчета распределения поля в плечах СВЧ-узлов с помощью их матриц рассеяния.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Диафрагмы

Диафрагмой называют тонкую металлическую пластину, расположенную в поперечной плоскости волновода и частично перекрывающую его поперечное сечение. Для согласования волновода с нагрузкой на фиксированной частоте на практике используются специфические для волноводов элементы, такие как *диафрагмы*, индуктивные или емкостные, штыри и др. Диафрагмой называют тонкую металлическую пластину, расположенную в поперечной плоскости волновода и частично перекрывающую его поперечное сечение. На рис.2.1 показаны примеры диафрагм для волновода прямоугольного сечения.

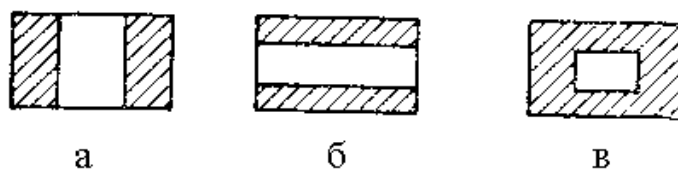


Рис.2.1. Волноводные диафрагмы (а – индуктивная, б – емкостная, в – индуктивно-емкостная)

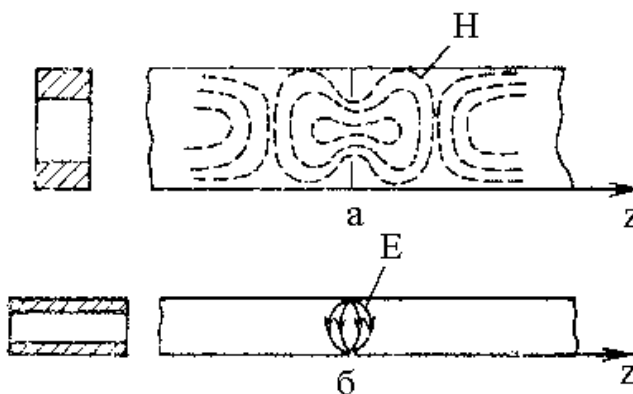


Рис.2.2. Пояснение принципа работы волноводных диафрагм (а – индуктивной, б – емкостной)

Диафрагма изображенная на рис.2.2.а частично уменьшающая лишь размер широкой стенки прямоугольного волновода, называется индуктивной диафрагмой. Из рисунка видно, что в индуктивной диафрагме создаётся концентрация магнитного поля и потому такая диафрагма действует как индуктивность, включённая параллельно линии. Диафрагма изображенная на рис.2.2.б, частично уменьшающая лишь размер узкой стенки прямоугольного волновода, называется емкостной диафрагмой. Из рисунка видно, что в емкостной диафрагме концентрируется электрическое поле и такая диафрагма действует как ёмкость, включённая параллельно линии. Диафрагма, изображённая на рис.2.1.в, образованная совмещением в одном плоскости волновода индуктивной и емкостной диафрагм, называется резонансной диафрагмой. Параллельное соединение индуктивности и ёмкости, соответствует включению в линию параллельного колебательного контура. Подбором размеров диафрагмы можно настроить её в резонанс с рабочей частотой, и тогда она не будет шунтировать волновод.

2.2. Согласованные нагрузки

Согласованная нагрузка – оконечное устройство высокочастотного тракта, служащее для полного поглощения, без отражения и без излучения в окружающее пространство, всей передаваемой по тракту мощности. Согласованные нагрузки применяют также в качестве эквивалентов антенн при настройке передающей аппаратуры и в виде меры сопротивления в измерительных устройствах СВЧ.

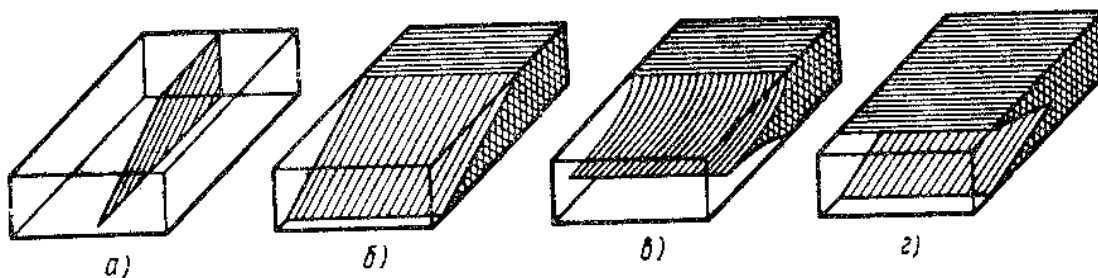


Рис.2.3. Волноводные согласованные нагрузки

Волноводные нагрузки низкого уровня мощности обычно выполняются в виде отрезков волновода, закороченных на конце и содержащих поглощающие пластинки, расположенные вдоль оси волновода в плоскости электрического поля. Согласование пластинок с однородным волноводом осуществляется приданием им специальной клинической формы, как показана на рисунке 2.3. При изготовлении пластин часто используют диэлектрик (керамика, гетинакс и др.), покрытый слоем графита, окиси олова или очень тонким слоем распыленного металла, например платины. Длина скоса (клина) подбираются опытным путем таким образом, чтобы получить наименьшую величину КСВ в возможно более широкой полосе частот.

Обычно клин имеет длину, равную половине длины волны в волноводе и более. Практически вполне возможно создание согласованных нагрузок, характеризующихся величиной КСВ не более 1,02 – 1,05 в полосе частот порядка 20 – 30% и более от средней частоты. Очень хорошие нагрузки имеют КСВ порядка 1,01 в той же полосе частот. В маломощных нагрузках вставки имеют вид тонких диэлектрических пластин, покрытых графитовыми или металлическими пленками (рис.2.3.а). Объемные поглощающие вставки (рис.2.3.б...г) с большой мощностью рассеяния выполняют из композитных материалов на основе порошков графита, карбонильного железа или карбида кремния. Для уменьшения отражения поглощающим вставкам придают вид клиньев или пирамид.

Основной характеристикой согласованной нагрузки является модуль её коэффициента отражения $|\Gamma|$ или соответствующее значение КБВ или КСВ в заданной полосе частот. Технически возможно создание нагрузок с $|\Gamma| \leq 0,01$ в относительной полосе частот 20...30% и более. Ввиду малости $|\Gamma|$ требования к фазе коэффициента отражения не предъявляются. Другой важной характеристикой нагрузки является допустимая поглощаемая мощность.

2.3. Повороты линий передачи

Изгибы и изломы линий передачи относятся к числу нерегулярностей, снижающих качество согласования и электропрочность. В угловых изломах любых линий передачи в той или иной мере возбуждаются поля нераспространяющихся волн высших типов, в которых происходит накопление электромагнитной энергии. Для минимизации возникающих из-за этого отражений изломы дополняют различными согласующими элементами. Подрезание внешних углов поворота оказывается эффективным способом при уменьшении отражений в прямоугольных и круглых волноводах (рис.2.4.а).

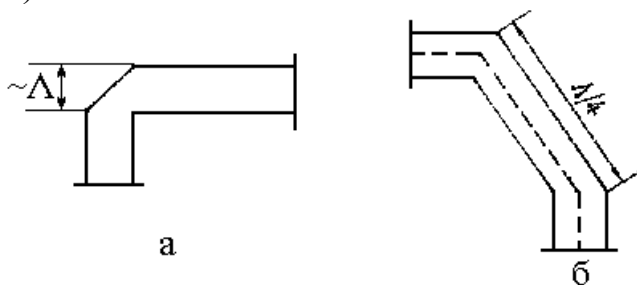


Рис.2.4. Волноводные изломы

Концентрация силовых линий электрического поля в области резких изломов снижает электрическую прочность тракта. Этот недостаток в значительной мере устраняется в двойных изломах (рис.2.4.б) и в плавных изгибах (рис.2.5). Причём, чем больше радиус плавного изгиба, там меньше отражение от него. Практически отражения электромагнитных волн пренебрежимо малы при радиусе изгиба порядка 3...5 длин волн в

волноводе.

Известно, что силовые линии вектора $\mathbf{E}$ основной волны H_{10} прямоугольного волновода начинаются и заканчиваются на широких стенках волновода и перпендикулярны к ним. Силовые линии вектора $\mathbf{H}$ представляют собой замкнутые витки, расположенные в плоскостях, параллельных широким стенкам волновода (рис.2.5).

Если изгиб (излом) прямоугольного волновода осуществляется параллельно силовым линиям электрического поля (рис.2.5.а), то такой изгиб называется $\mathbf{E}$ –плоскостным изгибом. Если изгиб осуществляется параллельно силовым линиям магнитного поля (рис.2.5.б), то он называется $\mathbf{H}$ –плоскостным изгибом (изломом).

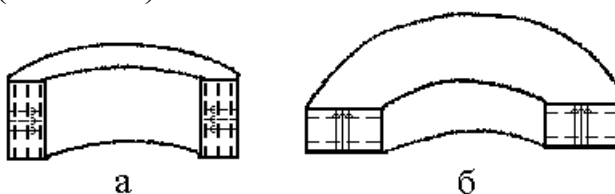


Рис.2.5. Плавные волноводные изгибы (повороты)

----- $\mathbf{H}$ – силовые линии магнитного поля

— $\mathbf{E}$ – силовые линии электрического поля

2.4. Волноводные тройники

Тройником называется трехплечное устройство, образованное сочленением трех отрезков линии передач. Тройники обычно используют либо для деления мощности входного сигнала на две (общем случае неравные части), которые передаются по отдельным линиям передач, либо для сложения и передачи по одной линии сигналов, создаваемых двумя источниками. В зависимости от типа сочленяемых линий тройники называют волноводными, коаксиальными, полосковыми, коаксиально – волноводными и т.д. Одним из наиболее широко встречающихся видов тройников является Т–образное разветвление или волноводный тройник. Для волноводных тройников используют, кроме того, дополнительную классификацию. Если плоскость разветвления совпадает с плоскостью, в которой лежат силовые линии вектора $\mathbf{E}$ основной волны H_{10} , то такой тройник называется $\mathbf{E}$ –тройником или тройником $\mathbf{E}$ –типа (рис.2.6), в случае разветвления в плоскости магнитных силовых линий – $\mathbf{H}$ –тройником или тройником $\mathbf{H}$ –типа (рис.2.7).

Обозначим условно плечи тройников буквами А, Б, В.

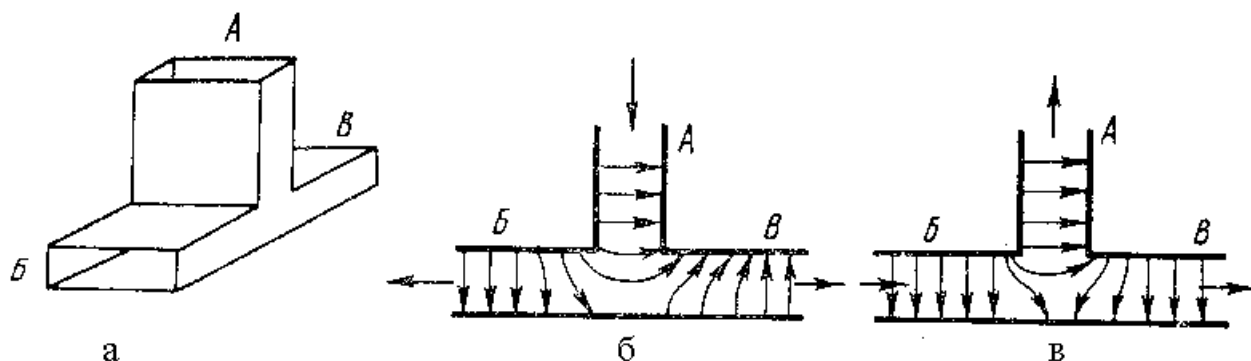


Рис.2.6. Волноводный Е–тройник

Рассмотрим работу Е–тройника. Если волна Н10 распространяется по волноводу А к месту разветвления (рис.2.6.б), то она будет ответвляться в волноводы Б и В, и на одинаковых расстояниях от места разветвления в этих волноводах волны будут в противофазе. Отсюда следует, что если по волноводам Б и В к месту разветвления придут волны в противофазе, то они будут переходить в волновод А, совпадая по фазе и, следовательно, в этом волноводе будут складываться. В противоположном случае, когда по волноводам Б и В к волноводу А подходят волны, имеющие одинаковые фазы, ответвляясь в волновод А, они в этом волноводе будут иметь противоположные фазы и при одинаковых амплитудах уничтожатся. Если же волна движется вдоль волновода БВ, то часть энергии ответвляется в волновод А (рис.2.6.в).

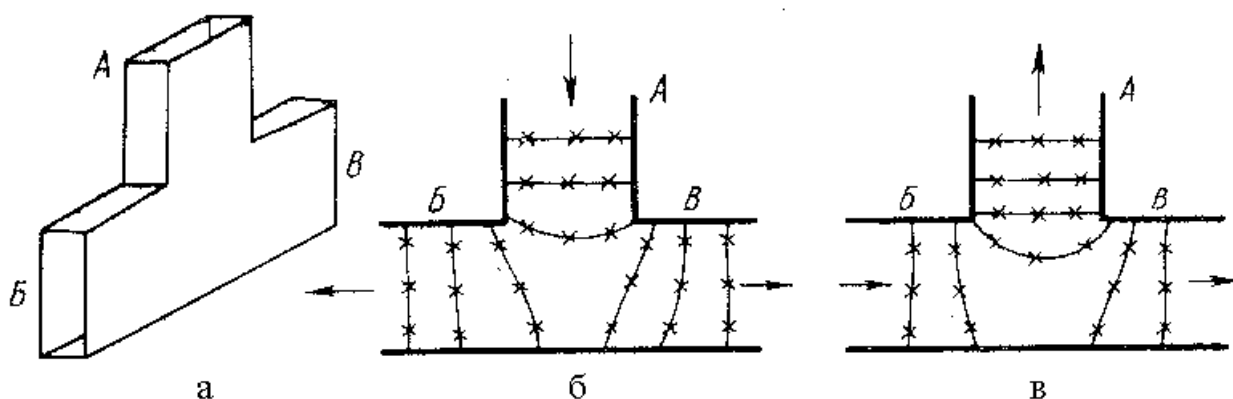


Рис.2.7. Волноводный Н–тройник

Рассмотрим работу Н–тройника. Если волна Н10 подходит по волноводу А к месту разветвления (рис.2.7.б), то волны, ответвляющиеся в волноводы Б и В, на равных расстояниях от места разветвления, имеют одинаковые фазы. На рис. 2.7.б крестики изображают направление электрических силовых линий перпендикулярно к плоскости рисунка («от нас»), а тонкие линии – показывают фронт волны. Справедливо и обратное свойство Н–тройника – если к разветвлению по волноводам Б и В приходят волны с одинаковой фазой, то они будут ответвляться в волновод А также с одинаковыми фазами и складываться. Но если по волноводам Б и В к

волноводу А подходят волны с одинаковыми амплитудами, но противоположными фазами, то они не будут возбуждать волн в волноводе А. При движении волны вдоль волновода БВ часть её энергии ответвляется в волновод А (рис.2.7.в).

В дальнейшем плечи тройников будем обозначать цифрами 1, 2, 3 (рис.2.10, 2.11).

Волноводные разветвители могут иметь также 4 плеча, т.е. представлять собой 8-полюсник. Такие соединения называются мостовыми. Мост характеризуется тем, что волны в выходных плечах равны по величине и имеют постоянный фазовый сдвиг в рабочем диапазоне частот. Наиболее широкое распространение получило мостовое устройство – двойной волноводный тройник (рис.2.12). Если три плеча моста нагружены на согласованные нагрузки, а четвёртая обеспечивает пропускание основной волны H_{10} , то двойной волноводный тройник проявляет следующие замечательные свойства. Сигнал, поданный в Е–плечо, делится на 2 равные части и противофазно проходит в плечи 2 и 3, а в плечо 4 не попадает. Сигнал, поданный в Н–плечо делится поровну между плечами 2 и 3 на синфазные волны и не проходит в Е–плечо. Если в плечи 2 и 3 поданы синфазные колебания, то они сложатся в Н–плече, а если противофазные, то сложение произойдёт в Е–плече. Таким образом, между противоположными парами плеч 2-3 и 1-4 существует взаимная развязка: сигнал, поданный в плечо 2, не проходит в плечо 3 (и наоборот); сигнал, поданный в плечо 1, не проходит в плечо 4 (и наоборот).

Анализ свойств СВЧ-устройств наиболее упрощается при представлении их эквивалентной схемой в виде многополюсника (четырёх-, шести-, восьмиполюсников). Применение эквивалентных схем позволяет строго описать явления в волноводных линиях передачи, работающих на низшем типе колебаний. Преимущество таких эквивалентных схем заключается в том, что к ним применим аппарат матричного исчисления. В теории СВЧ наиболее распространена волновая матрица рассеяния [S].

2.5. Анализ распределения поля в плечах разветвителя с помощью матрицы рассеяния

Представление волноводных устройств с помощью матриц рассеяния позволяет в простой компактной форме описывать сложные волноводные тракты. Матрица рассеяния даёт количественную связь амплитуд всех выходящих из узла волн с амплитудами входящих в него (заданных) волн. В литературе входящие волны называют также падающими, а выходящие – отраженными. На рис.2.8 изображен случай, когда в устройство подается возбуждающая (падающая) волна лишь в одно из плеч E_1^+ . Данная волна распределяется между плечами этого узла (E_2^- , E_3^- , E_4^-), а часть её (E_1^-) отражается обратно в генератор.

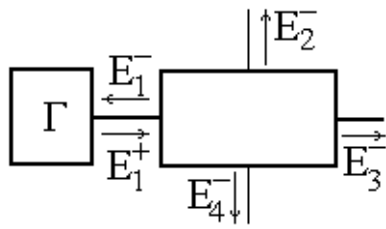


Рис.2.8. К пояснению волн на плечах многополюсника при возбуждении одного плеча

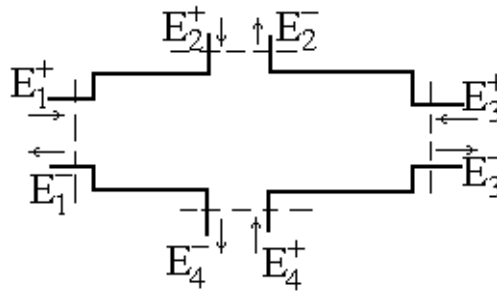


Рис.2.9. К пояснению волн на плечах многополюсника при возбуждении всех плеч

Если же подать возбуждающие амплитуды E^+ во все плечи (рис.2.9), то естественно полагать, что в формировании амплитуд напряжённости отражённой волны, например, в плече 1 будут участвовать все падающие волны: $E_1^- = S_{11}'E_1^+ + S_{12}'E_2^+ + S_{13}'E_3^+ + S_{14}'E_4^+$, где S_{11}' , S_{12}' , S_{13}' , S_{14}' – коэффициенты пропорциональности. В общем случае падающие и отраженные волны связаны матричным уравнением вида

$$\begin{bmatrix} E_1^- \\ E_2^- \\ E_3^- \\ E_4^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_2^+ \\ E_3^+ \\ E_4^+ \end{bmatrix} \text{ или } [E^-] = [S'] \cdot [E^+]. \quad (2.1)$$

В расчётной практике удобнее пользоваться не абсолютными значениями амплитуд поля E (или H), а их нормированными значениями. Если провести нормирование амплитуд волн и ввести специальный коэффициент $\dot{v} = E/E^1$, где E^1 – амплитуда бегущей волны с мощностью $P=1\text{Вт}$, то уравнение (2.1) преобразуется к виду

$$[v^-] = [S] \cdot [v^+], \quad (2.2)$$

где коэффициент $\dot{v}$ является безразмерной (нормированной) амплитудой волны, связанной с переносимой мощностью P волны соотношением

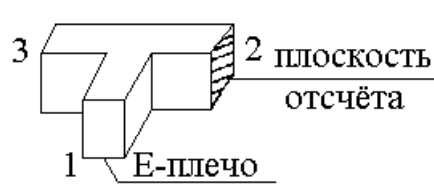
$$|\dot{v}| = \sqrt{P} \quad \text{или} \quad P = |\dot{v}|^2. \quad (2.3)$$

Коэффициенты S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{44} представляют собой коэффициенты отражения в соответствующих плечах узла при условии отсутствия падающих волн в других плечах. Все остальные коэффициенты являются коэффициентами передачи. Например, S_{12} – коэффициент передачи из второго плеча в первое при отсутствии падающей волны в первом плече. Коэффициенты S_{mn} устанавливаются расчётным или экспериментальным путём.

Так как в СВЧ устройствах напряженность поля в линии изменяется от точки к точке, то вводят понятие "плоскость отсчета", относительно которой определены коэффициенты матрицы. На рис.2.9 плоскости отсчета каждого

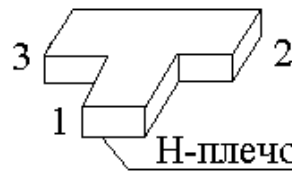
плеча условно обозначены пунктирными линиями.

Приведём матрицы рассеяния разветвителей, используемых в настоящей лабораторной работе. Матрицы других распространенных СВЧ устройств можно найти, например, в [2] или [4].



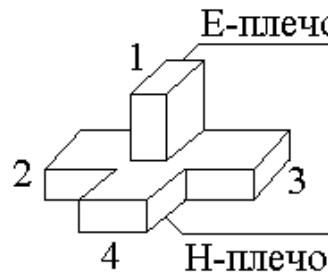
$$[S] = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{2} & \sqrt{2} \\ -\sqrt{2} & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Рис.2.10. Волноводный Е–тройник с согласованным плечом 1 и матрица распределения



$$[S] = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ \sqrt{2} & -1 & 1 \\ \sqrt{2} & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

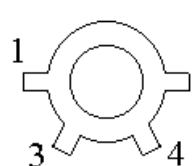
Рис.2.11. Волноводный Н–тройник с согласованным плечом 1 и матрица распределения



$$[S] = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Рис.2.12. Двойной волноводный тройник и матрица распределения

Двойной волноводный тройник состоит из Е– и Н–тройников, имеющих те же плоскости отсчёта.



$$[S] = -\frac{j}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Рис.2.13 Волноводный кольцевой мост

В качестве примера расчета распределения поля в СВЧ устройствах с помощью матрицы рассеяния решим задачу следующего содержания. Найдем распределение мощностей волн в волноводно-кольцевом мосте (рис.2.13), в плечи 2 и 3 которого поданы сигналы от передатчиков с мощностью 900Вт. Сдвиг фазы колебаний векторов напряжённости поля в плечах составляет 180^0 . В плечо 1 включена антенна, согласованная по входному сопротивлению. В плечо 4 подключена согласованная нагрузка. Требуется определить распределение мощностей в плечах моста.

Учитывая, что коэффициенты матрицы рассеяния определены по нормированной амплитуде поля, а не по мощности, находим (с учетом сдвига фаз) комплексные амплитуды падающих волн:

$$\dot{v}_1^+ = 0, \quad \dot{v}_2^+ = -30, \quad \dot{v}_3^+ = 30, \quad \dot{v}_4^+ = 0.$$

Составим следующую схему расчёта на матрице заданного моста

$$[S] = \frac{-j}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} \rightarrow v_1^- = -j(\dot{v}_1^+ \cdot 0 - \dot{v}_2^+ \cdot 1 + \dot{v}_3^+ \cdot 1 + \dot{v}_4^+ \cdot 0) / \sqrt{2}, \\ \rightarrow v_2^- = -j(-\dot{v}_1^+ \cdot 1 + \dot{v}_2^+ \cdot 0 + \dot{v}_3^+ \cdot 0 + \dot{v}_4^+ \cdot 1) / \sqrt{2}, \\ \rightarrow v_3^- = -j(\dot{v}_1^+ \cdot 1 + \dot{v}_2^+ \cdot 0 + \dot{v}_3^+ \cdot 0 + \dot{v}_4^+ \cdot 1) / \sqrt{2}, \\ \rightarrow v_4^- = -j(\dot{v}_1^+ \cdot 0 + \dot{v}_2^+ \cdot 1 + \dot{v}_3^+ \cdot 1 + \dot{v}_4^+ \cdot 0) / \sqrt{2}. \end{cases}$$

Поскольку сигналы подаются в плечи 2 и 3, значит, $\dot{v}_1^+ = \dot{v}_4^+ = 0$.

Тогда $\dot{v}_1^- = -j(\dot{v}_3^+ - \dot{v}_2^+) / \sqrt{2},$

$$\dot{v}_2^- = -j(\dot{v}_4^+ - \dot{v}_1^+) / \sqrt{2},$$

$$\dot{v}_3^- = -j(\dot{v}_1^+ + \dot{v}_4^+) / \sqrt{2},$$

$$\dot{v}_4^- = -j(\dot{v}_2^+ + \dot{v}_3^+) / \sqrt{2}.$$

В нашем случае $\dot{v}_2^+ = -30$ и $\dot{v}_3^+ = 30$, поэтому

$$\dot{v}_1^- = -j(30 + 30) / \sqrt{2} = -j60 / \sqrt{2},$$

$$\dot{v}_2^- = -j(0 - 0) / \sqrt{2} = 0,$$

$$\dot{v}_3^- = -j(0 + 0) / \sqrt{2} = 0,$$

$$\dot{v}_4^- = -j(-30 + 30) / \sqrt{2} = 0.$$

Распределение мощностей по плечам моста:

$$P_1^- = |-j60 / \sqrt{2}|^2 = 1800 \text{ Вт}, \quad P_2^- = 0 \text{ Вт}, \quad P_3^- = 0 \text{ Вт}, \quad P_4^- = 0 \text{ Вт}.$$

Ответ показывает, что произошло сложение мощностей передатчиков в антенне, подключённой к плечу 1.

Другие примеры расчёта распределения поля по плечам СВЧ устройств с помощью матрицы рассеяния можно найти, например, в [4].

3. ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

3.1. Изучить конструкции элементов волноводных трактов.

3.2. Экспериментально определить частотную зависимость модуля коэффициента отражения *согласованной волноводной нагрузки* при помощи измерительной линии.

3.3. Экспериментально на этих же частотах определить частотную зависимость модуля коэффициента отражения элементов: *волноводного изгиба* и *волноводного излома*.

3.4. Измерить распределение поля в плечах разветвителя *двойного волноводного тройника*.

3.5. Рассчитать распределение поля в плечах двойного волноводного тройника. Сравнить экспериментальные и теоретические результаты.

3.6. Исследовать мост из двух двойных волноводных тройников.

4. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка позволяет определить значения модуля коэффициента отражения от согласованной нагрузки, волноводных изгибов и изломов, и их частотную зависимость (структурная схема на рис.4.1.а), а также распределение поля в разветвляющих устройствах (структурная схема на рис.4.1.б).

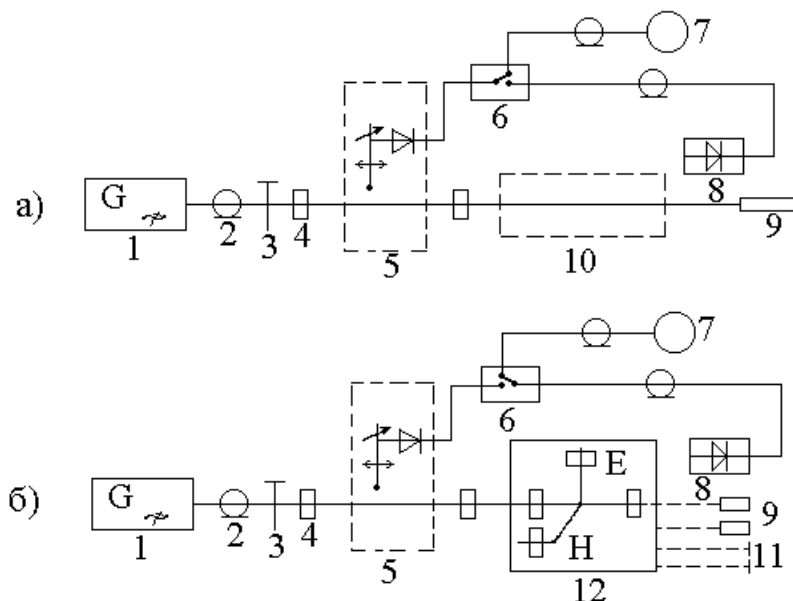


Рис.4.1. Структурные схемы лабораторной установки (1 - генератор; 2 - коаксиальный волновод (коаксиальная линия); 3 - коаксиально-волноводный переход; 4 - прямоугольный волновод; 5 - измерительная линия (ИЛ); 6 -

переключатель вида работ (ПВР); 7 - измерительный прибор; 8 - детекторная секция; 9 - согласованная нагрузка; 10 - исследуемый СВЧ поворот (излом); 11 - короткозамыкатель; 12 - исследуемый двойной волноводный тройник (мост из двух двойных волноводных тройников))

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подготовка к проведению экспериментального исследования заключается в настройке резонатора измерительной линии в резонанс с частотой колебаний волны, поступающей от генератора. Генератор включается в сеть заранее для достижения устойчивого температурного режима. При настройке измерительной линии ее нагружают короткозамыкающей пластиной.

Методики настройки измерительной линии и определения коэффициента бегущей волны КБВ отработаны на предыдущих занятиях.

5.1. Исследование согласованной нагрузки

Подключив согласованную волноводную нагрузку к выходу ИЛ, определить $\alpha_{\min}$, $\alpha_{\max}$ – минимальное и максимальное показания индикаторного прибора.

По данным измерений рассчитать значения модуля коэффициента отражения согласованной нагрузки при помощи формулы:

$$|\Gamma_{\text{CH}}| = \frac{1 - K_{\text{БВ}}}{1 + K_{\text{БВ}}}, \quad (5.1)$$

где

$$K_{\text{БВ}} = \sqrt{\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}}, \quad (5.2)$$

$\alpha_{\min}$, $\alpha_{\max}$ – минимальное и максимальное показания индикаторного прибора. Данные измерений и расчёта необходимо свести в таблицу типа табл.5.1.

Таблица 5.1

Результаты экспериментального исследования согласованной нагрузки

Название исследуемого элемента	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$	$K_{\text{БВ}}$	$ \Gamma_{\text{CH}} $	λ , см	f, ГГц
Согласованная нагрузка						

5.2. Исследование волноводных поворотов и волноводных изломов

К выходу измерительной линии подключить поочередно заданные преподавателем образцы волноводных изгибов и изломов. К выходу

волноводного изгиба или излома подключить согласованную нагрузку, предназначенную для устранения отражения электромагнитных волн.

Провести измерения необходимые для определения КБВ в тракте и вычисления подобные, описанным в п.5.1. Результаты занести в таблицу типа табл.5.2.

Следует обратить внимание на то, что в исследуемом тракте отраженная волна формируется как самим поворотом (изгибом) волновода, так и нагрузкой, согласование с которой изменяется в диапазоне частот. Следовательно, в результате эксперимента определяется суммарный коэффициент отражения Γ_{Σ} , являющийся суммой комплексных коэффициентов отражения от согласованной нагрузки и элемента

$$\dot{\Gamma}_{\Sigma} = \dot{\Gamma}_{\text{CH}} + \dot{\Gamma}_{\text{Э}}. \quad (5.3)$$

Вычислив по определённым значениям $K_{\text{БВ}}$ величины $|\Gamma_{\text{CH}}|$ и $|\Gamma_{\Sigma}|$, расчет значения $|\Gamma_{\text{Э}}|$ можно провести по приближённой формуле

$$|\Gamma_{\text{Э}}| \approx |\Gamma_{\Sigma}| - |\Gamma_{\text{CH}}|. \quad (5.4)$$

Таблица 5.2

Результаты экспериментального исследования волноводных изгибов и изломов

Название исследуемого элемента	Радиус изгиба, см	α_{min}	α_{max}	КБВ	$ \Gamma_{\Sigma} $	$ \Gamma_{\text{Э}} $	f, ГГц

По данным табл.5.2 построить частотные характеристики модулей коэффициентов отражения $|\Gamma_{\Sigma}| = \varphi(f)$ и $|\Gamma_{\text{Э}}| = \varphi(f)$.

5.3. Исследование двойного волноводного тройника и моста из двух двойных волноводных тройников

Экспериментальное исследование этого пункта программы выполняется с использованием переносного датчика мощности – детекторной секции. Измерительная линия здесь служит в роли переходного устройства от коаксиального волновода к элементам с прямоугольным сечением.

5.3.1. Определить степень развязки между плечами Е и Н двойного волноводного тройника. Для этого к выходу измерительной линии подключить плечо Е (плечо 1) двойного волноводного тройника (см.

рис.2.12), к плечу Н (плечо 4) подключить детекторную секцию. К боковым плечам 2 и 3 подключить поочередно пары следующих типов нагрузок:

- а) согласованные нагрузки;
- б) короткозамыкающие нагрузки (короткозамыкатели);
- в) согласованную нагрузку в плечо 2 и короткозамыкающую нагрузку в плечо 3.

Провести аналогичные измерения при возбуждении двойного волноводного тройника в плече Н и подключении детекторной секции к плечу Е.

Степень развязки между плечами Е и Н двойного волноводного тройника (при возбуждении плеча Е) определяется по формуле

$$P_{ЕН} = 10 \lg \frac{P_E}{P_H}, \text{ дБ}, \quad (5.5)$$

а при возбуждении плеча Н

$$P_{НЕ} = 10 \lg \frac{P_H}{P_E}, \text{ дБ}. \quad (5.6)$$

Данные измерений и расчётов занести в таблицу типа табл.5.3.

Таблица 5.3

Результаты экспериментального исследования степени развязки между плечами двойного волноводного тройника

Возбуждаемое плечо	P_E	P_H	$P_{ЕН},$ дБ	$P_{НЕ},$ дБ	Номера плеч с согласованными нагрузками	Номера плеч с КЗ–нагрузками
Е				-	2 и 3	-
				-	-	2 и 3
				-	2 (3)	3 (2)
Н			-		2 и 3	-
			-		-	2 и 3
			-		2 (3)	3 (2)

5.3.2. Определить распределение мощностей в боковых плечах двойного волноводного тройника при возбуждении

а) плеча Е и подключении согласованных нагрузок в плечо Н и поочередно к одному из боковых плеч;

б) плеча Н и подключении согласованных нагрузок в плечо Е и поочередно к одному из боковых плеч.

Результаты измерений занести в таблицу типа табл.5.4.

Таблица 5.4

Результаты экспериментального исследования распределения мощности в плечах двойного волноводного тройника

Возбуждаемое плечо	P_2	P_3	Согласованные нагрузки в плечах
Е		-	3, 4
	-		2, 4
Н		-	3, 1
	-		2, 1

5.3.3. Рассчитать распределение поля в плечах двойного волноводного тройника для одного из приведённых в табл.5.4 случаев (по заданию преподавателя). Расчёт произвести с помощью матрицы рассеяния двойного волноводного тройника (см. в п.2.5).

5.3.4. Определить развязку между плечами Е и Н моста из двух волноводных тройников (рис.5.1).

Для этого необходимо подключить исследованный ранее двойной волноводный тройник к мостовому устройству, содержащему ещё один двойной волноводный тройник. Возбуждая поочерёдно плечи Е и Н в первом двойном волноводном тройнике, подключая детекторную секцию в плечи Е и Н второго двойного волноводного тройника и согласованные нагрузки в свободные плечи, определить распределение мощностей в плечах Е и Н, а также степень развязки между плечами Е и Н. Результаты измерений и расчётов занести в таблицу типа табл.5.5.

Таблица 5.5

Результаты экспериментального исследования степени развязки между плечами Е и Н моста из двух двойных волноводных тройников

Возбуждаемое плечо	P_E	P_H	P_{EH} , дБ	P_{HE} , дБ
Е				-
Н			-	

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

- 6.1. Структурные схемы измерений (рис.4.1 и рис.4.2).
- 6.2. Данные экспериментальных исследований (табл. 5.1...5.5) и расчёта.
- 6.3. Выводы.

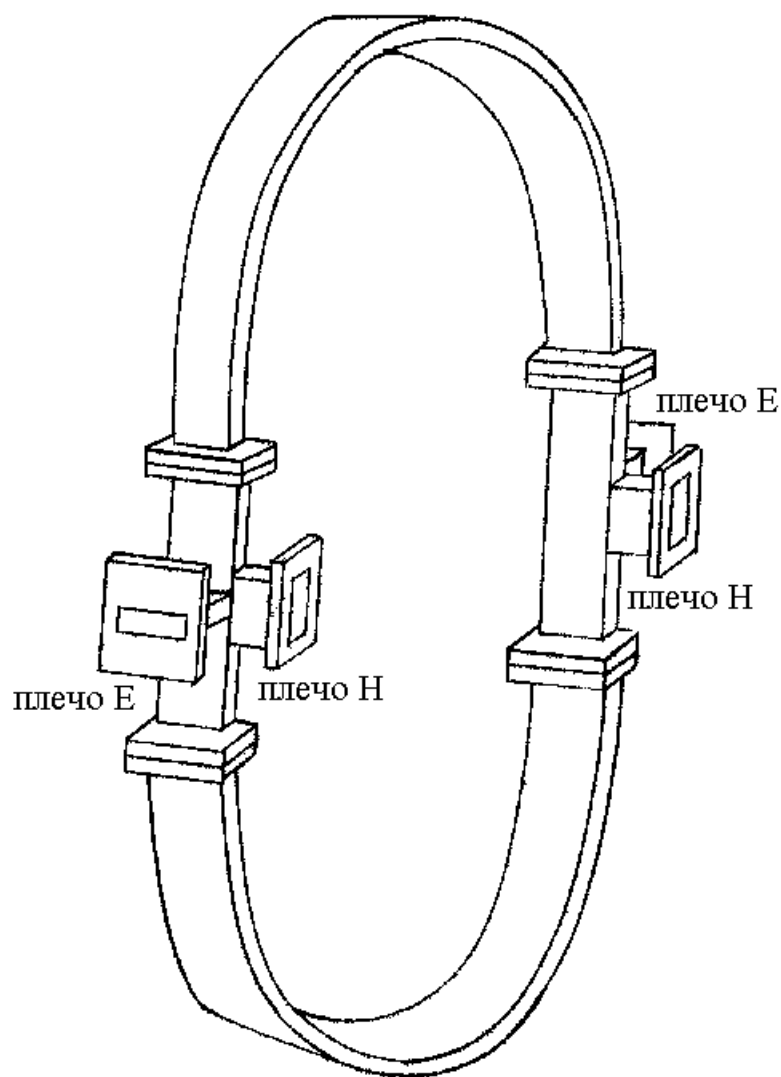


Рис.5.1. Мост из двух двойных волноводных тройников

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Нарисуйте структуру поля основной волны в прямоугольном волноводе. Укажите плоскости, в которых лежат, соответственно, силовые линии электрического и магнитного поля ([1] §10.1.1,10.1.2 [2] §14.1, [3] §3.5, [4] §19.6).

7.2. Нарисуйте волноводные повороты в плоскостях Е и Н. Свяжите названия поворотов со структурой поля волны H_{10} ([3] §6.9, [4] §24.1).

7.3. Какими параметрами характеризуется волноводный поворот? Как с помощью измерительной линии определить эти параметры? ([3] §6.9).

7.4. Как зависит качество волноводного поворота от его радиуса? Как выбирают среднюю длину поворота на практике? ([3] §6.9).

7.5. Для чего предназначена поглощающая (согласованная) нагрузка? Объясните принцип её действия и нарисуйте её конструкции ([3] §8.3, [4] §24.2[5] л.б.№4).

7.6. Нарисуйте Т-образные волноводные Н и Е-тройники. Свяжите названия тройников со структурой поля волны H_{10} ([1] §13.4.2, [2] §17.9 [3] §6.6, [4] §24.8, [5] л.б.№4).

7.7. Какими свойствами обладает волноводный Н-тройник? Объясните свойства Н-тройника, рассматривая случай синфазного и противофазного питания со стороны боковых плеч (с помощью рисунков) ([1] §13.4.2, [2] §17.9 [3] §6.6, [5] л.б.№4).

7.8. Нарисуйте силовые линии поля в Н-тройнике при возбуждении Н-плеча тройника. ([1] §13.4.2, [2] §17.9 [3] §6.6, [4] §24.8, [5] л.б.№4).

7.9. Какими свойствами обладает волноводный Е-тройник? Объясните свойства Е-тройника, рассматривая случаи синфазного и противофазного питания со стороны боковых плеч (с помощью рисунков). ([1] §13.4.2, [2] §17.9 [3] §6.6, [5] л.б.№4).

7.10. Нарисуйте силовые линии поля в Е-тройнике при возбуждении Е-плеча ([1] §13.4.2, [2] §17.9 [3] §6.6, [5] л.б.№4).

7.11. Нарисуйте двойной волноводный тройник (двойной Т-образный мост). Укажите плечи Е и Н и свяжите их названия со структурой поля волны H_{10} ([1] §13.4.2, [2] §17.9 [3] §6.6, [4] §24.8, [5] л.б.№4).

7.12. Какими свойствами обладает двойной волноводный тройник? Объясните свойства двойного волноводного тройника, используя свойства Н и Е-тройников и рассматривая случаи их синфазного и противофазного возбуждения со стороны боковых плеч ([1] §21.2, [2] §6.8).

7.13. Какими параметрами характеризуется двойной волноводный тройник? Как определяют эти параметры? ([3] §6.6, §6.8).

7.14. Для чего предназначена детекторная секция (детекторная головка)? Нарисуйте волноводную детекторную секцию и объясните принцип её действия ([3] §8.6).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЕДАНСОВ ВОЛНОВОДНЫХ НАГРУЗОК С ПОМОЩЬЮ ИМПЕДОМЕТРА»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Приобрести умений работы с устройством волноводного импедометра и навыки измерения импеданса (полного сопротивления) волноводных нагрузок. Научиться определять величину импеданса волноводных диафрагм.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В технике сверхвысоких частот (СВЧ) часто геометрические размеры волновода выбираются такими, чтобы по нему распространялась волна одного типа. Для прямоугольного волновода это волна Н₁₀. Теоретически в одноволновом режиме прямоугольный волновод вполне может быть заменён двухпроводной линией с таким же коэффициентом фазы распространения волны и с той же мощностью передачи. Параметры эквивалентной двухпроводной линии находятся из условия передачи одинаковой мощности по этим двум системам.

Для прямоугольного волновода с воздушным заполнением при распространении в нём волны Н₁₀ волновое сопротивление эквивалентной линии равно

$$Z_{\text{в}} = \frac{2b}{a} * \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (2.1)$$

где a, b – соответственно размеры широкой и узкой стенок волновода;
 λ - длина волны.

Поле в нагруженном волноводе на расстояниях больших длины волны в волноводе от нагрузки определяется, в основном, падающей и отражённой волнами низшего типа.

Отношение напряжённости электрического поля отражённой волны в каком-либо сечении к напряжённости электрического поля падающей волны в этом же сечении называют комплексным коэффициентом отражения

$$\dot{\Gamma} = \dot{E}_{\text{отр}} / \dot{E}_{\text{пад}}. \quad (2.2)$$

Эквивалентной схемой нагруженного волновода является двухпроводная линия, нагруженная на сопротивление, обеспечивающее такой же коэффициент отражения, что и в волноводе. Эквивалентные схемы позволяют применять для описания волноводов теорию длинных линий. Так для входного импеданса нагруженного волновода можно записать [1]

$$\dot{Z}_{\text{вх}}(z) = Z_{\text{в}} \frac{1 + \dot{\Gamma}(z)}{1 - \dot{\Gamma}(z)}. \quad (2.3)$$

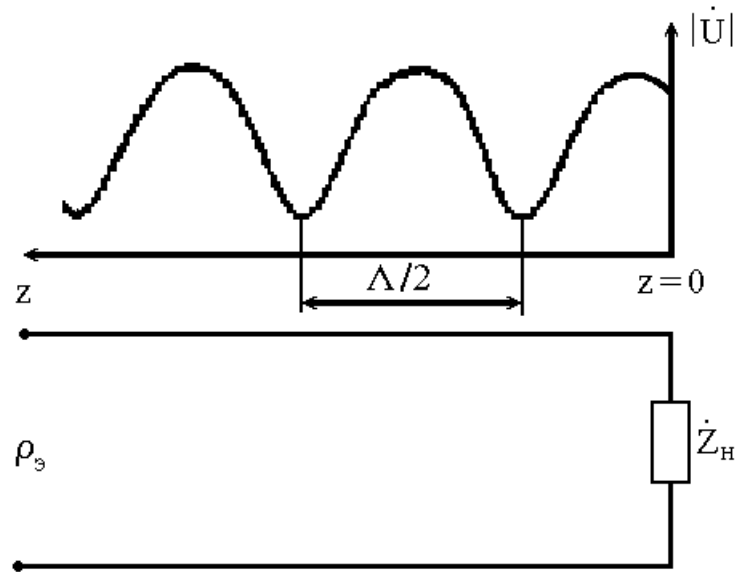


Рис. 2.1. Эквивалентная схема

На рис.2.1 представлена эквивалентная схема нагруженного волновода и распределение амплитуды напряжения вдоль линии. Начало координат помещено в сечении, где включена нагрузка

$$\dot{\Gamma}(z) = \dot{\Gamma}(0)e^{-2i\beta z}, \quad (2.4)$$

где $\beta = 2\pi/\lambda$ – фазовая постоянная распространения волны в волноводе;

$\dot{\Gamma}(0)$ – комплексный коэффициент отражения от нагрузки, определяемый по формуле

$$\dot{\Gamma}(0) = |\dot{\Gamma}_n| e^{i\varphi_n}, \quad (2.5)$$

где $|\dot{\Gamma}_n|$, φ_n – модуль и фаза коэффициента отражения от нагрузки.

Комплексный коэффициент отражения является периодической функцией координаты z с периодом $\lambda/2$, следовательно, и входное сопротивление $Z_{\text{вх}}(z)$ – также периодическая функция.

Для нахождения импеданса нагрузки достаточно определить по результатам измерений значение коэффициента отражения (модуль и фазу) в сечении на расстоянии от нагрузки, равном целому числу длин полуволн $z = n\lambda/2$, где n – целое число.

$$\dot{Z}_n = Z_{\text{в}} \frac{1 + \dot{\Gamma}(n \cdot \Lambda/2)}{1 - \dot{\Gamma}(n \cdot \Lambda/2)}, \quad (2.6)$$

$$\dot{\Gamma}(0) = \dot{\Gamma}(n \cdot \Lambda/2). \quad (2.7)$$

Определение коэффициента отражения удобно производить с помощью волноводного импедометра (см. ниже).

Волноводный импедометр предназначен для определения величины импеданса (комплексного сопротивления) волноводных нагрузок. Структурная схема прибора представлена на рис. 2.2.

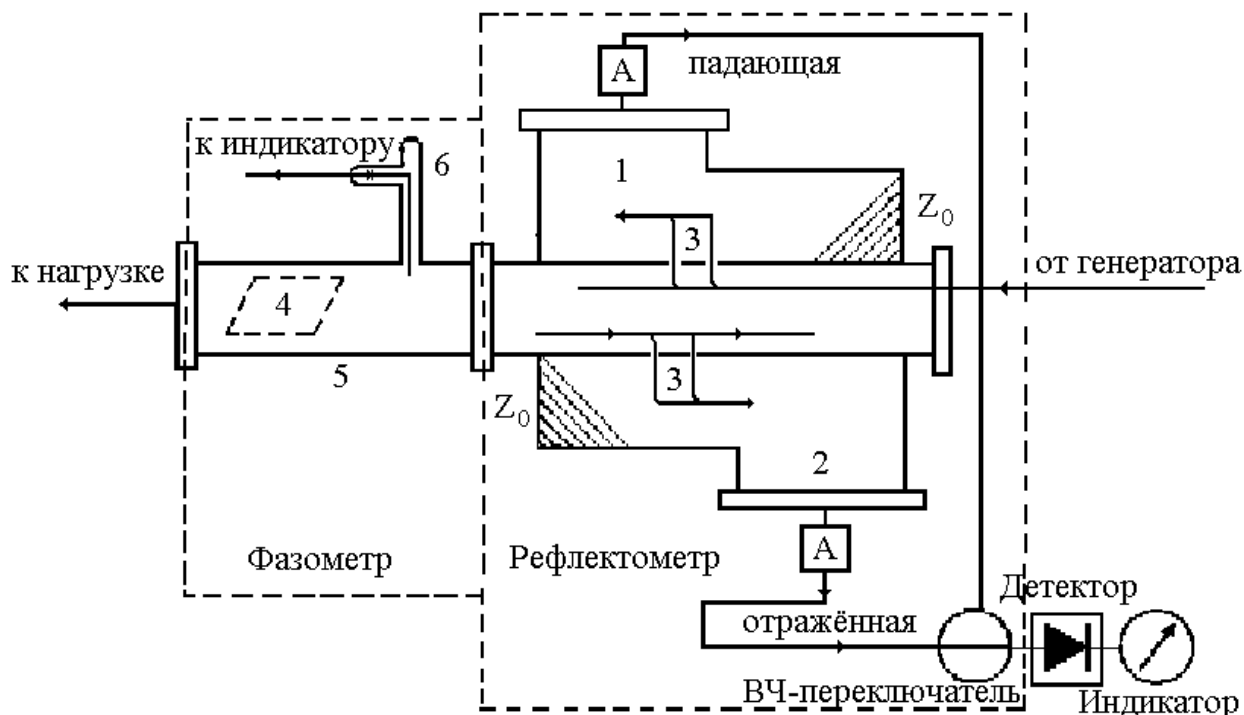


Рис. 2.2. Структурная схема волноводного импедометра

Импедометр состоит из двух частей: рефлектометра и фазометра.

Рефлектометр представляет собой два направленных ответвителя, включенных в противоположных направлениях, и служит для измерения модуля, коэффициента отражения. Конструктивно ответвители представляют собой отрезки волноводов 1 и 2 (см. рис.2.2) таких же геометрических размеров, что и основной, имеющих общую широкую стенку с основным волноводом и связанных с ним системой отверстий 3. На концах волноводов 1 и 2 стоят согласованные нагрузки Z_0 . К выходу первого волновода ответвляется только падающая волна, а к выходу второго - только отраженная.

Для выравнивания ослабления в волноводах 1 и 2, на их выходах установлены переменные ослабители – аттенюаторы. С помощью высокочастотного переключателя волноводы 1 и 2 подключаются к детектору с индикаторным прибором. Индикатор, при квадратичной характеристике детектора регистрирует уровни α_1 и α_2 , пропорциональные квадрату напряжённости электрических полей падающей и отражённой волн. Поэтому модуль коэффициента отражения определяется по формуле

$$|\dot{\Gamma}| = \sqrt{\alpha_2/\alpha_1}. \quad (2.8)$$

Из формулы (2.4) видно, что модуль коэффициента отражения в любом сечении одинаков, и равен модулю коэффициента отражения от нагрузки

$$|\dot{\Gamma}_n| = |\dot{\Gamma}|. \quad (2.8)$$

Фазометр состоит из фазовращателя 5 и неподвижной детекторной головки 6, и служит для измерения фазы коэффициента отражения. Детекторная головка состоит из металлического штыря – зонда, введенного внутрь волновода, и детектора и служит для регистрации напряженности электрического поля. Зонд связан с коаксиальным резонатором, который необходимо настраивать в резонанс с частотой электромагнитных волн в волноводе, для получения максимальной чувствительности измерительного прибора. Высокочастотное поле резонатора детектируется кристаллическим диодом, включенным в цепь измерительного прибора.

Фазовращатель 5 представляет собой отрезок волновода с таким же поперечным сечением, как и основной волновод, внутри которого, параллельно узкой стенке может передвигаться тонкая диэлектрическая пластина. Фазовращатель изменяет фазу проходящей волны. В общем случае, в волноводе существуют падающая и отраженная волны, и в любом сечении z_1 поле определяется суперпозицией этих волн. Так, если отраженная волна в сечении z_1 приходит в фазе с падающей, то общее поле будет максимальным, если в противофазе – то минимальным. Если каким-либо образом менять фазу отраженной волны, то в сечении z_1 поле будет меняться от минимального значения до максимального. В фазовращателе фазу проходящей волны изменяют перемещением диэлектрической пластины, Рассмотрим это подробнее. Фазовая скорость волны в волноводе, заполненном диэлектриком с параметрами ϵ_a, μ_a , равна

$$v_\phi = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}}, \quad (2.9)$$

где ϵ_a, μ_a – параметры среды;
 f – частота электромагнитного поля;
 $f_{кр}$ – критическая частота волны в волноводе.

Длина волны в волноводе определяется выражением

$$\Lambda = \frac{v_\phi}{f} = \frac{1}{f \cdot \sqrt{\epsilon_a \mu_a} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \quad (2.9.a)$$

где $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны (в прямоугольном волноводе $\lambda_{кр}=2a$).

Формула (2.9) показывает, что с увеличением диэлектрической проницаемости происходит уменьшение фазовой скорости волны, т.е. её замедление. Если волновод частично заполнен диэлектриком, то в формулах (2.9) и (2.9.a) необходимо абсолютную диэлектрическую проницаемость ϵ_a

заменить на эффективную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{\text{эф}}$. Эффективная проницаемость $\epsilon_{\text{эф}}$ зависит от размеров и абсолютной диэлектрической проницаемости пластины. Так как распределение электрического поля вдоль широкой стенки волновода неравномерное (см. рис.2.3), то $\epsilon_{\text{эф}}$ зависит также от расположения пластины в волноводе.

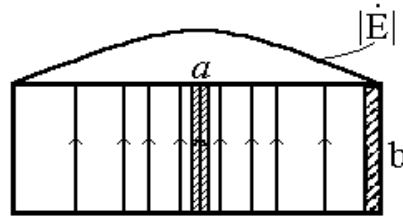


Рис. 2.3. Расположение пластин фазометра в прямоугольном волноводе

Так, если пластина расположена вблизи узкой стенки волновода, где напряженность электрического поля мала, значение $\epsilon_{\text{эф}}$ также мало, поэтому влияние пластины на скорость распространения волны и, следовательно, фазу, незначительно. Если же расположить пластину в центре волновода, где напряженность поля максимальна, значение $\epsilon_{\text{эф}}$ будет большим, поэтому влияние пластины будет наибольшим и замедление максимальным. Таким образом, перемещая пластину от узкой стенки к середине волновода, можно управлять фазой проходящих волн. Пластина берётся достаточно тонкой, чтобы поглощение в ней электромагнитной энергии было малым, и делается в виде призмы для уменьшения отражений от неё.

Фазу коэффициента отражения от произвольной нагрузки можно найти сравнением её с известной фазой коэффициента отражения от короткозамыкающей пластины. Напомним, что фаза коэффициента отражения от короткозамыкающей пластины равна π . Допустим, что при подключении к волноводу короткозамыкающей пластины, с помощью фазовращателя получен узел напряжённости электрического поля в сечении, где расположен зонд детекторной головки. Очевидно, что для получения узла при произвольной нагрузке с фазой коэффициента отражения φ_n необходимо внести такой дополнительный сдвиг $\Delta\varphi$ с помощью фазовращателя, чтобы $\varphi_n + \Delta\varphi = \pi$. Из этого условия находится φ_n

$$\varphi_n = \pi - \Delta\varphi. \quad (2.10)$$

Шкала фазовращателя представляет собой круг, на котором нанесены деления от 0 до 250. Так как расчет импеданса нагрузок удобнее производить не с помощью формулы (2.3), а с использованием диаграммы полных сопротивлений, то градуировку шкалы фазовращателя необходимо произвести в долях Λ . Для этого воспользуемся режимом стоячих волн, получающимся в закороченном волноводе. Абсолютная величина

напряжённости электрического поля стоячей волны определяется выражением

$$|\dot{E}| = E_m \left| \sin\left(2\pi \frac{\Delta z}{\Lambda}\right) \right|. \quad (2.11)$$

График этой зависимости приведён на рис. 2.4.

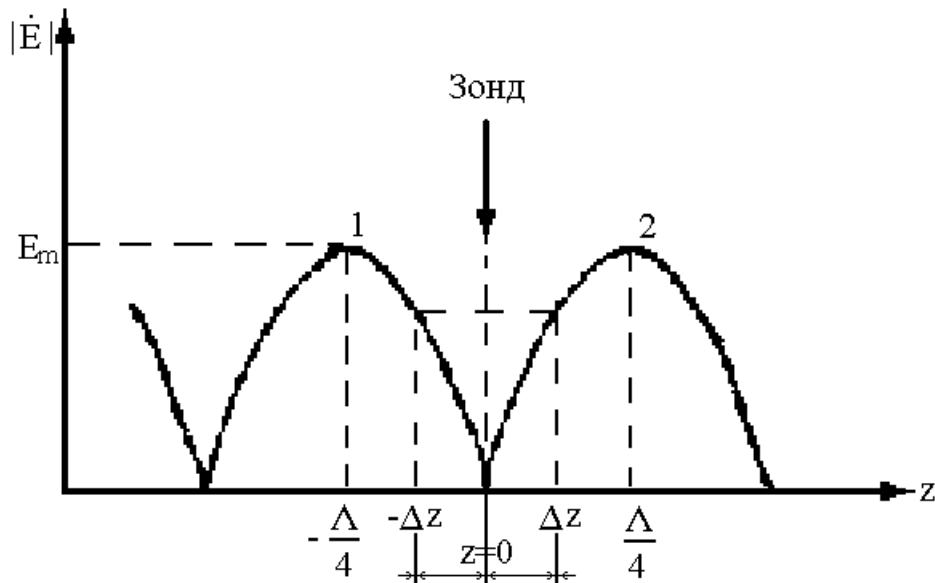


Рис.2.4. Амплитудное распределение в волноводе при короткозамыкающей нагрузке

Отсчёт значений z будем вести от сечения, где расположен зонд детекторной головки ($z = 0$), тогда относительное смещение $\Delta z/\Lambda$ может быть положительным или отрицательным. Если детектор имеет квадратичную характеристику, то показания детектора α пропорциональны квадрату напряжённости электрического поля

$$\alpha \sim |E|^2. \quad (2.12)$$

Вращая ручку фазовращателя, получаем для ряда показаний шкалы $m_1, m_2, \dots, m_N$ ряд показаний индикатора $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$. С помощью формул (2.11) и (2.12) можно вычислить, соответствующие полученным показаниям, смещения $\Delta z_1/\Lambda, \Delta z_2/\Lambda, \dots, \Delta z_N/\Lambda$. Построив график зависимости показаний шкалы фазовращателя m от смещений $\Delta z/\Lambda$, получим градуировочную кривую фазометра.

Используя эту кривую, можно определить дополнительный фазовый сдвиг $\Delta\varphi$, вносимый фазовращателем для получения минимума напряжённости электрического поля в сечении, где расположен зонд детекторной головки

$$\Delta\varphi = -2\beta\Delta z = -4\pi\Delta z/\Lambda. \quad (2.13)$$

И далее по формуле (2.10) можно определить фазу коэффициента отражения от нагрузки.

Ниже приведена методика определения импеданса нагрузок с помощью волноводного импедометра.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Включить генератор и дать ему прогреться в течение 5...10 минут.

3.2. Произвести калибровку рефлектометра. Для этого необходимо:

а) прижать винтами короткозамыкающую пластину к открытому концу волновода.

б) Шкалу фазовращателя установить на нулевое деление. В этом положении будет минимальное влияния на фазовую скорость. Вращением ручки аттенуаторов рефлектометра добиться одинаковых показаний "ПАДАЮЩАЯ" и "ОТРАЖЁННАЯ" по прибору, переключая ВЧ-переключателя в положениях "ПАДАЮЩАЯ" и "ОТРАЖЁННАЯ". В этом случае мы получаем коэффициент отражения равен единице, а при других нагрузках показания "ПАДАЮЩАЯ" и "ОТРАЖЁННАЯ" будут разные.

3.3. Произвести градуировку фазометра. Для этого надо подключить измерительный прибор к выходу детекторной головки фазометра. Волновод при этом должен быть закорочен.

Шкалу фазовращателя установить на нулевое деление. Вращая ручку шкалы фазометра, найти максимальное показание α_m измерительного прибора (точка 1 на рис 2.4) и записать показание шкалы фазовращателя m_1 . Рассчитать значения: $0,9\alpha_m$, $0,67\alpha_m$, $0,344\alpha_m$, $0,095\alpha_m$. Вращая ручку шкалы фазометра, поочерёдно устанавливая на шкале измерительного прибора значения: $0,9\alpha_m$, $0,67\alpha_m$, $0,344\alpha_m$, $0,095\alpha_m$ и 0, записать показания шкалы фазометра m_2 , m_3 , m_4 , m_5 , m_6 . Последняя точка совпадает с узлом поля. Продолжая вращать ручку фазометра в том же направлении, установить на шкале измерительного прибора значения: $0,095\alpha_m$, $0,344\alpha_m$, $0,67\alpha_m$, $0,9\alpha_m$, α_m и записать соответствующие им значения: m_7 , m_8 , m_9 , m_{10} , m_{11} . Полученные значения записать в таблицу типа таблицы 3.1.

Таблица 3.1.

Результаты градуировки фазометра

α/α_m	1,00	0,90	0,67	0,344	0,095	0	0,095	0,344	0,67	0,90	1,00
α											
M											
$\Delta z/\Lambda$	-0,25	-0,20	-0,15	-0,10	-0,05	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25

Выбранные уровни показаний измерительного прибора соответствуют значениям $\Delta z/\Lambda$, приведённым в таблице 3.1. По данным этой таблицы строится градуировочный график (см. пример на рис.3.1), отображающий зависимость между показаниями шкалы фазовращателя m и относительными смещениями $\Delta z/\Lambda$.

Этот график нужен для определения $\Delta z/\Lambda$ по известной m , при различных диафрагм, при расчете Z_n

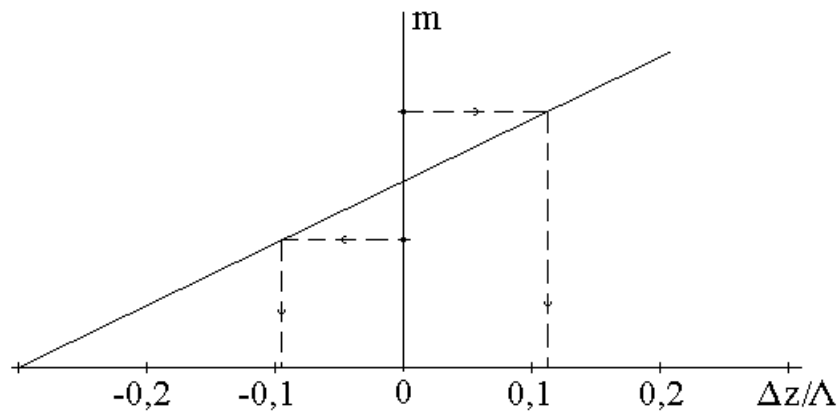


Рис. 3.1. Пример градуировочной кривой фазометра

3.4. Определить модуль коэффициента отражения $|\dot{\Gamma}|$ от нагрузки и относительное смещение минимумов напряженности электрического поля $\Delta z/\Lambda$ для нагрузок, которые выдаются преподавателем. Нагрузки представляют собой диафрагмы, устанавливаемые на конце волновода вместо короткозамыкающей пластины. Совместить с риской шкалы фазометра деление m_6 , соответствующее нулевому показанию измерительного прибора при закороченном волноводе. Вращая ручку шкалы фазометра вправо и влево, найти ближайший минимум напряжённости электрического поля. Отметить показание шкалы фазометра m и, используя градуировочный график, найти относительное смещение минимума $\Delta z/\Lambda$. (см. пример на рис. 3.1)

Переводя переключатель в положения "ПАДАЮЩАЯ" и "ОТРАЖЕННАЯ" записать уровни падающей α_1 и отраженной α_2 волн. Вычислить по формуле (2.8) модуль коэффициента отражения. Прodelать тоже самое для других нагрузок.

Коэффициент бегущей волны КБВ связан с модулем коэффициента отражения $|\dot{\Gamma}|$ выражением

$$\text{КБВ} = \frac{1 - |\dot{\Gamma}|}{1 + |\dot{\Gamma}|}.$$

3.5. По значениям модуля коэффициента отражения $|\dot{\Gamma}|$ (или коэффициента бегущей волны КБВ) и относительного смещения $\Delta z/\Lambda$ по диаграмме полных сопротивлений (рис. 3.2), найти нормированный импеданс нагрузок.

Если $\Delta z/\Lambda$ положительно, то «движок» диаграммы (воображаемую линию, соединяющую центр диаграммы с величиной $\Delta z/\Lambda$ на её окружности) надо вращать к нагрузке, если отрицательно – к генератору.

Результаты измерений и расчёта занести в таблицу типа табл. 3.2

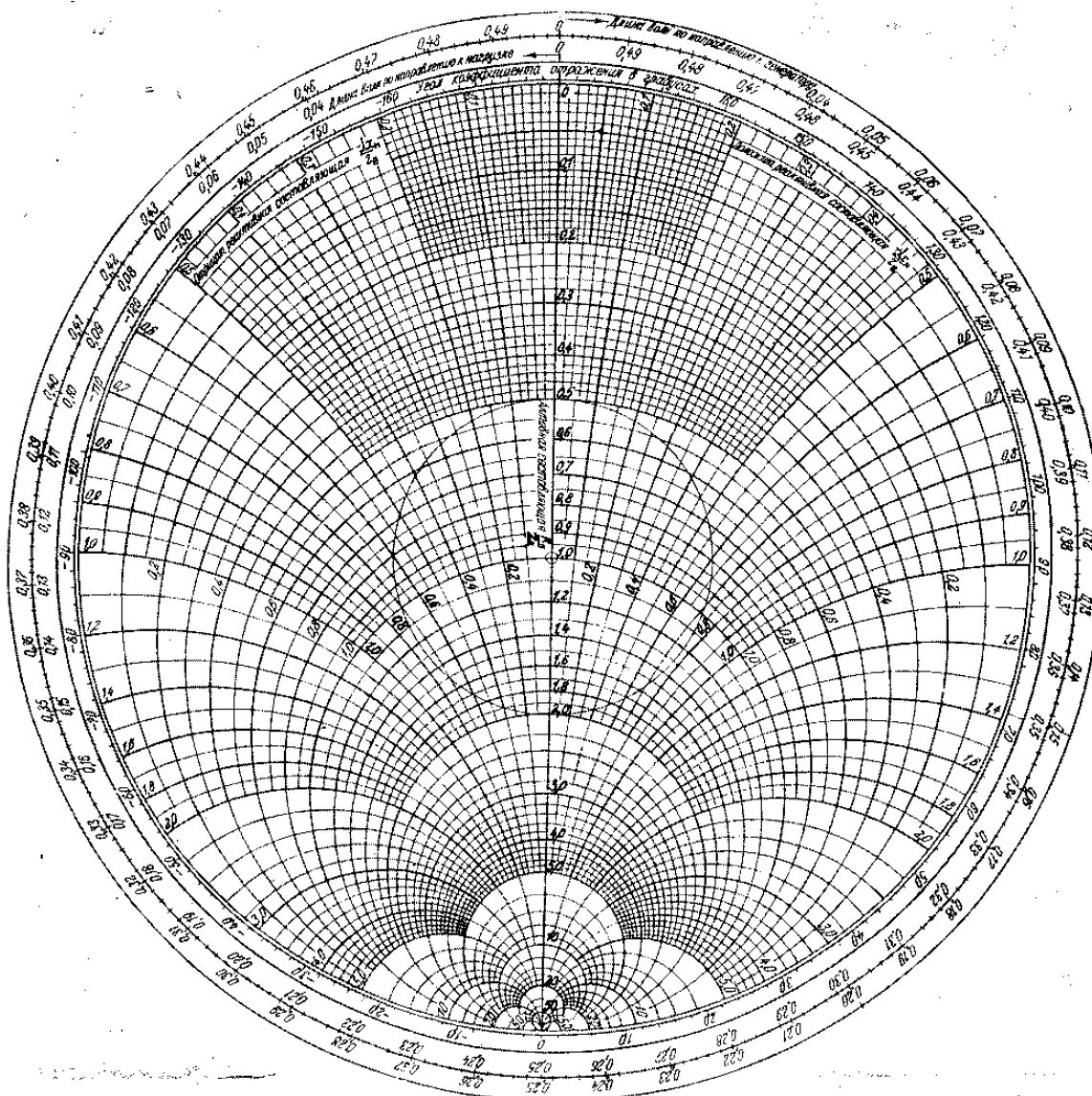


Рис. 3.2. Диаграмма полных сопротивлений (диаграмма Вольперта)

Таблица 3.2

Результаты экспериментального исследования

№	Номер и размеры диафрагмы	m	$\Delta z/\square$	$\alpha_{\text{пад}}$	$\alpha_{\text{отр}}$	$ \Gamma $	$K_{\text{БВ}}$	$Z_{\text{н}}$

Методика определения полного сопротивления нагрузки с помощью диаграммы полных сопротивлений приведена также в методическом руководстве к выполнению лабораторных работ №1, №2.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчёт должен содержать:

4.1.1. Структурную схему импедометра.

- 4.1.2. Градуировочные таблицу и график.
4.1.3. Таблицу с результатами экспериментального исследования.
4.1.4. Выводы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Назовите условия одноволнового режима ([1] §10.1.4, §10.2.3, [2] §14.1, §15.1, [3] §3.7, §5.6, [4] §19.2, §19.12).
- 5.2. Нарисуйте распределение амплитуды поперечного электрического поля вдоль волновода для различных нагрузок (активной, реактивной, комплексной) ([1] §12.1.3., [2] §16.2, [3] §7.1).
- 5.3. Что называется коэффициентом отражения? Что характеризуют модуль и фаза коэффициента отражения? ([1] §12.1.2, [2] §16.2, [3] §7.1).
- 5.4. Нарисуйте структуру поля волны H_{10} в прямоугольном волноводе ([1] §10.1.1 стр.275 [2] §14.1, [3] §3.5, [4] §19.6).
- 5.5. Запишите выражение для амплитуды напряжённости электрического поля волны H_{10} в поперечном сечении волновода вдоль его широкой стенки и постройте график $E=\varphi(a)$ ([1] §10.1.2 [2] §14.1, [3] §3.5).
- 5.6. Какие физические процессы происходят около неоднородности в волноводе? ([1] §12.1.2 [2] §17.1, [3] §6.9).
- 5.7. Что называется направленным ответвителем? ([1] §14.1.1 [2] §17.5, [3] §8.8, [4] §24.10).
- 5.8. Для чего предназначен импедометр? Из каких устройств он состоит? ([3] §8.9).
- 5.9. Для чего нужна и как производится градуировка рефлектометра?
- 5.10. Для чего нужен фазометр? Из каких частей он состоит? ([3] §8.12, [4] §24.4).
- 5.11. Что называется фазовращателем? Изменением какого параметра электромагнитной волны можно регулировать сдвиг по фазе между волнами на входе и выходе фазовращателя? ([3] §5.5, §8.12, [4] §24.4).
- 5.12. Почему при перемещении диэлектрической пластины в фазовращателе меняется фазовая скорость, а следовательно, и сдвиг фаз? ([3] §5.5).
- 5.13. Для чего нужна и как производится градуировка фазометра?
- 5.14. Что называется диафрагмой? Нарисуйте ёмкостную и индуктивную диафрагму в прямоугольном волноводе и объясните их принцип действия ([1] §12.5 стр.405, [2] §17.2, [3] §6.5).
- 5.15. Покажите на диаграмме полных сопротивлений где «откладываются» значения:
- а) модуля коэффициента отражения;
 - б) активной составляющей нормированного полного сопротивления;
 - в) реактивной составляющей нормированного полного сопротивления
- ([1] §14.1.4, [2] §16.4, [3] §7.3).

5.16. Как, зная модуль и фазу коэффициента отражения, определить по круговой диаграмме полных сопротивлений нормированное сопротивление нагрузки? ([1] §14.1.4, [2] §16.4, [3] §7.4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пименов Ю.В. и др. Техническая электродинамика. – М.: «Радио и Связь» 2000.
2. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1971.
3. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. – М.: Высшая школа, 1970.
4. Фальковский О.И. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1978.
5. Семенов Н.А. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1973.

Сборник методических руководств к лабораторным работам № 1, №2, №3, №4 и №5 по дисциплинам «Электромагнетизм» и «Электромагнитные поля и волны» рассмотрен на заседании кафедры СТРВ (протокол № _____ от «___» ____ 2017) и рекомендован к печати.

Составитель: ст. преп. Кан В.С.

Отв. редактор: Шахобиддинов А.Ш.

Редакционно-корректурная комиссия:

Редактор:

Корректор: