

Министерство образования и науки РФ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

Утверждаю
Зав. каф. СВЧ и КР
_____ С.Н. Шарангович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ
ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА И СОГЛАСОВАНИЕ
СОПРОТИВЛЕНИЙ НАГРУЗОК**

РУКОВОДСТВО

к лабораторной работе по дисциплинам “ Устройства СВЧ и антенны”,
«Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства»
для студентов специальностей 210302, 210303, 210304,
210403, 210405, 210312, 210313.

Разработчик

доц. каф. СВЧ и КР

_____ Ж.М. Соколова

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение.....	3
2 Основные вопросы теории.....	3
2.1 Параметры элементов СВЧ тракта	3
2.2 Волновод, работающий на произвольную нагрузку	3
2.3 Способы определения схем замещения неоднородностей.....	5
2.4 Некоторые элементы волноводного тракта и их эквивалентные схемы (схе- мы замещения).....	6
2.5 Круговая диаграмма сопротивлений (проводимостей).....	9
2.6. Применение круговой диаграммы при измерении сопротивления нагруз- ки.....	10
2.7. Нахождение полной проводимости по известной величине полного сопротивления.....	11
2.8. Градуировка детектора в измерительной линии.....	12
3 Экспериментальная часть.....	13
3.1 Лабораторная установка и содержание работы.....	13
3.2 Расчетное задание.....	14
3.3 Порядок выполнения работы.....	15
4 Контрольные вопросы	16
5 Содержание отчета.....	17
6 Список литературы.....	17

1. ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является ознакомление:

- с применением метода измерительной линии для определения полного сопротивления (проводимости) элементов и устройств СВЧ тракта;
- свойствами круговой диаграммы полных сопротивлений;
- экспериментальное определение сопротивлений и проводимостей некоторых реактивных элементов в трёхсантиметровом диапазоне волн;
- проведение согласования сопротивления нагрузки с волноводным трактом штыревым трансформатором.

2. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

2.1. Параметры элементов СВЧ тракта

Основными параметрами элементов СВЧ тракта являются:

- 1) Волновое сопротивление – W (характеристическое сопротивление – Z_c), которое определяется типом волны, параметрами среды – ϵ_r, μ_r и геометрией поперечного сечения линии передачи;
- 2) Полное входное сопротивление элемента (импеданс) – $\dot{Z}_{вх}$;
- 3) Коэффициент отражения по входу – Γ (характеризует согласование элемента);
- 4) Коэффициент передачи – $K_{пер}$;
- 5) Полоса рабочих частот – Δf_p .

Расчёт указанных параметров в настоящее время ведётся двумя методами:

- теории электромагнитного поля;
- теории радиотехнических цепей.

Оба метода дают определённые погрешности расчёта. Поэтому особую роль при изготовлении элементов и устройств СВЧ тракта уделяют экспериментальному исследованию. В зависимости от измеряемого параметра и имеющейся аппаратуры методы исследования могут быть различными. В данной работе предлагается методом измерительной линии, который более часто используется на практике, определять следующие параметры:

- полное сопротивление;
- степень согласования элемента по входу в диапазоне частот.

2.2. Волновод, работающий на произвольную нагрузку

Если волновод имеет конечную длину и нагружен на произвольную (не согласованную) нагрузку (антенна, детекторная головка и т.п.), то энергия падающей волны поступает в нагрузку не полностью, а частично отражается. Поле в волноводе перед нагрузкой представляет суперпозицию двух волн: падающей и отражённой и описывается следующими соотношениями:

$$\dot{E} = \dot{E}_{над} + \dot{E}_{отр}, \quad \dot{H} = \dot{H}_{над} + \dot{H}_{отр}, \quad (2.1)$$

где $E_{над}$, $E_{отр}$, $H_{над}$, $H_{отр}$ – комплексные амплитуды электрических и магнитных полей падающих и отражённых волн.

Введем коэффициент отражения по напряжению как отношение комплексной амплитуды электрического поля отраженной волны к комплексной амплитуде электрического поля подающей волны **на нагрузке**, т.е.

$$\dot{\Gamma} = \dot{E}_{omp} / \dot{E}_{nad} \quad , \quad (2.2)$$

тогда (2.1) можно записать в другом виде $\dot{E} = \dot{E}_{nad}(1 + \dot{\Gamma})$, $\dot{H} \doteq \dot{E}_{nad} / Z_c(1 - \dot{\Gamma})$.

Отношение комплексных амплитуд электрического и магнитного полей на нагрузке позволяет определить импедансное (комплексное) сопротивление нагрузки – параметр, характеризующий режим работы всего волноводного тракта, в виде

$$\dot{Z}_H = \frac{\dot{E}}{\dot{H}} = Z_c \frac{1 + \dot{\Gamma}}{1 - \dot{\Gamma}} \quad , \quad (2.3)$$

где $Z_c = E_{nad}/H_{nad}$ - характеристическое сопротивление волновода, зависящее от размеров волновода и рабочего типа волны.

Для прямоугольного волновода, имеющего сечение $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$, $\mu_r = \epsilon_r = 1$, характеристическое сопротивление на волне типа H_{10} равно

$$Z_c = 120\pi \frac{\lambda_g}{\lambda_0} = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad . \quad (2.4)$$

Обычно, вместо сопротивления (2.3) используется нормированное сопротивление нагрузки, равное

$$\dot{Z}_{норм} = \frac{\dot{Z}_H}{Z_c} = \frac{1 + \dot{\Gamma}}{1 - \dot{\Gamma}} = \dot{Z}'_H \quad (2.5)$$

Индекс «норм» часто опускается, но при этом следует понимать, если значение сопротивления нагрузки Z получено безразмерным, то это по отношению к характеристическому сопротивлению линии, на которой проведён эксперимент.

Сопротивления в формулах (2.3) и (2.5) должны измеряться в плоскости сечения линии, где подключена нагрузка. Это экспериментально не всегда выполнимо. Для расширения возможностей экспериментирования вводится понятие входного сопротивления $-Z_{вх}$. Входное сопротивление это сопротивление на входе отрезка волновода длиной ξ , с включенной на конце любой нагрузкой. Входное сопротивление, очевидно, является функцией продольной координаты ξ . Получим выражение для входного сопротивления, расположив начало отсчёта продольной координаты ξ на нагрузке и перемещаясь к генератору. Выражение для полей в любой точке линии будет иметь вид:

$$\dot{E}_{nad}(\xi) = E_{nad}(0)e^{i\beta\xi}, \quad \dot{E}_{omp}(\xi) = E_{omp}(0)e^{-i\beta\xi} \quad (2.6)$$

где $E_{nad}(0)$, $E_{omp}(0)$ - амплитуда электрического поля падающей и отраженной волн в точке $\xi=0$; $\beta=2\pi/\lambda_b$ – фазовая постоянная распространения волны в линии; λ_b - длина волны в волноводе на волне типа H_{10} .

Входное сопротивление, равное

$$\dot{Z}_{вх} = \frac{\dot{E}_{nad}(\xi) + \dot{E}_{omp}(\xi)}{\dot{H}_{nad}(\xi) + \dot{H}_{omp}(\xi)},$$

после подстановки (2.6), разложения экспоненциальных функций, преобразований, подстановки (2.2) и (2.5), нормировки, получает вид

$$\dot{Z}_{вх} = \frac{\dot{Z}'_H + itg\beta\xi}{1 + i\dot{Z}'_H tg\beta\xi}. \quad (2.7)$$

Коэффициент отражения в (2.5) можно записать в виде: $\dot{\Gamma} = |\Gamma(0)| e^{i\varphi}$,

где $|\Gamma(0)|$ - модуль коэффициента отражения на нагрузке;

φ - фаза коэффициента отражения, определяемая нагрузкой.

При движении вдоль линии в выражении коэффициента отражения изменяется только фаза, зависящая от ξ , а модуль остается неизменным

$$\dot{\Gamma}(\xi) = |\Gamma(0)| e^{i(\varphi - 2\beta\xi)} = |\Gamma|. \quad (2.8)$$

Следует отметить, что непосредственное измерение коэффициента отражения затруднено, намного проще измеряется величина коэффициента стоячей волны – $K_{ст}$. Коэффициента стоячей волны определяется величинами полей в максимуме и в минимуме - E_{max} , E_{min} стоячей волны в линии, создаваемой нагрузкой, следующими соотношениями

$$K_{ст} = \frac{|E_{max}|}{|E_{min}|} = \frac{|E_{nad} + E_{omp}|}{|E_{nad} - E_{omp}|} \quad (2.9,а)$$

или выражается через коэффициент отражения в виде

$$K_{ст} = \frac{1 + |\dot{\Gamma}|}{1 - |\dot{\Gamma}|}, \quad (2.9,б)$$

Из (2.9,б), по измеренной величине $K_{ст}$, легко подсчитать $|\Gamma|$. Введение понятий коэффициента отражения, коэффициента стоячей волны и нормированного входного сопротивления позволяет применить к волноводам теорию длинных линий, т.е. заменить волновод эквивалентной двухпроводной линией передачи. В частности, для измерения сопротивлений нагрузок в волноводном тракте [в диапазоне частот или при изменении их геометрии], оказывается полностью применимой круговая диаграмма полных сопротивлений, являющаяся графическим изображением формул (2.5), (2.7), (2.8), (2.9,б).

Но всё это справедливо только при условии рассмотрения волновода с единственным распространяющимся типом волн.

Логическим продолжением концепции эквивалентной волноводу двухпроводной линии является представление различных волноводных узлов схемами замещения в виде сосредоточенных элементов и отрезков двухпроводной линии.

2.3. Способы определения схем замещения неоднородностей

Неоднородностью в волноводе называется область, в которой имеется скачкообразное изменение формы или размеров сечения волновода. При введении неод-

нородности в волновод, работающем на низшем типе волны, в нём вблизи неоднородности возникают волны высших типов. Амплитуды этих высших типов волн таковы, что суммарное поле на всех металлических поверхностях подчиняется граничным условиям:

$$E_{\tau} = 0, H_n = 0 \text{ на границе металл - диэлектрик.}$$

Так как условие распространения волн в волноводе выполняется только для волны низшего типа, то поля высших типов волн будут затухающими, т.е. локализируются вблизи неоднородности. Влияние неоднородности (вдали от неё) скажется в появлении отражённой волны, а амплитуда волны, прошедшей за неоднородность, будет меньше, чем амплитуда падающей волны.

В качестве схемы замещения неоднородности в волноводе выбирается четырёхполюсник из сосредоточенных сопротивлений и отрезков линий, который будучи включенным в разрыв двухпроводной линии передачи, обеспечивает такой величины коэффициент отражения (т.е. вызывает такое соотношение между комплексными амплитудами падающей, отражённой и прошедшей волн), как сама неоднородность.

Рассмотрим конкретные элементы волноводного тракта.

2.4. Некоторые элементы волноводного тракта и их эквивалентные схемы (схемы замещения)

2.4.1. Диафрагмы в прямоугольном волноводе

Диафрагмами называются тонкие металлические перегородки, частично перекрывающие поперечное сечение волновода. В прямоугольном волноводе применяются много разновидностей диафрагм. Наиболее типичные из них – симметричная ёмкостная, симметричная индуктивная, резонансная диафрагма (резонансное окно) – рис 2.1, а-в.

Ёмкостная диафрагма уменьшает размер b между широкими стенками волновода до зазора d_c . В зазоре между кромками диафрагмы происходит концентрация силовых линий электрического поля и сосредотачивается некоторый запас реактивной энергии. Продольные токи, текущие на широких стенках волновода, частично ответвляются на пластинки диафрагмы и замыкаются в виде токов смещения в зазоре. Поэтому эквивалентной схемой такой диафрагмы является сосредоточенная ёмкость, включенная параллельно между проводниками двухпроводной линии (рис.2.1.а).

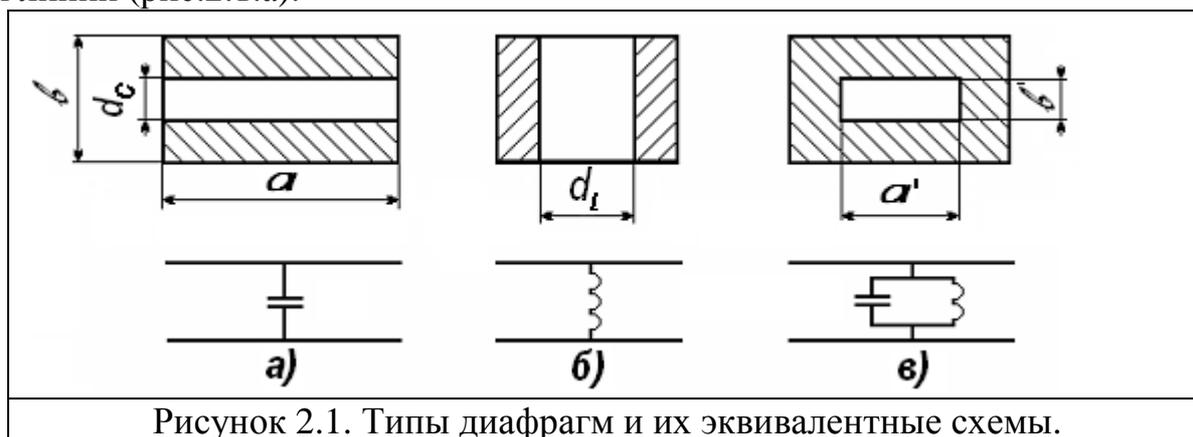


Рисунок 2.1. Типы диафрагм и их эквивалентные схемы.

Нормированная проводимость ёмкостной диафрагмы определяется [1,2]

$$B_c = \frac{4b}{\lambda_g} \ln \left[\cos ec \left(\frac{\pi d_c}{2b} \right) \right] . \quad (2.10)$$

В случае **индуктивной диафрагмы** заужается размер a до величины d_L (рис.2.1,б), продольные токи на противоположных широких стенках волновода частично замыкаются через пластины, соединённые с этими стенками. От токов, текущих по пластинам диафрагм, создается дополнительное магнитное поле. Поэтому эквивалентной схемой является сосредоточенная индуктивность, параллельно включенная между проводниками двухпроводной линии. Нормированная проводимость индуктивной диафрагмы рассчитывается по приближённой формуле [1]

$$B_L = - \frac{\lambda_g}{a} ctg^2 \left(\frac{\pi d_L}{2a} \right) . \quad (2.11)$$

В формулах (2.10) и (2.11) λ_g – длина волны в волноводе, остальные обозначения видны на рис. 2.1. Ёмкостная и индуктивная диафрагмы применяются в качестве согласующих реактивных элементов, в фильтрах или как составная часть СВЧ резонаторов.

Резонансная диафрагма (резонансное окно) имеет вид металлической перегородки с отверстием произвольной формы $a' \times b'$. Свойством резонансного окна является малый коэффициент отражения на длине волны λ_0 , равной [2]

$$\lambda_0 = 2 a' \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{ab'}{a'b}\right)^2}{1 - \left(\frac{b'}{b}\right)^2}} , \quad (2.12)$$

все обозначения показаны на рис.2.1.в.

Следует отметить, что на длинах волн, меньших резонансной длины волны, проводимость окна имеет ёмкостный характер, а на более высоких – индуктивный. Эквивалентная схема окна представляет параллельный колебательный контур, включенный в двухпроводную линию. Как резонансный элемент, окно характеризуется параметром - нагруженная добротность – это добротность эквивалентного контура при резонансе и при согласовании с обоих концов линии, в которую включен контур. Потери в диафрагме малы в силу её малой толщины.

Добротность окна можно экспериментально определить по формуле [1], [2]

$$Q_n = \frac{\omega_0}{2} \left(\frac{d\Gamma}{d\omega} \right)_{\omega \rightarrow \omega_0} \quad (2.13)$$

Для этого необходимо близи резонансной частоты измерить зависимость от частоты коэффициента отражения $|\Gamma|$ или $K_{ст}$ (рис. 2.2).

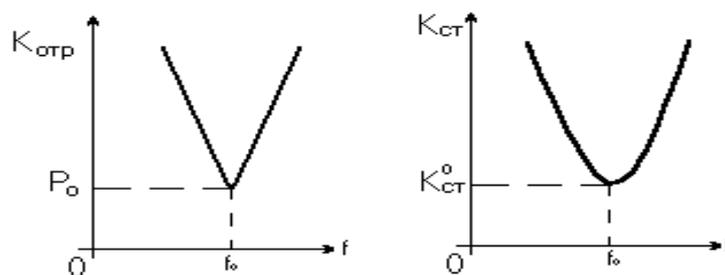


Рис.2.2. Зависимости коэффициентов отражения и стоячей волны в диапазоне волн для резонансного окна

При этом следует помнить, что за резонансным окном должна находиться согласованная нагрузка. Выражением (2.13) широко пользуются на практике при измерениях схем с резонансными окнами. Типичная величина Q_n составляет $1 \div 6$. Окна используются в волноводных фильтрах, при широкополосном согласовании; в СВЧ приборах, газоразрядных волноводных переключателях в качестве герметизирующих окон.

2.4.2. Реактивные штыри в волноводе

В качестве согласующих и трансформирующих устройств используются реактивные штыри в волноводе (индуктивный и ёмкостной).

Индуктивный штырь – металлический проводник круглого сечения, установленный в поперечном сечении волновода по направлению силовых линий электрического поля и соединённый с обоих концов с широкими стенками волновода (рис.2.3.). Действие индуктивного штыря эквивалентно включению шунтирующей индуктивной проводимости. В эквивалентную схему включены два последовательных сопротивления ёмкостного характера, учитывающие конечную толщину (диаметр) неоднородности. Нормированное значение шунтирующего сопротивления эквивалентной схемы индуктивного штыря (рис.2.3.) может быть рассчитано по формуле [2]

$$X_L = \frac{a}{2\lambda_g} \cos ec^2 \left(\frac{\pi d}{a} \right) \left[\ln \left(\frac{4a}{\pi d} \sin \frac{\pi d}{a} \right) - 2 \sin^2 \left(\frac{\pi d}{a} \right) \right] \quad (2.14)$$

Ёмкостной штырь - металлический проводник круглого сечения (рис.2.4), установленный в поперечном сечении волновода по направлению силовых линий

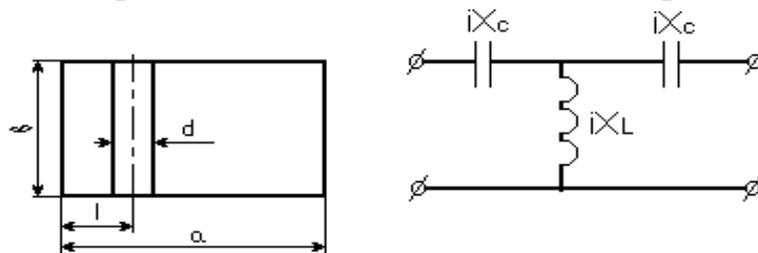


Рис.2.3. Индуктивный штырь в волноводе и его эквивалентная схема

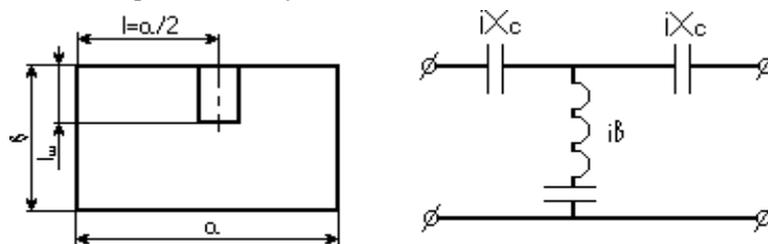


Рис.2.4. Ёмкостной штырь в волноводе и его эквивалентная схема

электрического поля и соединённый только одним концом с широкой стенкой волновода, длиной $l_{ш} < \lambda/4$, имеющий диаметр $d \ll (\lambda/4)$. Ток проводимости, затекающий с широкой стенки волновода на штырь, переходит затем в ток смещения, который, достигнув второй широкой стенки волновода, вновь становится током проводимости. Последовательные сопротивления ёмкостного характера iX_c , присутствующие на эквивалентной схеме, учитывают конечность толщины штыря. При малых диаметрах штыря их влиянием можно пренебречь.

действительной оси, а центры окружностей $X = \text{const}$ лежат на прямой, параллельной мнимой оси (линия AA).

Действительная ось (линия Б-В) представляет собой геометрическое место точек активных сопротивлений. Окружность большого радиуса $|Γ| = 1$ – геометрическое место точек чисто реактивных сопротивлений. Точка Б соответствует короткому замыканию линии; точка В – холостому ходу (разомкнутый конец линии).

Геометрическим местом точек постоянного модуля коэффициента отражения $|Γ|$ являются окружности с радиусом $|Γ| = \text{const}$, проведённые из центра диаграммы – точка С (пунктирные окружности). Как правило, эти окружности на диаграмму не наносятся.

Вращение радиуса $|Γ| = \text{const}$ из точки Б по часовой стрелке соответствует перемещению наблюдателя вдоль линии от нагрузки к генератору на $\frac{l}{\lambda_g}$; движение против часовой стрелки соответствует перемещению наблюдателя от генератора к нагрузке на тот же угол $\frac{l}{\lambda_g}$, где l есть расстояние от нагрузки до первого минимума стоячей волны напряжения в линии. Полный оборот по окружности соответствует перемещению в волноводной линии на расстояние, равное половине длины волны в волноводе. Различные положения радиуса вектора $|Γ|$ соответствуют различным фазам коэффициента отражения в данном сечении линии.

2.6. Применение круговой диаграммы при измерении сопротивления нагрузки

Импедансное (комплексное) сопротивление элементов СВЧ тракта измеряется в данной работе с помощью измерительной линии с последующим применением круговой диаграммы Вольперта – Смитта.

Полное сопротивление нагрузки по диаграмме Вольперта – Смитта можно определить, если измерить величину коэффициента стоячей волны (или модуля коэффициента отражения) и фазу коэффициента отражения (расстояние от плоскости включения нагрузки до первого минимума стоячей волны напряжения в линии). Эти величины находятся с помощью измерительной линии при подключённой нагрузке.

Заметим, что величина модуля коэффициента отражения повторяется в линии с нагрузкой через расстояния, равные целому числу полуволн, измеренных в волноводной линии ($n \frac{\lambda_g}{2}$, n – целое число). Поэтому измерение модуля и фазы коэффициента отражения можно проводить в сечениях, отстоящих от нагрузки на $0,5n\lambda_g$, в пределах перемещения зонда измерительной линии,.

Перед измерением указанных параметров нагрузки (величин коэффициента стоячей волны и расстояния от плоскости включения нагрузки до первого минимума стоячей волны напряжения в линии), необходимо определить условное местоположение этой нагрузки в измерительной линии на заданной частоте, так называемый **условный конец линии**. С этой целью на конце волноводной линии, со стороны подключаемой нагрузки, ставится **заглушка** – металлическая пластинка. Перемещением детекторной головки вдоль измерительной линии, опреде-

ляется местоположение первого минимум $U_{min}=0$ -узел напряжения при КЗ - $l_{minKЗ}$

Это значение $l_{minKЗ}$ и есть **условный конец** линии.

Заметим также, что измерение расстояния между двумя ближайшими минимумами при коротком замыкании позволяет определить длину волны в волноводе $\lambda_g = 2(\ell_{min1} - \ell_{min2})_{KЗ}$.

Итак, при коротком замыкании линии в условном конце находится минимум (ноль) электрического поля. Ему соответствует точка Б на диаграмме (рис.2.6), где реактивные и активные сопротивления равны нулю. Если же вместо пластинки короткого замыкания, но **точно в плоскость ее местонахождения**, включить нагрузку Z_H (например, диафрагму и эквивалент антенны), то узел стоячей волны напряженности электрического поля - l_{minH} сместится относительно отмеченного условного конца. Он сдвигается в сторону генератора от условного конца до расстояние l_{minH} или $\frac{\Delta \ell_{min}}{\lambda_g}$, здесь $\Delta l_{min} = |l_{minH} - l_{minKЗ}|$, что на рис.2.6 соответствует повороту на угол φ . В волноводном тракте при этой нагрузке будет определённая величина $|\Gamma|$, не равная ни нулю, ни единице.

Итак, по измеренным значениям: углу φ , коэффициенту стоячей волны - K_{cm} или модулю коэффициента отражения $|\Gamma|$ на комплексной плоскости (рис.2.6) находим точку М, которая будет отображаться и на комплексную плоскость полного сопротивления нагрузки $Z_H = R \pm iX$, как точка на пересечении двух окружностей R-const и X-const.

2.7. Нахождение полной проводимости по известной величине полного сопротивления

Очень часто возникает необходимость иметь дело не с полными сопротивлениями, а с полными проводимостями. Особенно в случае параллельных схем замещения. Зная полное сопротивление, очень просто перейти к полной проводимости. Действительно, если однородная волноводная линия длиной $\frac{\lambda_g}{4}$ нагружена на сопротивление Z_H , то, согласно (2.7), величина входного сопротивления этой ли-

нии $Z_{ex} = \frac{\dot{Z}_H + itg\left(\frac{\beta\lambda_g}{4}\right)}{1 + i\dot{Z}_H tg\left(\frac{\beta\lambda_g}{4}\right)}$ при $\beta\lambda_g/4 = \pi/2$ и после деления числителя и знаменателя на $tg(\beta\lambda_g/4)$, становится равной величине проводимости нагрузки, т.е.

$$\dot{Z}_{ex} \left(\frac{\lambda_g}{4} \right) = \frac{1}{\dot{Z}_H} = \dot{Y}_H (0) \quad (2.16)$$

Итак, если необходимо определить полную проводимость в сечении $\xi=0$ ($\dot{Y}(0)$), то достаточно найти полное сопротивление в сечении, отстоящем на $\lambda_g/4$ от $\xi=0$, оно численно равно искомой полной проводимости.

Очевидно, что передвижение сечения ξ - const в волноводе на $\lambda_g/4$ равносильно перемещению соответствующей этому сечению точки по круговой диаграмме на угол 180° или $\frac{\ell}{\lambda_g} = 0,25$. Поэтому, если определено нормированное ком-

плексное сопротивление \dot{Z}' , то величину нормированной комплексной проводимости \dot{Y}' определяет симметричная относительно центра диаграммы точка (расположена на таком же расстоянии от центра диаграммы), лежащая на диаметре, проходящем через найденную точку сопротивления и центр диаграммы.

Заметим, что если на **диаграмме полных сопротивлений** линия СБ (рис.2.6.) соответствует узлам, а линия СВ – пучностям напряжений стоячей волны, то на **диаграмме полных проводимостей** линия СБ – будет соответствовать пучностям, а линия СВ – узлам стоячей волны. Точки Б (короткое замыкание на конце линии) и В (холостой ход) на диаграмме полных сопротивлений меняют свои значения на диаграмме проводимостей: точка Б соответствует холостому ходу на конце линии, а точка В – короткому замыканию.

При измерении параметров двухполюсника одинаково удобно определять либо \dot{Z}' , либо \dot{Y}' . Однако, если требуется измерить параметры четырёхполюсника с подключенной согласованной нагрузкой, эквивалентная схема которого представляет параллельное соединение неоднородности в линии (например, диафрагма между измерительной линией и эквивалентом антенны), то тогда лучше определять проводимость.

2.8. Градуировка детектора в измерительной линии

При измерении величины $K_{ст}$ необходимо знание вольтамперной характеристики детектора, находящегося в измерительной линии, т.е. зависимости между напряжённостью высокочастотного поля, действующего на детектор, и током детектора: $|I| = \psi(E)$.

Градуировочная кривая $|I| = \psi(E)$ может быть построена на основании сравнения двух кривых: экспериментально снятой зависимости тока детектора от положения в измерительной линии зонда $I_{дет} = \Psi(\xi)$ и расчётной зависимости распределения напряжённости электрического поля вдоль волновода $E/E_{max} = \sin(2\pi\xi/\lambda_v)$ в режиме стоячей волны. Экспериментальная зависимость $I_{дет} = \psi(\xi)$ снимается в режиме короткого замыкания при перемещении зонда от минимума стоячей волны по направлению к максимуму, нормируется $I_{дет}/I_{детmax}$. Общим звеном в обеих кривых будет координата ξ . При $\xi = const$ по обеим кривым отмечают точки $I_{норм} = const$, $|E_{норм}| = const$ для вольтамперной кривой. По виду ВАХ определяют ее вид: линейный, квадратичный. По характеристике $|I| = \psi(E)$, полученной таким образом, определяют величину $K_{ст} = E/E_{max}$. В случае линейной характеристики $K_{ст}$ определяется соотношением

$$K_{ст} = \frac{I_{дет(max)}}{I_{дет(min)}} = \frac{\alpha_{max}}{\alpha_{min}} \quad (2.17)$$

В случае квадратичной характеристики детектора коэффициент стоячей волны следует определять по формуле:

$$K_{cm} = \sqrt{\frac{I_{det(max)}}{I_{det(min)}}} = \sqrt{\frac{\alpha_{max}}{\alpha_{min}}}, \quad (2.18)$$

где α - показания прибора, стоящего в цепи детектора измерительной линии.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Лабораторная установка и содержание работы

Структурная схема установки показана на рис.3.1.

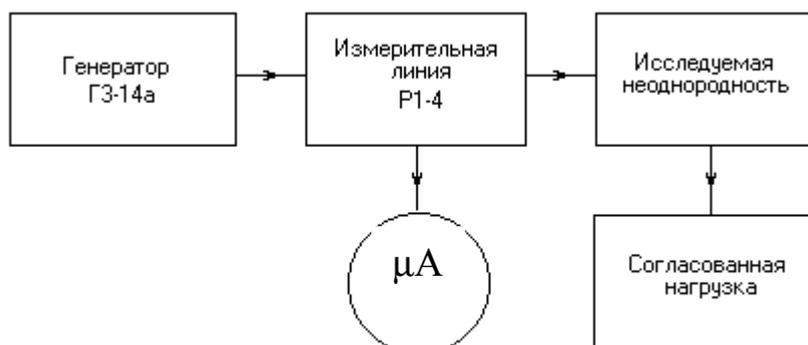


Рис.3.1.

Лабораторная установка выполнена в трёхсантиметровом диапазоне волн.

В качестве исследуемой неоднородности используются элементы волноводного тракта: реактивные диафрагмы и штыри. Согласованная нагрузка, называемая эквивалентом антенны, и трехштырьковый трансформатор сопротивлений необходимы для проведения эксперимента.

Сигнал с генератора поступает в волноводную измерительную линию, доходит до исследуемых элементов, частично отражается, а частично проходит в эквивалент антенны и полностью поглощается. В измерительной линии устанавливается стоячая волна, характеризующаяся коэффициентом - K_{cm} и величиной расстояния первого минимума от условного конца - $l_{мин}$, соответствующих измеряемой нагрузке. По этим параметрам с помощью круговой диаграммы находятся величины полных сопротивлений и полных проводимостей.

В программу работы входит:

- 1) выполнение домашних расчётных работ (п.3.2);
- 2) измерение длины волны в волноводной линии;
- 3) градуировка полупроводникового детектора в измерительной линии (п.2.8);
- 4) измерение полных проводимостей и сопротивлений различных неоднородностей в волноводе (п.2.7). Типы исследуемых бригадой студентов элементов указаны в таблице 3.2, а их геометрические размеры – в таблице 3.1;
- 5) получение режима согласования для двух исследованных диафрагм (емкостной и индуктивной) с помощью штыревого трансформатора сопротивлений. Измерить коэффициент стоячей волны перед началом процесса согласования и после получения согласованного режима. Удовлетворительным согласованием будет режим, когда $K_{cm} \leq 1,3$.

3.2. Расчётное задание

ВНИМАНИЕ : Все расчёты и эксперименты проводятся на заданной частоте сигнала (табл.3.2) или длине волны, измеренной в волноводе в процессе работы.

- 1) рассчитать и занести в таблицу значения относительной величины напряженности электрического поля стоячей волны в волноводе при изменении координаты ξ продольной оси ($E=\Psi(\xi)$) по формуле $E = \sin\left(\frac{2\pi\xi}{\lambda_B}\right)$, изменяя $0 \leq \xi \leq \lambda_B/4$ через один миллиметр. Расчеты необходимы для построения вольтамперной характеристики детектора (см. раздел 2.9);
- 2) рассчитать и построить зависимости проводимостей исследуемых неоднородностей от соответствующих размеров для неоднородностей (см. таблицы 3.1 и 3.2) на измеренной длине волны;
- 3) для резонансного окна (номер определен таблицами 3.1 и 3.2) рассчитать резонансную длину волны (λ_0) или резонансную частоту. Нарисовать на рабочей частоте (табл. 3.2) его эквивалентную схему.

Таблица №3.1. Значение параметров различных неоднородностей

Тип неоднородности	Размер	Номера и размеры проводимостей					
		1	2	3	4	5	6
Индуктив. диафрагма	d_L	15.0	16.0	17.0	18.0	19.5	21.5
Ёмкостная диафрагма	d_c	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	7.6
Индуктивный штырь	l	2.0	3.5	5.0	7.0	9.0	11.5
	d	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ёмкостный штырь	l_m	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
	d	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Резонансное окно	a'	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0
	b'	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.5

Таблица №3.2. Номера неоднородностей исследуемых бригадами

Тип неоднородности	Номер бригады и неоднородности				
	I	II	III	IV	V
Индуктив. диафрагма	1.3.5	2.4.5	1.2.6	3.5.6	1.4.6
Ёмкостная диафрагма	1.3.5	2.4.5	1.2.6	3.5.6	1.4.6
Индуктивный штырь	1.2	3.4	5.6	2.4	3.6
Ёмкостный штырь	1.2.3	1.3.5	2.4.6	1.3.6	2.3.6
Резонансное окно	1.4	2.6	3.5	1.3	2.5
Частота для расчетов, ГГц	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5

3.3. Порядок выполнения работы

3.3.1. Ознакомиться с аппаратурой относящейся к данной работе. Обратит особое внимание на настройку и работу измерительной линии; работу генератора в режиме внутренней модуляции, перестройку и измерение частоты его, настройку с целью получения достаточной мощности на выходе.

3.3.2. Включить генератор ГЗ – 14А , усилитель У2-4, если он используется в качестве индикаторного прибора измерительной линии, дать им прогреться 5 – 10 минут.

3.3.3. Настроить генератор ГЗ – 14А на частоту сигнала, для которой произведён предварительный расчёт параметров неоднородностей. Допустимые отклонения длины волны не более $\pm 1\%$.

3.3.4. Настроить измерительную линию так, чтобы при перемещении каретки зонда вдоль линии показания индикаторного прибора (или микроамперметра) находилась в пределах шкалы измерений.

3.3.5. Произвести градуировку детектора в измерительной линии.

Для этого включить на конце тракта короткозамыкающую пластинку. Определить положение двух – трех узлов $(\ell_{\min})_{k3}$ стоячей волны, и определить длину волны $\lambda_{в}$. Перемещая зонд от узла стоячей волны на расстояние $0 - \lambda_{в}/4$, фиксировать показания индикаторного прибора $\alpha = \psi(\xi)$ (через каждые 1мм). Провести нормировку полученных данных, т.е. найти $\frac{\alpha}{\alpha_{\max}} = \psi(\xi)$. Данные нормированной расчётной зависимости $E/E_{\max} = \psi(\xi)$ (п. 3.2) и экспериментальной зависимости

$\frac{\alpha}{\alpha_{\max}} = \psi(\xi)$ занести в таблицу 3.3. Сравнив данные таблицы при одинаковых координатах ξ , построить вольтамперную характеристику детектора $\frac{\alpha}{\alpha_{\max}} = \psi\left(\frac{E}{E_{\max}}\right)$ при $\xi = \text{const}$.

Таблица №3.3. Экспериментальные и расчетные данные для построения ВАХ.

ξ												
α												
α/α_{\max}												
E/E_{\max}												

3.3.6. Зафиксировать положение узла стоячей волны в измерительной линии, т.е. положение «условного конца» линии $(\ell_{\min})_{k3}$. При дальнейших измерениях пользоваться «условным концом» линии для отсчета расстояния от него (в сторону генератора) до ближайшего узла стоячей волны с нагрузкой $(\ell_{\min})_н$.

Таблица №3.4. Результаты измерения и расчета параметров неоднородностей

Тип неоднородности	$(\ell_{\min})_H$	α_{\max}	α_{\min}	$\alpha_{\max}/\alpha_{\min}$ $K_{CB} = 1/K_{\text{об}}$	$\Delta = l_{\min K3} - l_{\min H} $	Δ/λ_B	Z_H	Y_H	Расчетные параметры

3.3.7. Измерить полное сопротивление (и проводимость) для указанных на каждую бригаду в таблице 3.2 номеров нагрузок, занося результаты эксперимента в таблицу №3.4. Для этого надо проделать следующее:

- 1) подключить исследуемый элемент и за ним согласованную нагрузку в плоскость местоположения пластинки короткого замыкания, убрав ее;
- 2) определить положение $\ell_{\min H}$, относительного «условного конца», двигаясь в сторону генератора;
- 3) измерить α_{\min} , α_{\max} в измерительной линии для каждого подключаемого элемента и занести в таблицу №3.4.
- 4) Далее идет обработка результатов: найти $\alpha_{\min}/\alpha_{\max}$, и пользуясь графиком ВАХ детектора рассчитать $K_{\text{об}} = E_{\min}/E_{\max}$, а затем определить $K_{\text{ст}} = 1/K_{\text{об}}$;
- 5) от узлов стоячих волн на круговой диаграмме полных сопротивлений (линия ОБ на рис.2.6) **против часовой стрелки** под углом (ℓ/λ_g) провести линию и на ней обозначить точку, отстоящую от центра О на расстоянии, соответствующем измеренному $K_{\text{св}}$ (или пересчитанному в коэффициент отражения $K_{\text{отр}}$). Эта точка определяет искомое полное сопротивление $Z=R+iX$.

3.3.8. Для каждой исследованной неоднородности найти полную проводимость, пользуясь круговой диаграммой (см. раздел 2.8).

3.3.9. Согласовать сопротивление нагрузки (диафрагма + эквивалент антенны или штырь + эквивалент антенны), подключив ее к выходу измерительной линии, с помощью трёхштыревого трансформатора сопротивлений. Регулировкой длины штырей трансформатора (принцип работы и конструкция даны в сборнике [3]) добиться минимальной величины $K_{\text{св}}$.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 4.1. Как следует настраивать детекторную секцию измерительной линии?
- 4.2. Как определить расстояние первого минимума от нагрузки?

4.3. Какие виды диафрагм существуют и их схемы замещения, которыми следует пользоваться на практике?

4.4. Когда при измерении $K_{св}$ или $K_{бв}$ с помощью волноводной измерительной линии следует брать квадратный корень из показаний индикаторного прибора (микроамперметра)?

4.5. Зачем необходимо согласовывать генератор с нагрузкой?

4.6. Как находится сопротивление нагрузки с помощью диаграммы Вольперта-Смитта?

4.7. Объяснить физику возникновения реактивных и активных сопротивлений при помещении диафрагмы в волноводный тракт.

4.8. Почему реактивные диафрагмы в сочетании с эквивалентом антенны имеют активную составляющую сопротивления (проводимости)?

4.9. Какие минимальные и максимальные размеры должны быть у резонансного окна на заданной частоте?

4.10. Какой вид будет иметь эквивалентная схема резонансного окна на частотах больше резонансной частоты ?

4.11. Как по графику ВАХ детектора измерительной линии определяется $K_{ст}$ или $K_{бв}$?

4.12. Изобразить схему конструктивного устройства штыревого трансформатора.

4.13. Как определяется экспериментально длина волны в волноводе?

4.14. Можно ли определить в данной работе входное сопротивление антенны?

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

5.1. Цель работы, структурная схема измерительной установки, методика измерений.

5.2. Результаты измерений и расчётов в виде таблиц.

5.3. Графики (теоретические и экспериментальные) зависимостей проводимости от размеров для различных неоднородностей (штыри, диафрагмы).

5.4. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. Учебник.- М: Связь, 2003. – 487с.

2. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для вузов/ Д.И. Воскресенский и др. – М.: Радиотехника, 2006. – 375с.

3. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 432с.