

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

---

**Д.Н. Яманов**

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА  
И  
РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

**ПОСОБИЕ  
по выполнению лабораторных работ  
Часть 1**

*для студентов 2 - 4 курсов  
специальностей 160905, 090106  
всех форм обучения*

**Москва – 2010**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»**

---

**Кафедра радиотехнических устройств**

**Д.Н. Яманов**

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА  
И  
РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

**ПОСОБИЕ  
по выполнению лабораторных работ  
Часть 1**

*для студентов 2 - 4 курсов  
специальностей 160905, 090106  
всех форм обучения*

**Москва – 2010**

ББК 6Ф2

Я54

Научный редактор, рецензент канд. техн. наук, проф. В.Г.Сергеев.

Электродинамика и распространение радиоволн: Пособие к выполнению лабораторных работ, Часть 1. - М.: МГТУ ГА, 2010. - 50 с.

Данное пособие издается в соответствии с учебными планами для студентов II - IV курсов специальностей 160905, 090106 всех форм обучения.

Рассмотрены и одобрены на заседаниях кафедры 13.04.10г. и методических советов 15.04.10г.

## ВВОДНЫЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

При подготовке к лабораторной работе изучается теоретический материал по рекомендованной литературе и настоящему пособию. Достаточность знаний следует проверить по контрольным вопросам, которые приводятся в конце описания каждой работы.

Общие указания к выполнению лабораторных работ:

1. Перед началом работы преподаватель опрашивает студентов по теоретической части работы и методике эксперимента.

2. На выполнение одной лабораторной работы отводится 4 часа. За это время студенты должны успеть ответить на вопросы по теории, выполнить экспериментальную часть и оформить отчет. Если к концу занятия бригада не успела оформить и сдать отчет, то черновой материал с фамилиями студентов должен быть показан преподавателю и подписан им. К следующему занятию отчет должен быть полностью оформлен.

3. До окончания занятий выходить из лаборатории можно только с разрешения преподавателя.

4. Студенты должны ознакомиться с правилами работы с приборами лабораторных установок. Пояснения даются преподавателем и лаборантом, а также изложены в соответствующих инструкциях. Первое включение приборов лабораторной установки производится только с разрешения преподавателя или лаборанта.

Постоянных напряжений на приборах и линиях нет и прикосновение к ним безопасно. Уровень высокочастотной мощности соответствует нормам.

**Вскрывать и ремонтировать приборы студентам запрещается.**

5. После окончания эксперимента необходимо выключить приборы, а перед уходом из лаборатории - привести в порядок свое рабочее место.

6. Защита лабораторной работы заключается в объяснении полученных результатов с точки зрения физических процессов, происходящих в исследуемых устройствах и анализе соответствия полученных результатов теоретическим положениям, известным из рекомендуемой литературы.

Студенты, не защитившие предыдущую лабораторную работу, к выполнению последующей не допускаются.

7. В журнале студенты должны расписаться об ознакомлении с инструкцией по охране труда.

Отчеты могут оформляться как в отдельном экземпляре, так и в общей тетради. Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- титульный лист (см. Приложение);
- цель работы;
- схему лабораторной установки;
- экспериментальные данные в виде таблиц, графиков, диаграмм;
- выводы по работе.

# 1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВОЛНОВОДНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

### 1. 1. Цель работы

1. Экспериментальное определение параметров , характеризующих электромагнитную волну в волноводе ( $\lambda_v, v_\phi, v_{гр}, K_z$ ).
2. Экспериментальное определение величины входного сопротивления нормированной нагрузки волноводной линии передачи.
3. Экспериментальное согласование волноводной линии передачи , работающей на несогласованную нагрузку.

### 1. 2. Краткие сведения из теории

Для выполнения работы необходимо ознакомиться с вопросами распространения электромагнитных волн по волноводам (разделы 3.1-3.10 [1], 7.1-7.3 [2]), вопросами согласования волноводов (разделы 15.5, 17.4 [2]) и с кратким изложением теоретической части данного пособия.

К линиям передачи предъявляются следующие требования: необходимая для работы широкополосность, достаточная для передаваемой мощности сигнала электрическая прочность, малые потери и отражения, отсутствие заметных амплитудно-частотных искажения в рабочем спектре частот и отсутствие излучения в окружающее пространство. Кроме того, линия должна иметь малые габариты и вес в сочетании с простотой конструкции и эксплуатации, а также, если это необходимо, обладать достаточной жесткостью и виброустойчивостью.

В диапазоне СВЧ наиболее широкое применение, особенно при больших мощностях, приобрели полые металлические волноводы прямоугольного и круглого сечений.

При небольших уровнях мощности и более низких частотах, особенно при жестких требованиях к прочности и малым габаритам, используются полосковые линии передачи, но они обладают большими, чем волноводы потерями.

По волноводам могут распространяться волны с различной структурой поля. Каждой структуре поля отвечает свое название типа волны. Все волны делятся на два больших класса волн: типа Н (у которых есть продольная компонента поля  $H_z$  и равна нулю продольная компонента поля  $E_z$ ) и типа Е (у которых  $E_z$  конечна, а  $H_z = 0$ ). Оба типа волн независимы друг от друга. Это значит, что каждый из них в отдельности удовлетворяет граничным условиям на стенках волновода.

В волноводах может существовать бесконечно большое многообразие типов волн как Е, так и Н типа. Различие этих волн указывается индексами волны –  $E_{mn}$  и  $H_{mn}$ , где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$  и  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ . В прямоугольных волноводах эти

индексы указывают:  $m$ -число стоячих полувольт, укладываемых вдоль большего поперечного размера волновода "а", индекс  $n$  - число стоячих полувольт поля вдоль меньшего поперечного размера волновода "б". Индекс, равный нулю, означает, что поле вдоль соответствующей координаты не меняется по величине. Сочетание индексов "00" не позволяет удовлетворить граничным условиям в волноводе и потому волн типа  $H_{00}$  или  $E_{00}$  не бывает. У волн типа  $H_{mn}$  нулю может быть равен только один из индексов ( $H_{01}$  или  $H_{10}$ ), а у волн типа  $E$  наименьшее значение  $m$  и  $n$ - единица (волна  $E_{11}$ ).

Одной из характеристик поля является величина дифференциального волнового сопротивления волны  $\dot{\eta}$ , которое равно отношению напряженностей поперечных составляющих электрического  $E_{\perp}$  и магнитного  $H_{\perp}$  полей. В общем случае, это величина комплексная:  $\dot{\eta} = \dot{E} / \dot{H} = |\dot{\eta}| e^{j(\varphi_E - \varphi_H)}$ . Если это чисто мнимая величина  $\dot{\eta} = j \cdot |\dot{\eta}|$ , то это означает, что  $E_{\perp}$  и  $H_{\perp}$  имеют взаимный фазовый сдвиг  $\varphi_E - \varphi_H = \pi / 2$ . При действительном значении  $\dot{\eta} = \eta$  сдвиг по фазе отсутствует, поля синфазны. Когда  $\dot{\eta}$  комплексная величина, то фазовый сдвиг лежит в пределах  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ . У плоской однородной волны  $\dot{\eta} = \dot{E} / \dot{H} = \sqrt{\mu_a / \epsilon_a}$ , и в свободном пространстве с воздушным заполнением без потерь составляет  $\eta_0 = 120\pi$ , Ом. У волн типа  $H$  и  $E$ , распространяющихся в волноводе, дифференциальные волновые сопротивления соответственно равны

$$\dot{\eta}_H = \eta \cdot \frac{K}{K_Z} \quad \text{и} \quad \dot{\eta}_E = \eta \cdot \frac{K_Z}{K} \quad (1.1)$$

Если учесть, что усредненное за период значение вектора Пойнтинга зависит от фазового сдвига  $(\varphi_E - \varphi_H)$  между поперечными полями  $E$  и  $H$ , так как

$$P_{cp} = 1/2 \cdot [\overline{E_{\perp}} \overline{H_{\perp}}] \cos(\varphi_E - \varphi_H), \quad (1.2)$$

то отсюда видно, что когда  $\dot{\eta}_E$  и  $\dot{\eta}_H$  мнимы, то движения энергии вдоль волновода нет.

Волновод, возбуждаемый частотой  $\omega$ , может находиться относительно соответствующего типа волны (при его полном или неполном согласовании с нагрузкой) в одном из трех режимов: докритическом, критическом или закритическом. Какой это будет режим для данного типа волны определяется соотношением частоты возбуждения и критической частотой  $\omega_{кр}$  данного типа волны в волноводе заданных поперечных размеров.

Бегущая волна в волноводе должна иметь фазу, зависящую и от времени и от координаты в направлении распространения (что отражает факт запаздывания поля по фазе в более далеких от источника точках),

$$\dot{E} = \dot{E}_0(x, y) (\exp(j(\omega t - K_Z \cdot z))) = \dot{E}_0(x, y) e^{-\alpha \cdot z} \exp(j(\omega t - K_Z \cdot z)), \quad (1.3)$$

где  $z$  - координата вдоль направления распространения волны ;  $\dot{K}_z = K_z - j\alpha$  - комплексная постоянная распространения , имеющая действительную часть  $K_z = 2\pi / \lambda_v$  (которая называется коэффициентом фазы и показывает набег фазы в волноводе на единице его длины ) и мнимую часть  $-j\alpha$  (модуль которой  $\alpha$  называется коэффициентом затухания). Последний равен

$$\alpha = 20 \lg \frac{E(z)}{E(z+1)} \quad , \quad \frac{\text{дБ}}{\text{м}} = \ln \frac{E(z)}{E(z+1)} \quad , \quad \frac{\text{Неп}}{\text{м}} \quad . \quad (1.4)$$

При отсутствии потерь  $\alpha = 0$ .

• Режим в волноводе определяется значением коэффициента фазы  $\dot{K}_z$  . Если  $K_z$  действительная величина ( т. е.  $K_z^2 > 0$  ), то, как видно из (1.1) и (1.3), будет режим бегущей волны. Такой режим называется докритическим. Усредненный вектор Пойнтинга отличен от нуля и максимален, так как при  $K$  действительном  $\eta_{н,е}$  действительно и  $\varphi_E - \varphi_H = 0$  (1.1) , (1.2).

Когда  $K_z^2 < 0$  (т.е.  $K_z$  - мнимая величина , так, что  $K_z = -jK_z'$ ), то при подстановке в (1.3) видно, что фаза не зависит от расстояния вдоль  $z$  . Такое поле не переносит энергии вдоль волновода :  $\dot{\eta}_E$  и  $\dot{\eta}_H$  - мнимые величины (1.1) и  $\varphi_E - \varphi_H = \pi / 2$  и отсюда  $p_{cp} = 0$ . Поле носит реактивный характер. Поле вдоль  $z$  (даже при отсутствии потерь, когда  $\alpha = 0$  ) затухает по амплитуде по экспоненциальному закону  $\exp(-K_z'z)$  . Это затухание обусловлено интерференционными явлениями. Такой режим называется закритическим.

Режим, когда  $K_z = 0$ , называют критическим. В этом режиме ни фаза, ни амплитуда поля не зависят от продольной координаты  $z$  .

Как известно из решения краевой задачи в области прямоугольного волновода,  $K^2 = K_x^2 + K_y^2 + K_z^2$  , где  $K = \omega \cdot \sqrt{\epsilon_a \mu_a}$  ,  $K_x = m\pi / a$  ,  $K_y = n\pi / b$ . Отсюда  $K_z^2 = K^2 - (K_x^2 + K_y^2)$ .

Когда  $K_z^2 = 0$  , то  $K^2 = K_x^2 + K_y^2 = K_{кр}^2$  и соответствующая этому значению  $K$  частота называется критической. Таким образом,

$$\omega_{кр} = \frac{K_{кр}}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a}} = \frac{\sqrt{(K_x)^2 + (K_y)^2}}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a}} = v_0 \cdot K_{кр} \quad . \quad (1.5)$$

В докритическом режиме, когда  $K_z^2 > 0$  и  $K^2 > K_x^2 + K_y^2$  ,  $\omega_{ген} > \omega_{кр}$  , где под  $\omega_{ген}$  понимается частота возбуждения волновода (частота генератора).

В закритическом режиме, когда  $K_z^2 < 0$ ,  $K^2 < K_{кр}^2$  и  $\omega_{ген} < \omega_{кр}$ . Отсюда видно, что тот или иной режим для заданного типа волны возникает в волноводе в зависимости от того, каково значение частоты возбуждения по сравнению с критической частотой данного типа волны.

Каждая волна  $E_{mn}$  или  $H_{mn}$ , имеет свое значение критической частоты в данном волноводе, так как  $\omega_{кр}$  зависит от индексов  $m$  и  $n$  и от поперечных размеров волновода "а" и "б".

Иногда вместо понятия  $\omega_{кр}$  пользуются понятием  $\lambda_{кр}$ , но взаимный пересчет их производится не через скорость света в воздухе  $c$ , а через скорость света в заполняющем волновод диэлектрике  $v_0 = c/\sqrt{\epsilon\mu}$ , т.е.  $\lambda_{кр} = v_0/f_{кр}$ . При этом длина волны генератора, возбуждающего волновод в критическом режиме  $\lambda_{ген.кр}$ , пересчитывается в критическую частоту возбуждения, как обычно:

$$\lambda_{ген.кр} = c/f_{кр} .$$

Отсюда

$$\lambda_{кр} = \frac{v_0}{f_{кр}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu} \cdot f_{кр}} = \frac{2\pi v_0}{\omega_{кр}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} . \quad (1.6)$$

Если один из поперечных размеров прямоугольного волновода больше другого, т.е.  $a > b$  так, что  $a > 2b$ , то  $\lambda_{кр}$  согласно (1.6) расположатся на шкале длин волн, как показано на рис.1.1. Самая большая  $\lambda_{кр}$  будет у волны  $H_{10}$ , равная  $2a$ . Остальные типы волн будут иметь меньшие значения  $\lambda_{кр}$ . При заполнении волновода воздухом при  $\lambda_{ген} > \lambda_{кр}$  будет закритический режим для данного типа волны, а при  $\lambda_{ген} < \lambda_{кр}$  - докритический режим. Следовательно, только один тип волны  $H_{10}$  при правильном выборе размеров "а" и "б" позволит осуществить одноволновый докритический режим на заданной длине волны генератора, при котором все остальные типы волн находятся в закритическом режиме. Эта волна в прямоугольном волноводе называется основной. Структура ее поля в трех режимах показана на рис. 1.2.

Для того, чтобы этим условиям удовлетворить, необходимо соблюсти неравенство  $\lambda_{кр H_{20}} = a < \lambda_{ген} < 2a = \lambda_{кр H_{10}}$  или  $\lambda_{макс}/2 < a < \lambda_{мин}$ . Другими словами, волновод должен иметь определенные поперечные размеры для работы в заданном диапазоне волн в одноволновом режиме. Если в докритическом режиме надо работать с высшим типом волны, например,  $H_{20}$  или  $E_{11}$ , то при той же длине волны генератора надо иметь большие размеры волновода "а" и "б".

Одноволновый режим имеет то преимущество, что при нем можно добиться режима согласования. Дело в том, что различные типы волн обладают разными волновыми сопротивлениями (1.1) и при многоволновом режиме согласованной может быть только одна волна.

К числу важнейших параметров волны в волноводе относятся: фазовая скорость  $v_{ф}$ , групповая скорость  $v_{гр}$  (или скорость перемещения энергии узкополосного сигнала) и длина волны в волноводе  $\lambda_{в}$ .

Под  $v_{ф}$  понимается скорость движения фронта волны, который представляет собой поверхность с одинаковым значением фазы поля волны. В волноводе фронт волны - это плоскость его поперечного сечения.

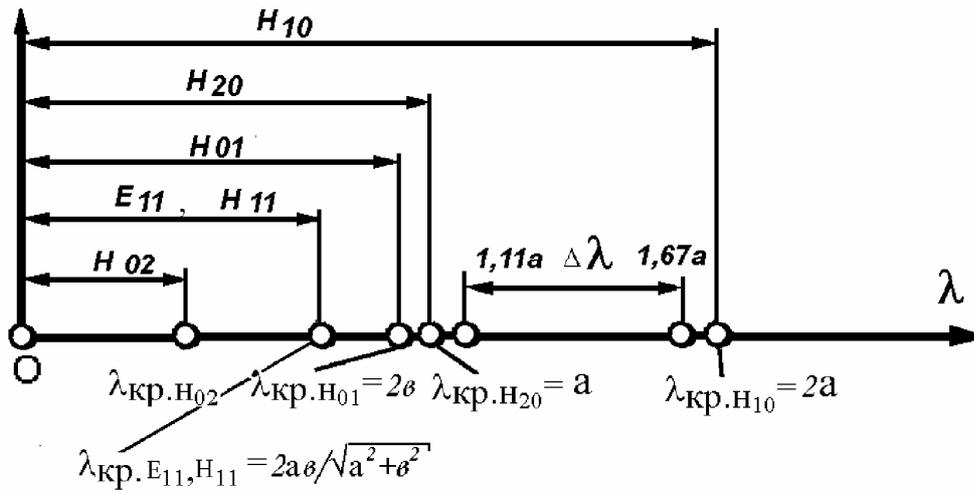


Рис. 1.1. Расположение в прямоугольном волноводе критических длин волн

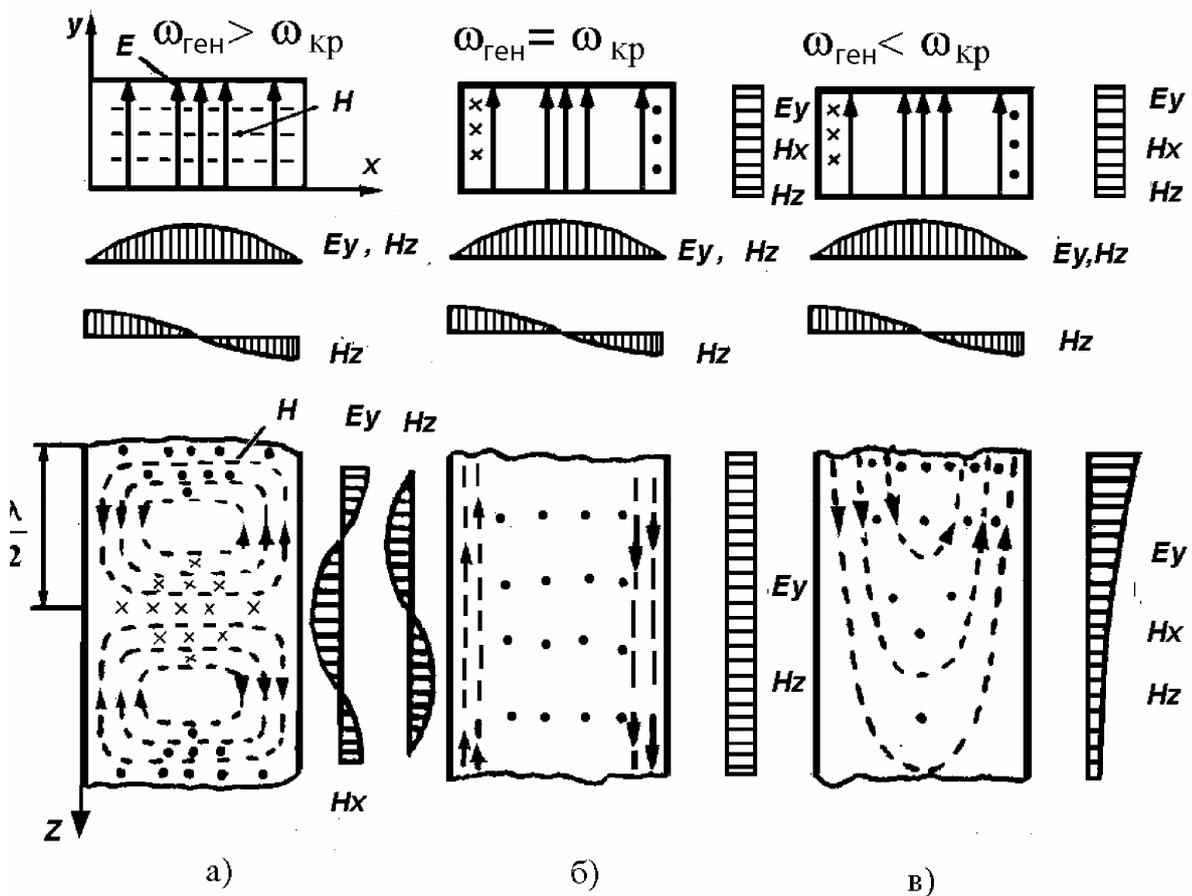


Рис.1.2. Структура поля волны  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе в трех режимах:  
 а) докритическом; б) критическом и в) закритическом

Длина волны в волноводе (расстояние между двумя фронтами бегущей волны с отличающимися на  $360^\circ$  фазами) при  $\epsilon = \mu = 1$  равна

$$\lambda_B = \frac{2\pi}{K_z} = \frac{2\pi}{\sqrt{K^2 - K_{кр}^2}} = \frac{\lambda_{ген}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{ген}}{\lambda_{кр}}\right)^2}} > \lambda_{ген} \quad . \quad (1.7)$$

Отсюда можно найти и фазовую скорость

$$v_\phi = \lambda_B \cdot f = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{ген}}{\lambda_{кр}}\right)^2}} > c \quad (1.8)$$

и групповую скорость

$$v_{гр} = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{ген}}{\lambda_{кр}}\right)^2} < c \quad . \quad (1.9)$$

На рис. 1.3 приведены зависимости  $\lambda_B$ ,  $v_\phi$  и  $v_{гр}$  от частоты ( $\omega_{ген}$ ).

Для согласования линии передачи с нагрузкой необходимо соблюсти равенство интегрального волнового сопротивления линии  $\rho$ , определяемого по одной из трех формул

$$\rho_1 = \frac{U}{J} \quad , \quad \rho_2 = \frac{2P}{J^2} \quad , \quad \rho_3 = \frac{U^2}{2P} \quad (1.10)$$

с активной частью сопротивления нагрузки.

Если принять, что для волны  $H_{10}$

$$U_{макс} = \int_0^b E_{умакс} dy = E_{умакс} \cdot b \quad ;$$

$$J = \int_0^a \delta_{S_z} dx = \int_0^a H_x dx = H_{xмакс} \cdot \int_0^a \sin\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) dx = H_{xмакс} \cdot \frac{2a}{\pi} \quad ;$$

$$P = \int_0^b \int_0^a \frac{E_y \cdot E_y^*}{2 \cdot \eta_H} dx dy = \frac{E_{умакс}^2 \cdot b}{2 \cdot \eta_H} \cdot \int_0^a \sin\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) dx = \frac{a \cdot b}{4 \cdot \eta_H} \cdot E_{умакс}^2 \quad ,$$

$$\rho_1 = \frac{E_{умакс} \cdot b}{H_{xмакс} \cdot a} \cdot \frac{\pi}{2} = 1,57 \cdot \eta_H \cdot \frac{b}{a} \quad ; \quad \rho_2 = \eta_H \cdot 1,25 \cdot \frac{b}{a} \quad ; \quad \rho_3 = 2 \cdot \eta_H \cdot \frac{b}{a} \quad ,$$

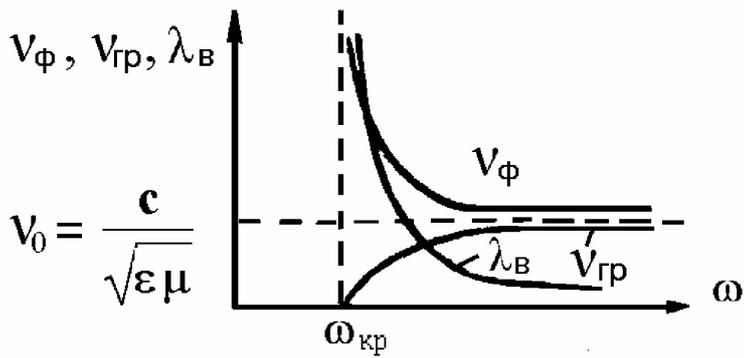


Рис. 1.3. Зависимость длины волны в волноводе, фазовой и групповой скоростей от частоты возбуждения

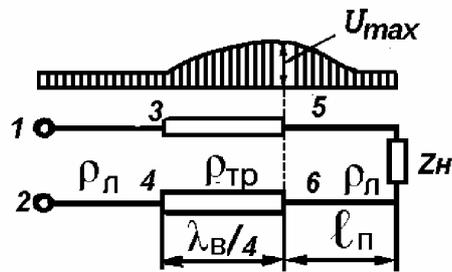


Рис.1.4. Узкополосное согласующее устройство:  $\lambda/4$  - трансформатор

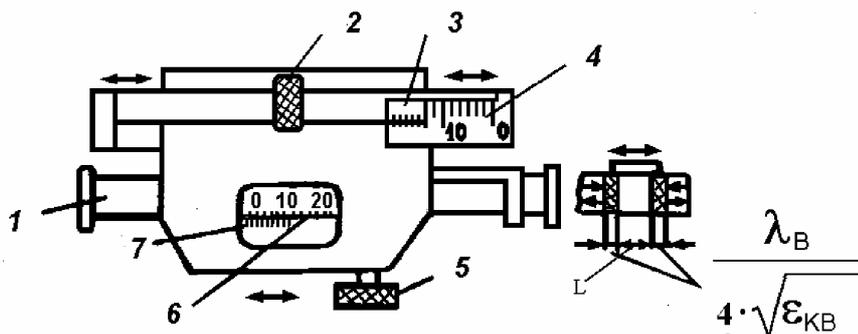


Рис. 1.5. Волноводный согласующий трансформатор с двумя четверть-волновыми кварцевыми пластинами: 1 - волновод; 2 - винт взаимного перемещения пластин; 3 - шкала нониуса (цена деления  $\pm 0,1$ мм); 4 - шкала взаимного сдвига пластин; 5 - винт одновременного перемещения двух пластин при  $L = \text{const}$ ; 6 - шкала перемещения пластин; 7 - нониус (цена деления  $\pm 0,1$ мм)

где  $E_{y \text{ макс}}$  и  $H_{x \text{ макс}}$  - максимальные значения этих полей в поперечном сечении волновода,  $\delta_{sz}$  - продольная составляющая поверхностной плотности тока. Как видно, интегральное волновое сопротивление, вычисленное по разным формулам, имеет неодинаковое значение и является неопределенной величиной. Поэтому о степени согласования в волноводной линии принято судить по нормированной к волновому сопротивлению нагрузке  $z_{н}/\rho = z'_{н}$ , являющейся безразмерной величиной. При полном согласовании  $z'_{н}=1$ .

Необходимость согласования линии передачи связана с тем, что при больших отражениях от нагрузки в нее поступает только часть мощности волны, к.п.д. линии падает по сравнению со случаем, когда учитывались только тепловые потери.

Благодаря неоднородностям линии, имеют место локальные перенапряжения поля  $E$  (например, в изгибах линии и др.). С точки зрения пробоя линии опасно, когда эти локальные перенапряженности поля совпадут с пучностями поля смешанной волны, возникающими из-за отражений от нагрузки. Пробой в этом сечении приводит к короткому замыканию и, следовательно, к полному отражению волны от этого сечения. Мощность в нагрузку при этом не поступает. При работе с магнетронными генераторами и большой длине линии передачи высокий уровень, отраженной волны на выходе магнетрона, может привести к перескоку его частоты, что, в свою очередь, может привести, например, при пассивной радиолокации к выходу отраженного от цели сигнала из полосы пропускания радиолокационного приемника.

Под к.п.д. линии передачи понимается отношение активной мощности в нагрузке к активной мощности генератора, отдаваемой им в нагрузку. Если линия согласована, то к. п. д. =  $e^{-2\alpha l}$ , где  $\alpha l$  - затухание в неперах. Если в стенках волновода потерь нет, а отраженная волна поглощается вентилем, то к.п.д. =  $1 - |\dot{\Gamma}|^2$ . При наличии и потерь и отражений имеем

$$\text{к. п.д.} = (1 - |\dot{\Gamma}|^2) \cdot \exp(-2\alpha l), \quad (1.11)$$

где  $|\dot{\Gamma}|$  - модуль коэффициента отражения ;  $\alpha$  - коэффициент затухания в Неп/м ;  $l$  - длина линии, м.

Контроль за согласованием линии в лабораторных условиях производится путем измерения КСВ при помощи измерительной линии. В условиях эксплуатации контроль может вестись по приборам, в схеме которых используется направленный ответвитель.

Согласование бывает узкополосным или широкополосным. В первом случае полоса частот не контролируется при расчете номиналов элементов согласующего устройства, она определяется после того, как закончено нахождение всех номиналов согласующих элементов. Относительная полоса частот при этом зависит от частотных свойств нагрузки и согласующих элементов, а также от заданного граничного значения КСВ. При

широкополосном согласовании подбор номиналов реактивного согласующего устройства производят так, чтобы:

- 1 ) получить минимальное значение КСВ в заданной полосе частот;
- 2 ) получить максимальную полосу согласования при указанной величине допустимого КСВ.

К числу узкополосных согласующих устройств относится, например,  $(1/4)\lambda_B$  трансформатор (рис.1.4). Согласование сводится к тому, что трансформатор включается в то сечение (5-6), где входное сопротивление активно, т.е. в пучность напряжения  $U_{\max}$ , где активное сопротивление равно КСВ или в минимум напряжения, где активное сопротивление равно  $1 / \text{КСВ}$ . Тогда волновое сопротивление трансформатора с учетом трансформирующих свойств линии длиной  $\lambda_B/4$  ( $R_{\text{вх}} = \rho_{\text{тр}}^2 / R_{\text{н}}$ ), необходимо взять равным  $\rho_{\text{тр}} = \sqrt{\rho R_{\text{вх}}}$ , где  $\rho$  - волновое сопротивление линии передачи;  $\lambda_B$  - длина волны в линии. При этом распределение напряжения на линии будет соответствовать рис.1.4.

На этом же принципе основана работа волноводного трансформатора с двумя четвертьволновыми кварцевыми пластинами  $\epsilon_{\text{кв}} = 3,8$  (рис.1.5). Именно этот трансформатор используется в данной работе. Две  $(1/4) \lambda_B / \sqrt{\epsilon_{\text{кв}}}$  пластины нужны для того, чтобы иметь две степени свободы настройки. Это делается для того, чтобы не надо было разрезать линию в том месте, где на ней максимум или минимум поля (что, естественно, на практике невыполнимо). Вторая степень свободы настройки позволяет сместить максимум (или минимум) поля в место включения трансформатора. Когда обе пластины стоят вплотную и зазор между ними  $L$  равен нулю, то трансформатор не обладает трансформирующими свойствами, как и любая полуволновая линия. Когда расстояние  $L = (1/4)\lambda_B$ , то трансформирующие свойства максимальны. Отсюда наибольшее значение КСВ, при котором кварцевым трансформатором может быть достигнуто хорошее согласование, равно  $\text{КСВ}_{\max} = \epsilon_{\text{кв}}^2 = 3,8^2 = 15$ . Пластины раздвигаются от 0 до 18 мм (порядка  $0,5\lambda_B$ ), а обе пластины вместе перемещаются по волноводу от 0 до 40 мм (порядка  $\lambda_B$ ).

Другим видом узкополосного согласования является согласование при помощи реактивных элементов (диафрагм индуктивных и емкостных, а также штырей рис.1.6). При этом включение реактивных элементов должно быть в том сечении, где активное сопротивление равно волновому.

Так как в этом сечении реактивное сопротивление не равно нулю, то его компенсируют реактивностью элемента противоположного знака. Место включения реактивности обычно находится в стадии разработки макета.

В качестве широкополосных согласующих устройств используются экспоненциальные трансформаторы с волновым сопротивлением  $\rho$ , меняющимся вдоль длины линии (рис.1.7). Широкополосное согласование комплексных нагрузок реактивным

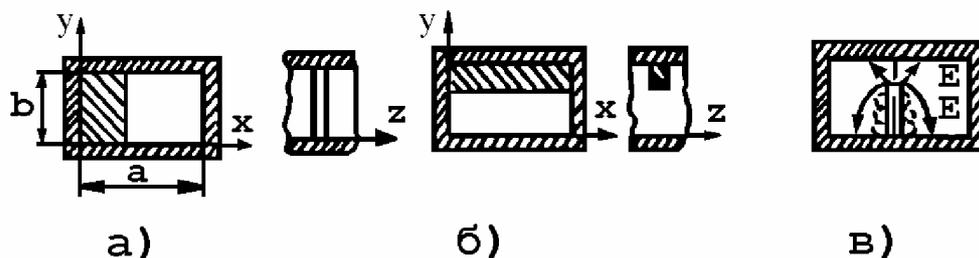


Рис.1.6. Реактивные согласующие элементы в виде :  
а) индуктивной и б) емкостной диафрагм, в) емкостного штыря

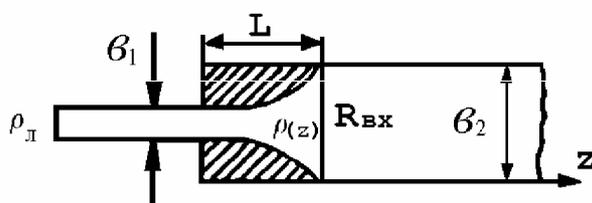


Рис.1.7. Широкополосное согласующее устройство в виде экспоненциального трансформатора с волновым сопротивлением, меняющимся по закону:

$$\rho(z) = \sqrt{\rho_L \cdot R_{\text{ВХ}}} \cdot \exp \left[ \left( \frac{z}{L} \right) \cdot \ln \left( \frac{\rho_L}{R_{\text{ВХ}}} \right) \right]$$

Коэффициент отражения  $|\dot{\Gamma}|$  при  $(L/\lambda) > 0,5$  не более, чем

$$|\dot{\Gamma}| \leq 0,1 \cdot \left| \ln \left( \frac{\rho_L}{R_{\text{ВХ}}} \right) \right|$$

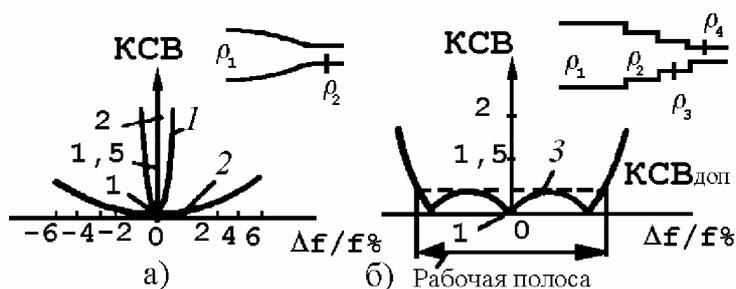


Рис.1.8. Сравнение зависимостей КСВ от частоты при узкополосном согласовании (кривая 1) и широкополосном согласовании :  
максимально плоском (кривая 2) и при Чебышевском ступенчатом переходе (кривая 3)

сопротивлением должно производиться с числом степеней свободы подстройки более двух. Такое согласование может быть реализовано в виде максимально плоского (с плавным переходом рис.1.8,а), когда к краям полосы КСВ плавно растет до допустимого значения.

Вторым типом широкополосного согласования являются переходы Чебышевского типа (со ступенчатым переходом рис.1.8,б), когда при заданном допуске на согласование ( $K_{СВ_{\max}} \leq K_{СВ_{\text{доп}}}$ ) имеет место оптимальное соотношение между полосой согласования и длиной перехода.

Плавный переход носит название биномиального и может рассматриваться как предельный случай ступенчатых переходов при неограниченном возрастании числа ступенек и стремлении длины каждой из них к нулю.

Во всех случаях согласующее устройство следует включать, возможно, ближе к согласуемой нагрузке, с тем, чтобы режим бегущей волны существовал на возможно большей длине линии передачи.

### 1.3. Экспериментальная часть

#### 1.3.1. Описание установки и ее схема

Установка для проведения эксперимента (рис.1.9) состоит из генератора 1 с эталонным аттенуатором 2, вентиля или аттенуатора 3, волноводной линии передачи 4, измерительной линии 5 с детекторной головкой 6, с которой сигнал поступает на усилитель с индикатором 7. На конце линии включаются различные функциональные элементы 8.

В первом эксперименте при измерении длины волны в волноводе этим функциональным элементом служит закорачивающая волновод пластина, во втором эксперименте - несогласованная нагрузка; в третьем эксперименте - согласующий кварцевый трансформатор и последовательно с ним включенная на его конце несогласованная нагрузка.

#### 1.3.2. Порядок выполнения эксперимента и содержание отчета

I. Установить заданную частоту генератора (см. п. 1. Генератор сигналов высокочастотный Г4-83 в Приложении “Измерительная аппаратура”), которая затем переводится в длину волны генератора  $\lambda_{\text{ген}}$ . Согласно (1.7) рассчитывается длина волны в волноводе  $\lambda_{\text{в}}$  в диапазоне длин волн  $\lambda_{\text{ген}} = 2,5$  см до 3,8 см при ширине волновода  $a = 2,3$  см ( $\lambda_{\text{кр}}$  рассчитывается по (1.6) с учетом того, что используется волна  $H_{10}$ ). Измерение длины волны в волноводе производится в режиме стоячей волны, для чего на конце измерительной линии подключается закорачивающая пластина. Затем измерительная линия настраивается (см п. 2. Измерительная линия в Приложении “Измерительная аппаратура”). Измеряется расстояние между двумя ближайшими узлами поля и это расстояние удваивается

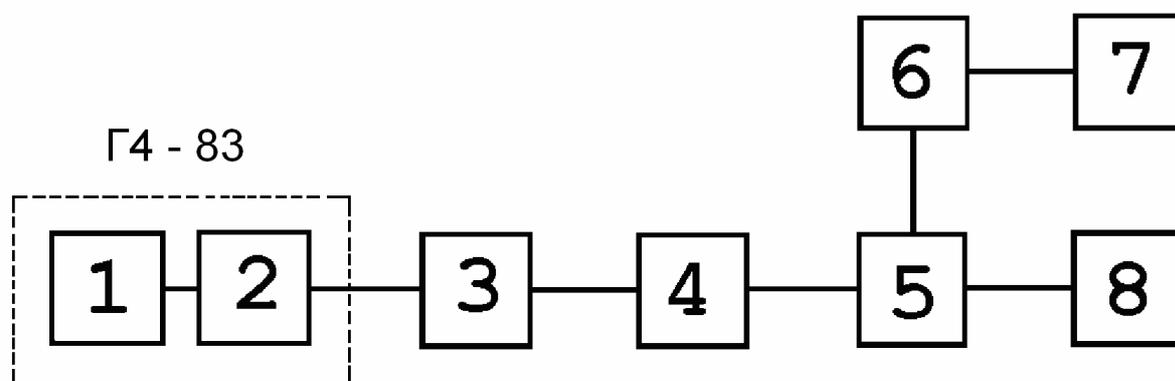


Рис.1.9. Функциональная схема установки:

- 1 - генератор с эталонным аттенуатором - 2;
- 3 - вентиль или аттенуатор;
- 4 - волноводная линия передачи;
- 5 - измерительная линия;
- 6 - детекторная головка;
- 7 - усилитель с индикатором;
- 8 - исследуемый элемент.

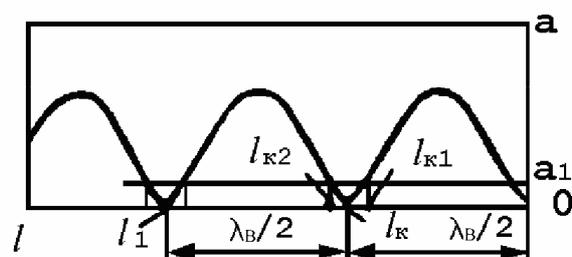


Рис. 1.10. Метод "вилки"

( $\lambda_{\text{в}} = 2(l_1 - l_k)$ , рис.1.10). Узел находится методом "вилки" (метод двух измерений). Фиксируются два положения зонда измерительной линии  $l_{k1}$  и  $l_{k2}$  (рис.1.10), для которых показания индикатора усилителя  $a_1$  отличаются от нуля и одинаковы. Положение узла определяется как среднее  $l_k = (l_{k1} + l_{k2})/2$ . При этом с уменьшением показаний индикатора надо увеличивать его чувствительность путем уменьшения вносимых аттенуатором потерь. Экспериментальная точка наносится на построенную теоретическую кривую ( $\lambda_{\text{в}} = f(\lambda_{\text{ген}})$ ). Экспериментальных точек должно быть не менее трех. С переходом с одной частоты на другую (с разносом более 100 МГц) не забывать настраивать измерительную линию.

Фазовая и групповая скорости в волноводе в зависимости от  $\lambda_{\text{ген}}$  рассчитываются по формулам (1.8) и (1.9). Эти зависимости изображаются на отдельном графике.

2. Измерение нормированного сопротивления нагрузки требует измерения трех величин: длины волны в волноводе, КСВ и смещения узла электрического поля при переходе от режима короткого замыкания на конце измерительной линии к режиму, когда на конце включена измеряемая нагрузка. Формула для расчета комплексного нормированного сопротивления следующая

$$z_{\text{н}}' = \frac{z_{\text{вх}}}{\rho} = \frac{\text{КСВ} \left[ 1 + \text{tg}^2(K_Z \cdot \Delta Z) \right] - j \cdot (\text{КСВ}^2 - 1) \cdot \text{tg}(K_Z \cdot \Delta Z)}{\text{КСВ}^2 + \text{tg}^2(K_Z \cdot \Delta Z)} \quad (1.12)$$

Смещение  $\Delta Z$  в сторону генератора считается положительной величиной, а в противоположном направлении - отрицательной величиной; коэффициент фазы в волноводе  $K_Z = 2\pi/\lambda_{\text{в}}$ .

Измерение КСВ производится по отношению величин поля в пучности ( $E_{\text{макс}}$ ) к полю в его минимуме ( $E_{\text{мин}}$ ). Чтобы измерения не зависели от нелинейности характеристики детектора, предлагается измерять КСВ в дБ (т.е. находить  $20 \lg \text{КСВ}$ , дБ) путем измерения затухания, вносимого эталонным аттенуатором так, чтобы рабочая точка на характеристике детектора не смещалась при переходе от максимума поля к минимуму. При этом показания на индикаторе усилителя остаются постоянными. По разности этих двух показаний аттенуатора находится КСВ, дБ. Затем это значение переводится в КСВ (в раз).

Такой метод измерения КСВ дает лучшую точность, так как при большой разнице в величинах  $E_{\text{макс}}$  и  $E_{\text{мин}}$  характеристику детектора нельзя аппроксимировать ни квадратичным ни линейным законом.

3. Согласование нагрузки с линией передачи производится при помощи кварцевого согласующего трансформатора ( рис.1.5 ). Винт 2 позволяет перемещать кварцевые четвертьволновые пластины друг относительно друга, т.е. менять расстояние  $L$ , а винт 5 перемещает обе пластины одновременно, не меняя при этом расстояния  $L$ .

В качестве несогласованной нагрузки используется "эквивалент антенны" при неточном сопряжении волноводных фланцев: при взаимном повороте их на  $4-5^\circ$  или параллельном их сдвиге на 3-4 мм.

Согласующий трансформатор подключается к концу измерительной линии, а на конце трансформатора подключается согласованная нагрузка в виде "эквивалента антенны" и добиваются с ней того же значения КСВ, который был получен в предыдущем измерении при несогласованной нагрузке на конце линии. Затем согласованная нагрузка отключается и подсоединяется несогласованная нагрузка. Медленным вращением винта 5 (перемещением обеих кварцевых пластин совместно) настраивается нужная фаза коэффициента отражения. При этом добиваются минимального КСВ. Затем вращается винт 2. При этом снова добиваются минимального КСВ.

Согласование можно считать окончанным, если значение КСВ получено 1,1-1,2. Показания шкал трансформатора и КСВ записываются.

Оформление отчета и его содержание должны отвечать общим требованиям к отчетам, изложенным во вводных указаниях.

#### 1.4. Контрольные вопросы

1. Какие типы волн могут существовать в волноводе и в каком смысле мы называем их независимыми? 2. На что указывают цифры индексов в названии типа волны? 3. Что понимается под дифференциальным волновым сопротивлением? Что следует из того, что величина его действительная? мнимая? комплексная? Чему при этом равен усредненный за период вектор Пойнтинга? 4. Какие режимы могут быть в волноводе и условия их возникновения? 5. Запишите выражения для поля бегущей волны. 6. Что называется коэффициентом фазы? коэффициентом затухания? 7. От чего зависит критическая частота данного типа волны в волноводе? У какого типа волны  $\omega_{кр}$  наименьшая? Что понимается под  $\lambda_{кр}$ ? 8. Что понимается под фронтом волны? под фазовой скоростью? групповой скоростью? длиной волны в волноводе? 9. Нарисуйте графики зависимости  $v_{ф}$ ,  $v_{гр}$  и  $\lambda_{в}$  от частоты. 10. Чем хорош одноволновый режим и какая волна допускает его? Как выбрать для этого поперечные размеры волновода? 11. Как изменятся размеры "а" и "б", если допустить работу в докритическом режиме с волной высшего типа? 12. Зачем вводится понятие нормированной к волновому сопротивлению нагрузки?

13. Зачем надо согласовывать линию передачи и какие нежелательные явления сопровождают плохое согласование? 14. Что понимается под к.п.д. линии и чему он равен? 15. Что понимается под узкополосным и широкополосным согласованием? 16. Какая цель ставится при широкополосном согласовании? Какие виды этого типа согласования Вам известны? 17. Как работает  $(1/4)\lambda_v$  трансформатор? Чему должно быть равно его волновое сопротивление? Как его надо включать в линии? 18. Как устроен кварцевый согласующий трансформатор? Зачем нужны две степени свободы его настройки? Чему равно максимальное значение КСВ, при котором можно достичь хорошего согласования при помощи кварцевого трансформатора? Покажите, откуда это следует? 19. Как работают реактивные согласующие элементы и какие виды их Вам известны?

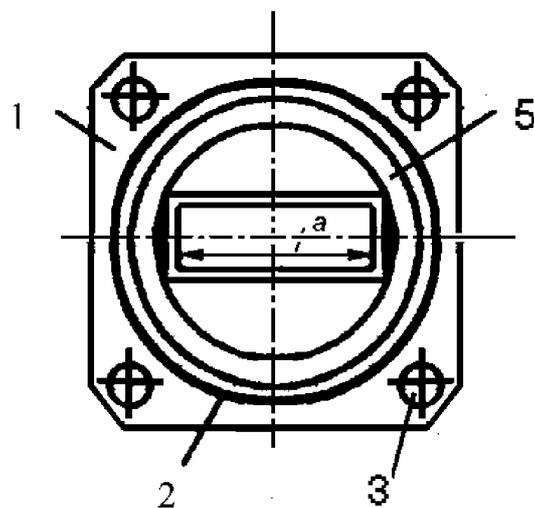
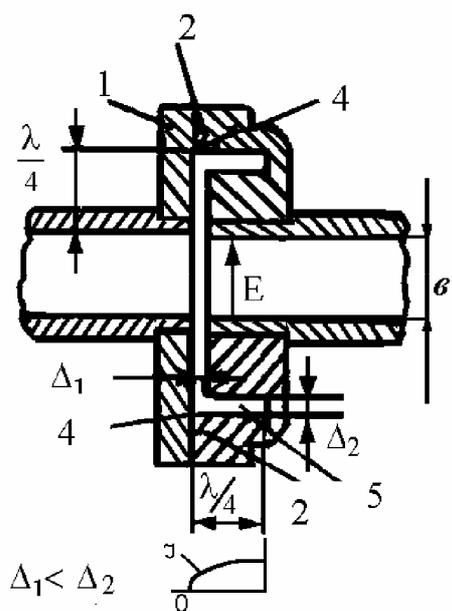
## **2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ЭЛЕМЕНТЫ ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА**

### **2.1. Цель работы**

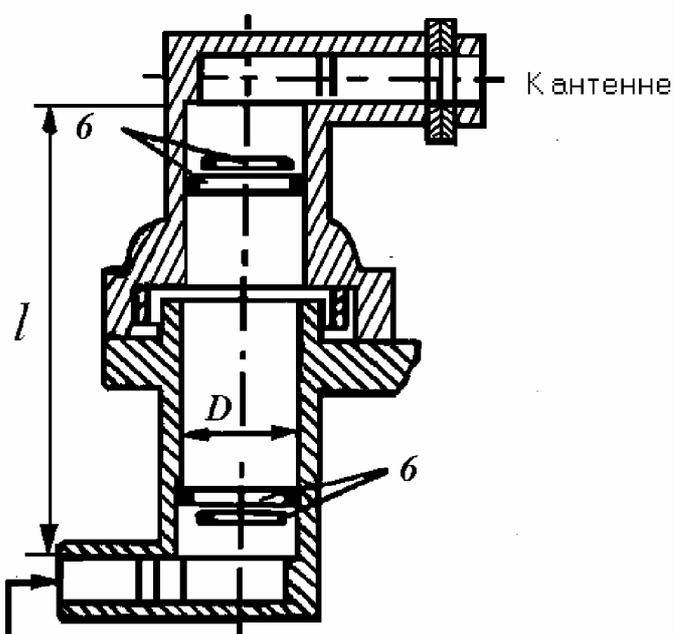
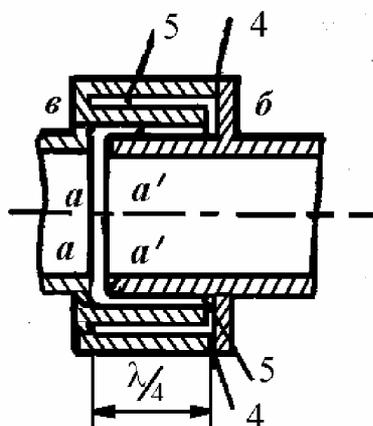
1. Исследование работы волноводного вращающегося сочленения.
2. Исследование работы направленного ответвителя.
3. Градуировка СВЧ аттенюатора.
4. Исследование работы двойного T-моста.

### **2.2. Краткие сведения из теории**

1. Сочленения волноводов ([5], раздел 13.4). При контактном сочленении волноводов к их концам припаиваются фланцы I (рис. 2.1,а). Качество электрического контакта в месте прилегания фланцев будет зависеть от чистоты механической обработки и параллельности контактирующих плоскостей. Для уменьшения потерь на излучение через щели между фланцами в канавку 2 вводится прокладка из неопрена или резины, а фланцы волноводов стягиваются винтами, пропущенными через отверстия 3. Для уменьшения тепловых потерь за счет плохого качества контактов, особенно при многократных сборках волноводов, используются дроссельные сочленения, которые выполняются так, чтобы механический контакт находился в том месте 4, где ток равен нулю. С этой целью в разрыв между двумя линиями (рис.2.1,а) включается изогнутая короткозамкнутая на конце полуволновая линия 5 (кольцевая канавка глубиной  $\lambda/4$ ). При этом между линиями обеспечивается короткое замыкание. С тем, чтобы величина сопротивления механического трущегося контакта 4 в разьеме не имела значения, его относят от короткозамкнутого конца с пучностью тока на  $1/4$  длины волны ( $\lambda/4$ ), т.е. в то место, где ток равен нулю.



а)



б)

Рис.2.1. Дроссельные сочленения волноводов: а) неподвижные и б) подвижные- вращающиеся

Этот же принцип положен в основу работы вращающихся сочленений двух прямоугольных волноводов (рис.2.1,б). В этих сочленениях применяются осесимметричные линии (коаксиальные или круглые волноводы) с азимутально симметричными волнами:  $E_{01}$ ,  $H_{01}$  (рис.2.2,а и 2.2,б) или волной  $T$  в коаксиальной линии.

Ввиду того, что эти волны в круглом волноводе не основные, то совместно с волной, например,  $E_{01}$  может возбуждаться основная волна  $H_{11}$  (рис.2.2,в) с более низкой величиной  $\omega_{кр}$ . Структура поля этой волны азимутально не симметрична и потому ее поле надо ослабить с тем, чтобы не возникла амплитудная модуляция сигнала в выходном волноводе с частотой вращения сочленения.

Для фильтрации волны  $H_{11}$  соответствующим образом выбирают длину  $l$  (рис.2.1, б) и диаметр  $D$  круглого волновода, так, чтобы на длине  $l$  укладывалось четное число четвертей длин волн в волноводе рабочей волны  $E_{01}$  и нечетное - волны  $H_{11}$ . Кроме того, ставят фильтрующие резонансные кольца  $\delta$  (рис.2.1,б), в которых волна  $H_{11}$  возбуждает большие резонансные токи и этим резко уменьшает свою амплитуду. При этом на поле волны  $E_{01}$  кольца не оказывают никакого влияния, так как периметр колец перпендикулярен ее электрическому полю.

2. Направленные ответвители ([2], раздел 17.6,17.7) и мосты представляют собой взаимные четырехплечные узлы. Если волна поступает в одно (любое) из плеч, а в остальных трех плечах включены согласованные нагрузки, то в идеальном случае, мощность делится между двумя плечами, а третья оказывается развязанным от входного - волна в него не поступает.

Направленные ответвители предназначены для отвода из основного волновода части мощности волны, распространяющейся в одном направлении.

В волноводном варианте (рис.2.3,а) направленный ответвитель представляет собой сдвоенный волновод с общей узкой стенкой. Связь между волноводами 1-2 и 3-4 осуществляется через два круглых отверстия, расположенных на расстоянии  $\lambda_v/4$ . Волна из волновода 1-2 возбуждает поле в волноводе 3-4, сдвинутое по фазе на  $\pi/2$ . В волноводе 3-4 поля в направлении плеча 4 складываются синфазно, а в направлении плеча 3 - противофазно. Таким образом, в плече 4 будет часть энергии волны падающей, бегущей слева направо, а плечо 3 (плечо слепое - закороченное с поглощающей нагрузкой) относительно 1-го будет развязано. В плечо 3 может поступать часть энергии волны отраженной, бегущей справа налево. При этом в плечо 4 волна не поступает.

Переходным затуханием направленного ответвителя  $S$  называют выраженное в децибеллах отношение мощности, поступающей во входное плечо 1, к мощности, ответвляемой в плечо 4 направленной связи

$$S = 10 \lg (P_1 / P_4) = \alpha_1 - \alpha_4, \text{ дБ.} \quad (2.1)$$

При работе с конечной полосой частот в развязанное плечо от падающей волны поступает некоторая мощность и количественно это явление характеризуется направленностью  $D$ , которая в децибеллах равна

$$D = 10 \lg (P_4 / P_3) = \alpha_4 - \alpha_3, \text{ дБ}, \quad (2.2)$$

где  $P_4$  мощность в плече направленной связи 4,  $P_3$  - мощность в развязанном плече 3. У идеального направленного ответвителя направленность равна бесконечности.

Если  $K_{z1} \neq \pi/2$ , то такой направленный ответвитель имеет направленность, величину которой можно оценить как

$$D = 20 \lg \left| \cos \left( \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_g} \cdot l \right) \right|^{-1}. \quad (2.3)$$

Если число отверстий больше двух, например,  $n + 1$ , то направленность может быть увеличена в  $n$  раз. Расстояния между отверстиями берутся одинаковые, а диаметры отверстий берутся разными. В метровом и дециметровом диапазонах волн направленные ответвители выполняются на базе коаксиальных или полосковых линий ([2], раздел 17.6)).

В радиоэлектронной аппаратуре направленные ответвители используются для индикации или измерения при известном значении переходного ослабления мощности падающей волны, поступающей целиком в нагрузку. Для измерения мощности отраженной волны плечи 3 и 4 должны поменяться местами. Когда необходимо измерить части обеих мощностей, например, для оценки согласования (КСВ) включают два направленных ответвителя с одинаковыми значениями  $S$  навстречу друг другу (рис.2.3,б).

3. Аттенюаторы или ослабители ([5], раздел 13.6) регулируют уровень мощности в линии передачи и необходимы в процессе настройки и измерения параметров различных элементов линии передачи, например, затуханий, вносимых элементами, развязки, ослабляющей связь между элементами и др.

Аттенюаторы бывают разных типов, например: 1) заградительные, ослабляющие сигнал по амплитуде за счет закритического режима в волноводе регулируемой длины (рис.2.4,а) и, следовательно, отражающих волну; 2) поглощающие аттенюаторы в волноводном варианте, представляющие собой отрезок волновода, в который вводится диэлектрическая пластинка 1 (рис.2.4,б), покрытая поглощающим слоем 2 (графита или нихрома). Концы пластины скошены для уменьшения отражения от ее концов. Плоскость пластины располагается параллельно электрическому полю, которое наводит в поглощающем слое ток, вызывающий тепловые потери, соответствующей волны. Регулировка потерь производится перемещением пластины вдоль широкой стенки волновода, т.е. в том направлении, в котором меняется напряженность электрического поля.

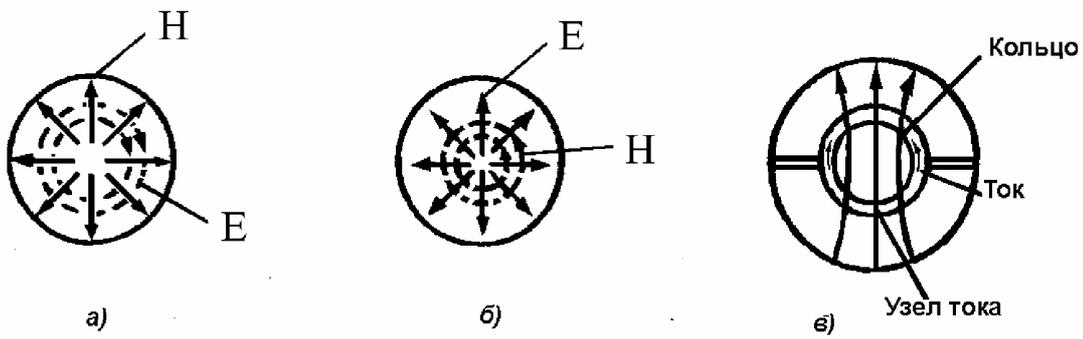


Рис.2.2. Структура полей E и H осесимметричных волн, используемых в волноводных вращающихся сочленениях: а) E<sub>01</sub>; б) H<sub>01</sub>; в) паразитной волны H<sub>11</sub>, подавляемой резонансными кольцами

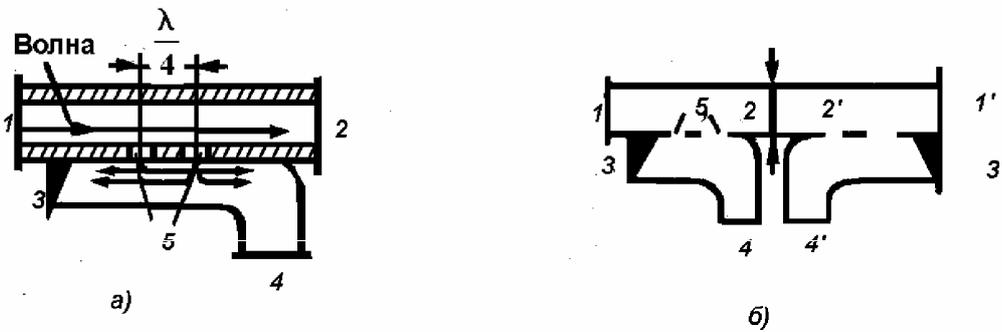


Рис. 2.3. Направленный ответвитель в виде 4-х полюсника: а) его конструкция в волноводном варианте исполнения; б) сдвоенный направленный ответвитель

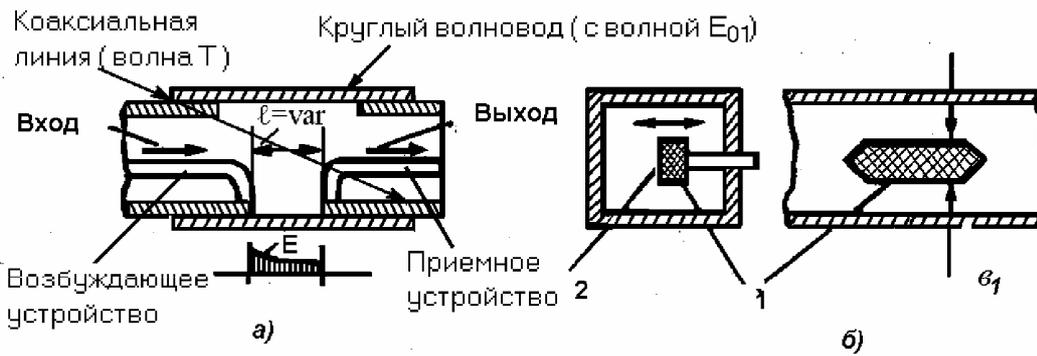


Рис. 2.4. а) запредельный аттенюатор  $\alpha = 8,68 \cdot 2\pi \cdot l / \lambda + \alpha_{нач}$  ( $\alpha_{нач}$  – начальное ослабление); б) поглощающий аттенюатор

4. К числу волноводных разветвителей (тройников ) относятся Н- и Е - тройники. Н-тройник (рис.2.5,а) представляет собой Т - образное разветвление волноводов в плоскости расположения магнитного поля волны  $H_{10}$ , работающих в одноволновом режиме. Примерная структура поля без учета полей волн высших типов, возникающих вблизи разветвления, при подаче энергии в плечо 1 и согласованных нагрузках в плечах 2 и 3 показана на рис.2.5, б. При этом в плечах 2 и 3 в противоположные стороны бегут волны  $H_{10}$ , у которых на одинаковых расстояниях от разветвления, векторы поля  $E$  (и  $H$ ) равны, но так, что поля  $E$  синфазны, а поля  $H$  - противофазны. При этом схемой замещения Н-тройника является параллельное соединение линий (рис.2.5,в). На одинаковых расстояниях от разветвления напряжения  $\dot{U}_2$  и  $\dot{U}_3$  равны и синфазны, а токи  $\dot{J}_2$  и  $\dot{J}_3$  равны, но противофазны.

Е-тройник (рис.2.6,а) представляет собой Т-образное разветвление волноводов в плоскости расположения поля  $E$  волны  $H_{10}$ . Примерная структура поля при подаче энергии в плечо 4 и согласованных плечах 2 и 3 показана на рис.2.6,б. В плечах 2 и 3 на одинаковых расстояниях от разветвления векторы поля  $E$  (и  $H$ ) равны, но поля  $E$  противофазны, а поля  $H$  синфазны. Схемой замещения Е-тройника является последовательное соединение линий (рис.2.6,в). На одинаковых расстояниях от разветвления напряжения в замещающих линиях 2 и 3 –  $\dot{U}_2$  и  $\dot{U}_3$  равны и противоположны по фазе, а токи  $\dot{J}_2$  и  $\dot{J}_3$  равны и синфазны.

5. Двойной Т-мост (или двойной волноводный тройник ([2], раздел 17.7) представляет собой два совмещенных Н - и Е-тройника (рис.2.7,а). При подаче мощности на вход 1 она делится поровну между плечами 2 и 3, которые по полю  $E$  возбуждаются в фазе (см. рис.2.5,б). На входе плеча 4 будет только продольное (для этого плеча) электрическое поле и, следовательно, в нем могут возбудиться только волны типа  $E$ , которые будут находиться в закритическом режиме и, следовательно, в плечо 4 энергия поля не попадает и оно оказывается развязанным относительно плеча 1.

При подаче мощности на вход 4 она делится поровну между плечами 2 и 3, которые по полю  $E$  возбуждаются в противофазе. При этом относительно продольной плоскости симметрии плеча 1 поле  $E$  будет противофазным (см. рис.2.6,б) и возбудиться там может только поле волны  $H_{20}$ , которая будет в закритическом режиме и поэтому энергия в плечо 1 не передается. Плечи 1 и 4 снова оказываются развязанными.

Отсюда следует, что при подаче одинаковых синфазных сигналов на вход плеча 1 и 4 на входе плеча 2 (или 3) сигнал будет отсутствовать, а вся мощность поступит в плечо 3 (или 2). Из принципа взаимности следует, что при подаче мощности на вход 2 (или 3) она поделится между плечами 1 и 4 (с синфазным полем  $E$  на одинаковых расстояниях от разветвления) и не попадет в плечо 3 (или 2). Плечи 2 и 3 оказываются развязанными.

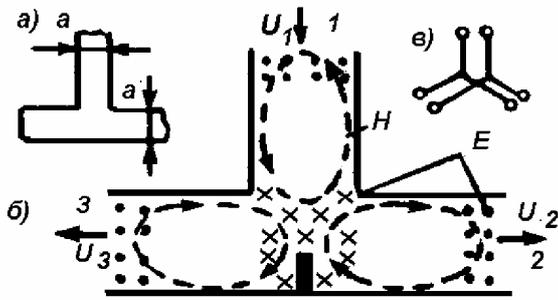


Рис.2.5. Волноводный Н- тройник

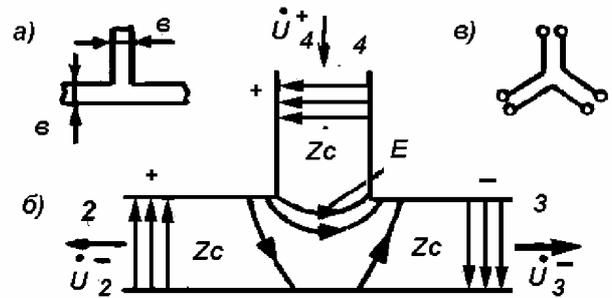


Рис.2.6. Волноводный Е- тройник

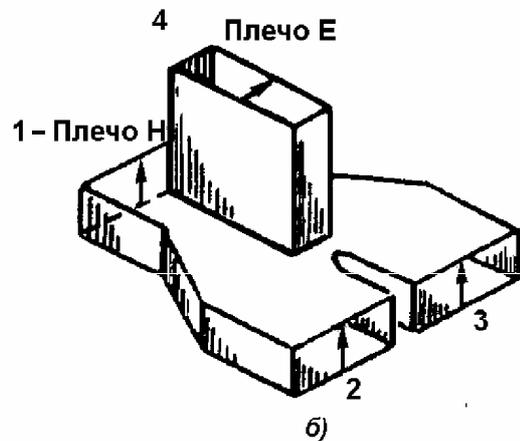
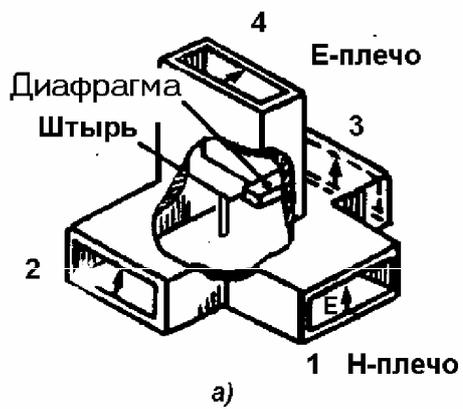


Рис.2.7. а) двойной Т- мост; б) модернизированный двойной Т- мост

Реальная развязка между плечами 1 и 4 составляет около 30-50 дБ при  $K_{СВ} \leq 1,2$  при полосе пропускания частот порядка 10 %.

Указанные свойства соблюдаются при полном согласовании плеч 1 и 4, для чего в конструкцию моста вводят согласующие устройства в виде индуктивной диафрагмы в плече 4 и емкостного штыря в плече 1 (см. рис. 2.7,а).

Некоторыми областями применения двойного Т-моста (и его модификации-модернизированного двойного Т-моста (рис.2.7,б) являются: 1) проходные фазовращатели на базе полупроводниковых щелевых модулей ; 2) схемы балансных смесителей СВЧ; 3) схемы сложения сигналов СВЧ на общей нагрузке (это применение позволяет реализовать частотное уплотнение трактов СВЧ, при котором один тракт используется одновременно для передачи нескольких сигналов разных частот) при выполнении условия согласования и развязки сигналов ( но при неизбежной потере мощности в поглощающей нагрузке ); 4) системы стабилизации частоты генераторов СВЧ; 5) схемы фазовых детекторов СВЧ; 6) делители СВЧ мощности на равные части без нарушения согласования.

## **2.3. Экспериментальная часть**

### **2.3.1. Описание установки и ее схема**

Установка для проведения эксперимента отличается от установки, показанной на рис.1.9 тем, что на выходе измерительной линии (ИЛ) элементом 8 будет служить: 1) согласованная нагрузка ; 2) вращающееся сочленение с согласованной детекторной секцией (ДС ) на конце; 3) направленный ответвитель, на выходе 2 которого включается согласованная нагрузка (СН), а на выход 4 - согласованная детекторная секция и наоборот (при измерении направленности сигнал подается на вход 2, а снимается с выхода 4); 4) детекторная секция, а градуируемым аттенуатором служит аттенуатор 3 (рис. 1.9); 5) двойной Т - мост. Во всех случаях, когда используется детекторная секция, то ее выход включается на вход усилителя - индикатора.

### **2.3.2. Порядок выполнения эксперимента и содержание отчета**

I. К концу ИЛ подсоединяется вращающееся волноводное сочленение , на подвижном конце которого включается согласованная детекторная секция. Поворачивая подвижную часть сочленения на  $360^\circ$ , надо убедиться, что коэффициент передачи с входа на выход почти не изменяется. Если наблюдаются отклонения, то следует взять разность максимального и минимального показаний индикатора усилителя и отнести ее к среднему значению и, помножив на 100, найти максимальный процент отклонения коэффициента передачи от среднего при вращении.

2. В качестве исследуемого элемента 8 к ИЛ входом 1 (рис. 2.3,а) подключается направленный волноводный ответвитель, на выход 2 которого подсоединяется согласованная нагрузка, а на выход 4 - детекторная секция (ДС). Выход с ДС подается на усилитель - индикатор. Регулировкой затухания, вносимого эталонным аттенюатором (ЭА), вмонтированным в генератор, стрелка индикаторного прибора устанавливается на любое деление шкалы, и значение показаний аттенюатора и индикатора записываются. Затем, предварительно вводя большое затухание ЭА, детекторная секция, и согласованная нагрузка меняются местами. После этого ЭА постепенно выводится до тех пор, пока на индикаторе не будет то же самое показание. Значение затухания, вводимого при этом ЭА, записывается. По разности значений показаний ЭА можно судить о величине переходного затухания "С" (согласно (2.1) ) в дБ. Для измерения направленности "D" направленный ответвитель подключается к измерительной линии входом 2, вводится большое затухание и к выходу 1 подключается детекторная секция, к выходу 4 - согласованная нагрузка. Постепенно выводя затухание ЭА, добиваются снова тех же показаний индикатора. Показания аттенюатора записываются, а затем детекторная секция и согласованная нагрузка меняются местами и снова при тех же условиях берется отсчет показаний ЭА. По разности значений показаний ЭА в двух случаях подключения детекторной секции к каналу 4 согласно (2.2) можно судить о направленности в дБ.

3. Для градуировки аттенюатора 3 (рис.1.9) вначале вводится большое затухание ЭА, а на конце измерительной линии включается детекторная секция. Градуируемый аттенюатор ставится на нулевое деление и постепенно выводится затухание ЭА до некоторого фиксированного показания индикатора. Показания шкал обоих аттенюаторов записываются. Затем ставится следующее деление (например, через 10 делений) на шкале градуируемого аттенюатора и снова ЭА выводится до старого показания на шкале индикатора. Производится замещение затуханий вводимых градуируемым и ЭА. Каждый раз надо брать разность значений начального и последующих затуханий вводимых ЭА. Заполняется градуировочная таблица, а затем рисуется график - "затухание" в дБ в зависимости от деления.

4. Для экспериментального изучения работы двойного Т-моста определяется развязка между каналами  $L_{ik}$  и переходное ослабление  $C_{ik}$  (см. табл. 2.1).

Под развязкой понимается отношение мощностей в проводящем  $P_{\text{пров}}$  и непроводящем  $P_{\text{непров}}$  каналах. Например, при подаче сигнала в плечо 1 может измеряться развязка между плечами 2 и 4 (или 3 и 4) , т.е.

$$L_{24} = 10 \lg \frac{P_{\text{пров}}}{P_{\text{непров}}} = 10 \lg \frac{P_{2(3)}}{P_4} = \alpha_{2(3)} - \alpha_4 \quad , \text{ дБ} \quad . \quad (2.4)$$

Измерения производятся известным Вам методом замещения с использованием эталонного аттенюатора (ЭА): детекторная секция устанавливается вначале на непроводящем канале, а на остальных - согласованные нагрузки. Эталонным аттенюатором добиваются любых достоверных показаний на шкале индикатора. Записываются показания ЭА  $\alpha_4$ . Затем вводится максимальное затухание ЭА и переключают детекторную секцию на один из проводящих каналов (на остальных - согласованные нагрузки) и добиваются ЭА тех же показаний на шкале индикатора. Записывается  $\alpha_2$ . Разность показаний эталонного аттенюатора в дБ будет равна развязке, выраженной в дБ. Перед детекторной секцией рекомендуется устанавливать вентиль, так как она не всегда оказывается хорошо согласованной.

Под переходным ослаблением  $S_{ik}$  понимается отношение мощности на входе  $P_{вх}$  к мощности на проводящем канале  $P_{пров}$ . Вначале детекторная секция устанавливается на проводящем канале (например 2), а затем непосредственно на выходе волновода, подключаемого к Т-мосту

$$S_{12} = 10 \lg \frac{P_{вх}}{P_{пров}} = 10 \lg \frac{P_1}{P_{2(3)}} = \alpha_1 - \alpha_{2(3)}, \text{ дБ.} \quad (2.5)$$

Предлагается измерить развязку  $L_{24}$  и  $L_{34}$  при подаче сигнала на вход 1, развязку  $L_{12}$  и  $L_{13}$  при подаче сигнала на вход 4,  $L_{34}$  и  $L_{31}$  при подаче сигнала на вход 2.

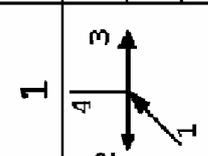
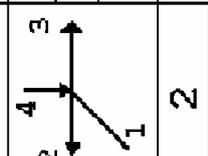
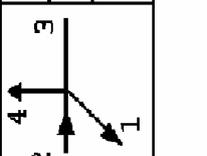
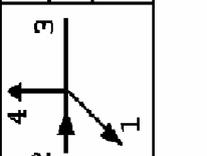
Переходное ослабление измеряется между каналами 1 и 2- $S_{12}$ , 1 и 3- $S_{13}$  при подаче сигнала в канал 1, между каналами 4 и 2 - $S_{42}$ , 4 и 1 -  $S_{41}$  при подаче сигнала в канал 4, а также  $S_{24}$  и  $S_{21}$  при подаче сигнала в канал 2.

В процессе эксперимента предлагается заполнить табл.2.1.

#### 2.4. Контрольные вопросы

1. На что сказывается в работе линий передачи плохое согласование?
2. Когда следует производить измерение КСВ с эталонным аттенюатором и в чем достоинство этого метода?
3. В каких случаях измерение КСВ можно с достаточной точностью производить по индикатору амплитуд?
4. Объясните принцип работы дроссельных сочленений подвижных и неподвижных.
5. С каким типом волны работает вращающееся сочленение на круглом волноводе и почему?
6. Зачем и как добиваются подавления основной волны  $H_{11}$  в этом сочленении?
7. Объясните принцип работы резонансных колец.
8. С какой целью и где используют вращающиеся сочленения?
9. Нарисуйте схему конструкции вращающегося сочленения.
10. Нарисуйте схему конструкции волноводного направленного ответвителя; ответвителя на коаксиальных линиях; на полосковых линиях.

Таблица 2.1

Входное плечо (рис 2.7, а)	Детекторная секция (ДС) на плече	Плечи, где стоит согласованные нагрузки	Показания ЭА в дБ при включении или ДС на входы	Постоянное значение деления на шкале индикатора	Развязка между каналами (проект. и непроект.), дБ (проект. каналом), дБ	Переходное ослабление (между вх и пров. каналом), дБ
	4	2 и 3	$\alpha_4 =$	$\Phi_{\text{инд}} = \text{const.}$  $\Phi = \dots \text{ дел.}$	$L_{24} = \alpha_2 - \alpha_4$  $L_{34} = \alpha_3 - \alpha_4$	$S_{\text{вх-2}} = \alpha_2 - \alpha_{\text{вх}}$  $S_{\text{вх-3}} = \alpha_3 - \alpha_{\text{вх}}$
	2	3 и 4	$\alpha_2 =$			
	3	2 и 4	$\alpha_3 =$			
	на входе	нет Т-моста	$\alpha_{\text{вх}} =$	$\Phi_{\text{инд}} = \text{const.}$  $\Phi = \dots \text{ дел.}$	$L_{21} = \alpha_2 - \alpha_1$  $L_{31} = \alpha_3 - \alpha_1$	$S_{\text{вх-2}} = \alpha_2 - \alpha_{\text{вх}}$  $S_{\text{вх-3}} = \alpha_3 - \alpha_{\text{вх}}$
	1	2 и 3	$\alpha_1 =$			
	2	3 и 1	$\alpha_2 =$			
	на входе	нет Т-моста	$\alpha_{\text{вх}} =$	$\Phi_{\text{инд}} = \text{const.}$  $\Phi = \dots \text{ дел.}$	$L_{43} = \alpha_4 - \alpha_3$  $L_{13} = \alpha_1 - \alpha_3$	$S_{\text{вх-4}} = \alpha_4 - \alpha_{\text{вх}}$  $S_{\text{вх-1}} = \alpha_1 - \alpha_{\text{вх}}$
	3	1 и 4	$\alpha_3 =$			
	4	3 и 1	$\alpha_4 =$			
	на входе	нет Т-моста	$\alpha_{\text{вх}} =$	$\Phi_{\text{инд}} = \text{const.}$  $\Phi = \dots \text{ дел.}$	$L_{43} = \alpha_4 - \alpha_3$  $L_{13} = \alpha_1 - \alpha_3$	$S_{\text{вх-4}} = \alpha_4 - \alpha_{\text{вх}}$  $S_{\text{вх-1}} = \alpha_1 - \alpha_{\text{вх}}$
	3	1 и 4	$\alpha_3 =$			
	1	3 и 4	$\alpha_1 =$			
	на входе	нет Т-моста	$\alpha_{\text{вх}} =$			

11. С какой целью используются направленные ответвители? 12. Каким методом расширяется их полоса пропускания? 13. Что понимается под направленностью и переходным ослаблением в направленном ответвителе? 14. Какие виды конструкций аттенюаторов Вам известны? 15. Где их используют? 16. В чем отличие мостов от направленных ответвителей? 17. Опишите порядок градуировки аттенюатора. 18. Как выбираются диаметр и длина вращающегося сочленения на круглом волноводе? 19. Нарисуйте схему замещения Н и Е - тройника. 20. Нарисуйте конструкцию двойного Т-моста. 21. Опишите, как он работает при подаче сигнала в разные плечи. 22. Как согласуется двойной Т-мост? 23. Где применяется двойной Т-мост?

### **3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**

#### **ВОЛНОВОДНЫЕ УСТРОЙСТВА, ПРИМЕНЯЮЩИЕ ПОДМАГНИЧЕННЫЕ ФЕРРИТЫ**

##### **3.1. Цель работы**

1. Изучение явлений, связанных с прохождением электромагнитной волны в подмагниченном феррите.
2. Изучение принципа работы и конструкций вентилях, циркуляторов и переключателей.
3. Измерение параметров вентилях, циркуляторов и волноводных переключателей.

##### **3.2. Краткие сведения из теории**

Для выполнения лабораторной работы достаточно изучить теоретический материал, изложенный в методических указаниях. Дополнительно можно рекомендовать [2] (разделы 18.1 - 18.4).

###### **3.2.1. Общие сведения**

Ферриты, представляющие собой ферромагнитные вещества, обладают высоким удельным сопротивлением и одновременно ярко выраженными магнитными свойствами. Их удельное сопротивление может изменяться в пределах  $10^2 - 10^6$  Ом·см и зависит от типа феррита. Тангенс угла диэлектрических потерь у них такой же, как и у хорошего диэлектрика  $10^{-3} - 10^{-4}$ . Относительная диэлектрическая проницаемость большинства ферритов примерно равна  $\epsilon = 10-15$ . Магнитная проницаемость ферритов без подмагничивающего поля является скалярной величиной. В общем случае она - комплексная. Для диапазона СВЧ действительная часть относительной магнитной проницаемости приблизительно равна единице. На низких частотах

(порядка 0,2-0,5 МГц) она может достигать величины в несколько тысяч. При подмагничивании постоянным полем магнитная проницаемость феррита для переменного электромагнитного поля становится тензорной величиной. Вследствие этого начинает проявляться явление анизотропии. Это значит, что свойства и параметры электромагнитной волны зависят от направления распространения ее в феррите. Это свойство анизотропии, как правило, придает ферриту постоянное подмагничивающее поле (от постоянного магнита или от соленоида с постоянным током).

Одно из проявлений анизотропии в феррите называется эффектом Фарадея, который возникает в продольно подмагниченном феррите (когда подмагничивающее поле направлено вдоль движения волны) при линейной поляризации поля.

Наиболее важные свойства ферритов, позволяющие использовать их для создания вентилях, циркуляторов и т.д., связаны с гироскопическими свойствами магнитных моментов электронов. При отсутствии подмагничивающего поля элементарная частица феррита обладает собственной намагниченностью и собственным магнитным моментом. При помещении феррита в постоянное магнитное поле  $\mathbf{H}_0$ , направление которого не совпадает с направлением вектора намагниченности  $\mathbf{M}$ , вектор  $\mathbf{M}$  начинает прецессировать вокруг  $\mathbf{H}_0$  (рис.3.1,а). Из-за наличия в феррите потерь конец вектора  $\mathbf{M}$  движется по свертывающейся спирали. Прецессия происходит в направлении движения часовой стрелки, если смотреть по направлению постоянного магнитного поля  $\mathbf{H}_0$ . Примерно через 0,01 мкс прецессия прекращается, вектор  $\mathbf{M}$  устанавливается параллельно вектору  $\mathbf{H}_0$ . Частота свободной прецессии  $\omega_0$  зависит от величины  $\mathbf{H}_0$

$$\omega_0 = \gamma \cdot H_0,$$

где  $\gamma$  - гиромагнитное отношение.

Если перпендикулярно  $\mathbf{H}_0$  приложить переменное поле  $\mathbf{H}$ , то прецессия  $\mathbf{M}$  уже не будет затухающей. Возникает вынужденная прецессия, частота которой  $\omega$  совпадает с частотой переменного электромагнитного поля. При совпадении частот  $\omega$  и  $\omega_0$  наступает ферромагнитный резонанс. Для электромагнитного поля, у которого вектор  $\mathbf{H}$  имеет круговую поляризацию в плоскости, перпендикулярной  $\mathbf{H}_0$  (плоскость  $xy$ ), магнитная проницаемость становится скалярной величиной.

Как известно, линейно поляризованную волну можно представить как сумму двух волн одинаковых амплитуд с противоположными направлениями кругового вращения. На рис.3.1,б показаны законы, по которым изменяется действительная часть магнитной проницаемости  $\mu$  у волны правого кругового вращения  $\mu^+$  и у волны левого кругового вращения  $\mu^-$ . Область А называют областью Фарадея. Здесь магнитная проницаемость волны правого вращения  $\mu^+$

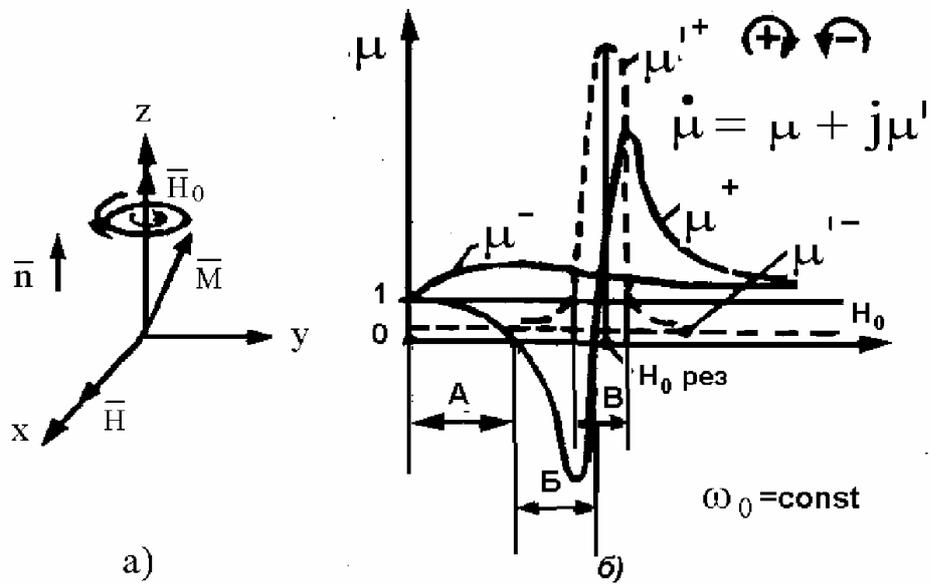


Рис. 3.1.

- а) прецессия вектора намагниченности  $\vec{M}$  в постоянном магнитном поле  $H_0$ ;  
 б) зависимость действительной  $\mu^\pm$  и мнимой  $\mu'^\pm$  частей магнитной проницаемости волн правого и левого вращения от постоянного подмагничивающего поля  $H_0$ .

имеет меньшее значение, чем магнитная проницаемость  $\mu^-$  - у волны левого вращения и, следовательно, коэффициент фазы у нее меньше ( $K_Z^+ < K_Z^-$ ), а фазовая скорость больше ( $v_\phi^+ > v_\phi^-$ ). Отсюда следует (рис.3.2), что волна с полем линейной поляризации вектора  $E_\Sigma$ , которую можно представить в виде суммы двух волн противоположного кругового вращения  $E^+$  и  $E^-$  с равными амплитудами, будет иметь разный поворот плоскости поляризации в разных поперечных сечениях, например, при  $z=0$  ( $E_{\Sigma 1}$ ) и при  $z=z_1$  ( $E_{\Sigma 2}$ ). Это происходит потому, что запаздывание волн правой и левой, например, при  $z=z_1$  будет разным: волна правой круговой поляризации имеет  $K_Z^+ = \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a^+}$  меньше, чем  $K_Z$  у волны левого вращения ( $K_Z^- = \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a^-}$ ) и, следовательно, у правой волны фазовая скорость  $v_\phi^+ = \omega / K_Z^+$  больше, чем у левой  $v_\phi^- = \omega / K_Z^-$ . Поэтому левая волна  $E_1^-$  (при  $z=z_1$ ) отстает по углу поворота больше от вектора  $E^-(z=0)$ , чем волна правая  $E_1^+$  от  $E^+(z=0)$ . Отсюда суммарный вектор  $E_{\Sigma 1}$  в сечении  $z_1$  поворачивается на некоторый угол  $\theta$  относительно  $E_\Sigma$  при  $z=0$ . Угол поворота плоскости поляризации на единице длины пробега волны называется постоянной Фарадея  $R$ . Эффект Фарадея заключается в повороте плоскости поляризации линейно поляризованной волны в продольно подмагниченном феррите.

Область Б характерна тем, что волна правого кругового вращения в феррите не может распространяться, так как коэффициент фазы у нее мнимый ( $\mu^+ < 0$ ), тогда как у левой волны  $\mu^- > 0$  и она может распространяться.

В области В имеет место явление ферромагнитного резонанса ( $\omega = \omega_0$ ), при котором при определенном значении постоянного подмагничивающего поля  $H_0$ , называемого резонансным  $H_{0\text{рез}}$ , волна правого кругового вращения резко поглощается ферритом, тогда как у волны левого вращения этого явления не обнаруживается. На это явление указывает резонансный характер кривой мнимой части магнитной проницаемости волны правого вращения  $\mu^{+}$ . Как известно, действительная часть магнитной проницаемости отвечает за магнитные свойства феррита, а мнимая часть - за потери. Ферромагнитный резонанс имеет место и при продольном и при поперечном подмагничивании.

В ферритах имеет место явление так называемой "точки Кюри" - это температура, при которой феррит теряет свои магнитные свойства. Выше этой температуры они также не восстанавливаются.

Еще одно явление, которое имеет место в поперечно подмагниченном феррите - это явление, которое получило название явления Коттона-Мутона, связанное с преобразованием вида поляризации волны по мере ее пробега поперек подмагничивающего поля.

Принято волну, у которой высокочастотное магнитное поле параллельно подмагничивающему полю  $H_0$ , называть "обыкновенной" волной (рис. 3.3), а

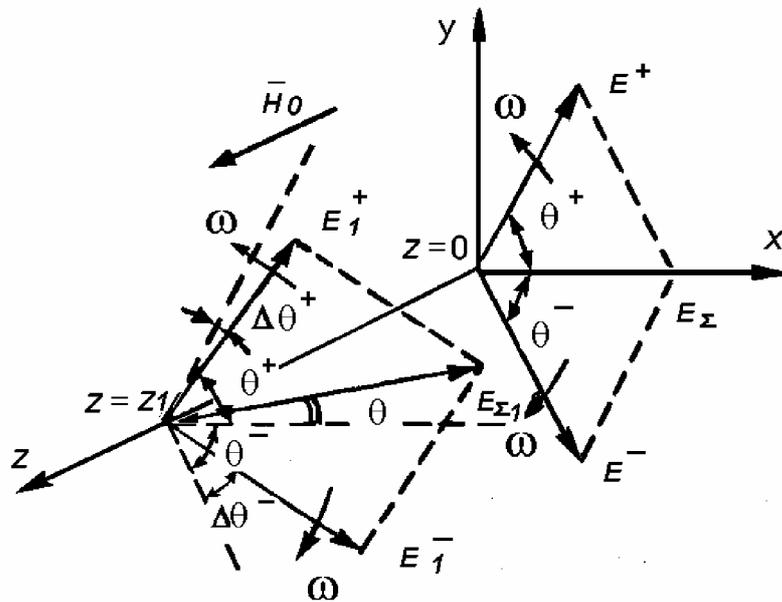


Рис. 3.2. Пояснения эффекта Фарадея в продольно подмагниченном феррите.  $E^+$  и  $E^-$  - поля волн правого и левого кругового вращения;  $E_z$  и  $E_{z1}$  - поля линейной поляризации;  $\theta$  - угол поворота плоскости поляризации

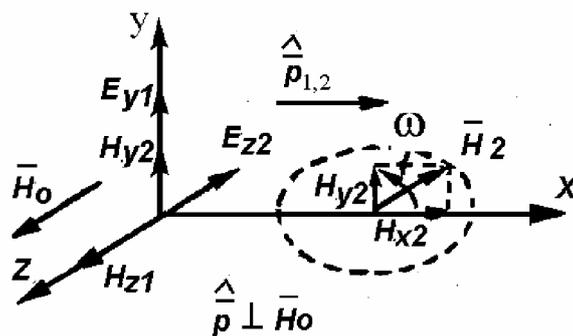


Рис.3.3. Пояснения эффекта Коттона-Мутона в поперечно-подмагниченном феррите.  $E_1$  и  $H_1$  - поля «обыкновенной» волны;  $E_2$  и  $H_2$  - поля «необыкновенной» волны;  $\hat{p}$  - усредненный вектор Пойнтинга

волну, у которой высокочастотное поле перпендикулярно  $H_0$  - “необыкновенной”. Таким образом, на рис. 3.4 поля  $H_1$  и  $E_1$  принадлежат плоской однородной волне, которая входя в феррит, остается “обыкновенной” волной, так как не меняет своих свойств - она остается линейно поляризованной плоской и однородной. Вторая волна (поля  $E_2$  и  $H_2$ ) по мере входа в феррит приобретает продольную составляющую магнитного поля  $H_{x2}$ , которая сдвинута по фазе относительно магнитного поля  $H_{y2}$  на  $90^\circ$ , и поэтому магнитное поле у “необыкновенной” волны приобретает эллиптическую поляризацию в продольной плоскости. Направление вращения у этого поля правое и, следовательно, “необыкновенная” волна испытывает явление резонансного поглощения. Поле  $E_2$  этой волны остается линейно поляризованным. Волны “обыкновенная”  $E_1$  и “необыкновенная”  $E_2$  линейной поляризации распространяются с разными фазовыми скоростями и, следовательно, по мере их пробега разность фаз между ними меняется. Последнее приводит к тому, что при малой разности фаз суммарное поле приобретает эллиптическую поляризацию с малой эллиптичностью, затем разность фаз растет и достигает  $90^\circ$ . При этом эллиптичность максимальна. (Напомним, что эллиптичность оценивается по отношению малой оси эллипса к большой). Затем по мере приближения разности фаз к  $180^\circ$  она снова падает. Ось эллипса поляризации при этом вращается, как это показано на рис. 3.4. При сдвиге фаз, равном  $180^\circ$ , поляризация поля делается снова линейной, но ортогональной исходной и т.д.

Все эти явления используются в специальных функциональных узлах СВЧ, выполненных как на волноводах, так и в коаксиальном и полосковом исполнении. Надо отметить, что использование ферритов на более низких частотах вызывает затруднения благодаря повышенному уровню потерь, связанному с низкочастотными резонансами, которые не имеют столь селективного характера как ферромагнитный резонанс, и распространяются на большую область значений подмагничивающего поля.

### 3.2.2. Принцип действия функциональных узлов

1. Принцип действия ферритовых вентиляей может быть основан на разных явлениях : ферромагнитного резонанса, явления смещения поля и эффекте Фарадея. Наиболее распространенными являются конструкции, использующие первые два явления.

Вентилем называется четырехполюсник, который в прямом направлении пропускает электромагнитную волну с малым затуханием, а в обратном - с большим затуханием.

Вентили можно использовать для устранения влияния нагрузки на работу генератора. При этом вентиль ставят на выходе генератора, питающего нагрузку через длинный волновод, что позволяет исключить в магнетронном

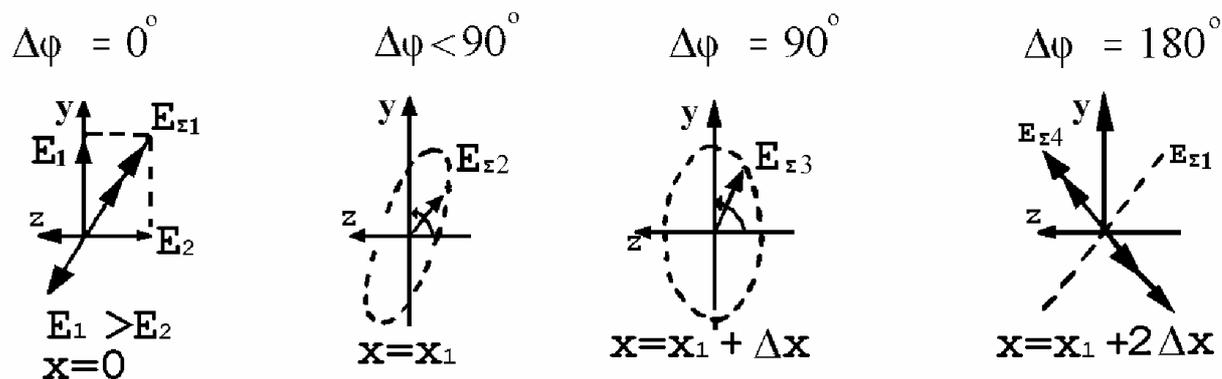


Рис.3.4. Изменение эллиптичности поля вектора  $E$  суммы волны "обыкновенной" и "необыкновенной" по мере их пробегания вдоль  $x$

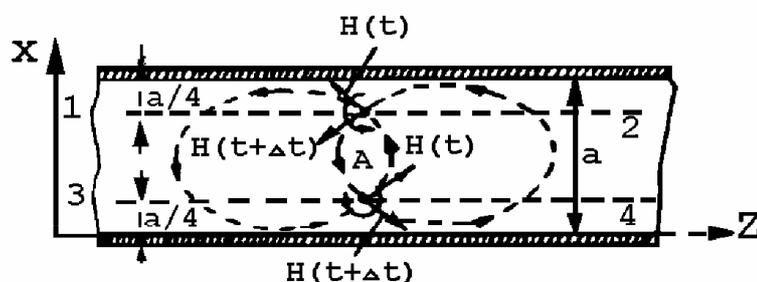


Рис.3.5. Пояснение эффекта вращения высокочастотного магнитного поля волны  $H_{10}$  в продольных плоскостях 1-2 и 3-4 ( $x=0.25a$  и  $x=0.75a$ ).  $H_1$  - соответствует времени  $t$ ;  $H_2$  - последующему моменту времени, если волна бежит направо

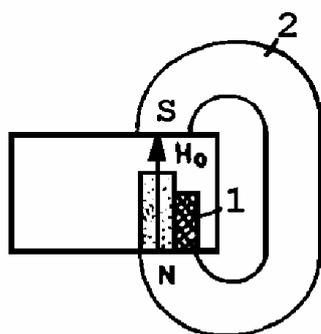


Рис.3.6. Резонансный вентиль

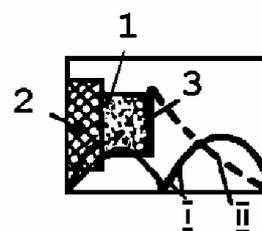


Рис.3.7. Вентиль на "смещении" поля ( $I$  - прямая волна,  $II$  - обратная)

генераторе "эффект длинной линии", связанный с затягиванием частоты магнетрона, при котором частота генерации магнетрона изменяется скачком. Вентили могут также использоваться для устранения волны, отраженной от нагрузки с тем, чтобы на большей части линии КСВ было мало. При этом вентиль ставят около нагрузки.

2. Принцип действия резонансного вентиля (рис. 3.6) основан на явлении ферромагнитного резонанса. Рассмотрим положение магнитных силовых линий волны  $H_{10}$  (рис.3.5) в разные моменты времени  $t$  и  $t + \Delta t$ , когда волна бежит слева направо. Как видно, в одной и той же точке  $A$  волновода в разные моменты времени вектор магнитного поля имеет разное направление касательной к силовой линии. Таким образом, магнитное поле, с одной стороны, от оси волновода имеет одно направление вращения, а с другой стороны - обратное. Где оно будет правым и где левым зависит от того, куда будет направлено поперечное подмагничивающее поле. Если поле  $H_0$  направлено от нас перпендикулярно рисунку, то внизу будет правое вращение, наверху - левое. Оказывается, что есть две продольные линии с координатой  $x = 0,25a$  и  $x = 0,75a$  (если  $\lambda = 0,7\lambda_{кр}$ ), где вращение становится круговым. Как это видно, из рис.3.5 при  $x = 0$  и  $x = a/2$  поляризация магнитного поля линейная: на оси волновода вертикальная, на краю - горизонтальная. Легко понять, что у волны отраженной направление вращения изменится на обратное, так как силовые линии поля  $H$  во времени поменяются местами. Если теперь в области, где имеет место круговая поляризация магнитного поля, поместить ферритовую пластину 1, то при наличии соответствующего подмагничивающего поля (2 - магнит), прямая волна с левым вращением высокочастотного магнитного поля будет испытывать небольшое ослабление, тогда как обратная волна с правым вращением будет сильно поглощаться ферритом. Обратное затухание у резонансных вентилях трехсантиметрового диапазона волн составляет 23-35 дБ, тогда как прямое не должно превышать 0,4-0,8 дБ при КБВ 0,95-0,83.

3. Вентиль на смещении поля использует различие в структуре поля прямой и обратной волн. На рис. 3.7 показана конструкция вентиля в поперечном сечении и кривая распределения вертикальной составляющей напряженности электрического поля  $E_y$  для прямой волны  $E_{пр}$  и обратной  $E_{обр}$ . В месте расположения поглощающей пленки 3 находится максимум поля  $E$  обратной волны и минимум поля  $E$  прямой волны. Поэтому затухание для обратной волны велико, тогда как для прямой - мало. Роль феррита 1 сводится не к поглощению высокочастотной энергии обратной волны, а в создании невзаимной структуры поля волн прямой и обратной.

По сравнению с резонансными вентилями вентили на смещении поля работают при меньшем значении подмагничивающего поля, а, следовательно, имеют меньше вес и габариты, чем резонансные вентили. Кроме того, величина

магнитного поля  $H_0$  не столь критична для его работы, поэтому они более широкополосны. К числу их недостатков следует отнести малый допустимый уровень мощности, который в сантиметровом диапазоне не превышает 7-10 кВт импульсной мощности.

Вентильное отношение у вентилях на смещении поля меньше так, что обратное затухание составляет всего 12-25 дБ, прямое 0,3-0,7 дБ при КБВ = 0,85-0,9.

4. Циркуляторы представляют собой многополюсник с тремя или четырьмя выходами, в котором соблюдается определенная последовательность передачи сигналов от входа к выходу: от первого ко второму, от второго к третьему и т.д.

Циркуляторы используются в качестве антенных переключателей, когда требуется обеспечить работу передатчика и приемника с одной антенной (рис.3.8,а). Они могут также использоваться в проходных фазовращателях и для разделения входной и выходной мощностей у параметрических усилителей, имеющих совмещенный вход и выход (рис. 3.8,б).

5. Поляризационный циркулятор в основе своей конструкции имеет круглый (или квадратный) волновод I (рис.3.9) с ферритовым стержнем 3, расположенным вдоль оси волновода и соленоидом 2, создающим продольное подмагничивающее поле. Феррит поляризационного циркулятора работает в области А - малых значений подмагничивающего поля (рис.3.1,б).

На входе и выходе круглый волновод переходит в прямоугольные волноводы I и II, сечения которых повернуты друг относительно друга на  $45^\circ$ . В переходных конусах 4 и 4' волна  $H_{10}$  при переходе из прямоугольного волновода в круглый преобразуется в волну  $H_{11}$  и наоборот. С круглым волноводом перпендикулярно его оси стыкуются еще два прямоугольных волновода III и IV, широкие стенки которых ориентированы в направлении продольной оси устройства. Продольная ось волновода III направлена перпендикулярно широкой стенке волновода I, а ось волновода IV - перпендикулярно широкой стенке волновода II, т.е. волноводы III и IV тоже взаимно повернуты на  $45^\circ$  друг относительно друга.

Толщина ферритового стержня подбирается из условия, чтобы в круглом волноводе возбуждалась волна  $H_{11}$  и не возбуждались волны высших типов.

Длина стержня и величина подмагничивающего поля подбираются из условия поворота плоскости поляризации волны  $H_{11}$  на выходном конце стержня на  $45^\circ$  относительно поляризации на входном конце.

Передача сигнала от входа I к выходу II происходит следующим образом. Волна  $H_{10}$  из волновода I переходит в круглый волновод и преобразуется в волну  $H_{11}$ . Последняя возбуждает в волноводе III волну  $E_{11}$ , которая находится в закритическом режиме и сигнал на вход III не проходит.

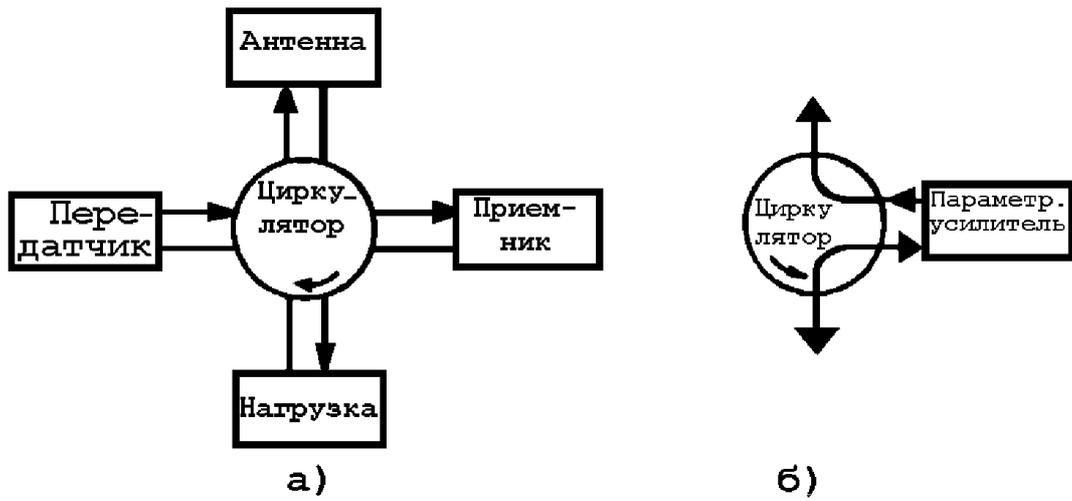


Рис.3.8 Примеры применения циркуляторов

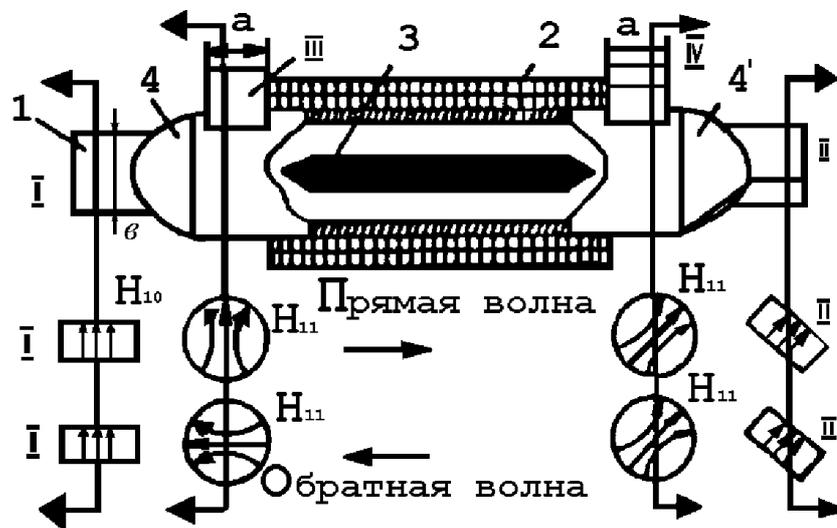


Рис.3.9 Поляризационный циркулятор

На отрезке круглого волновода с ферритом волна  $H_{11}$  поворачивает плоскость поляризации на  $45^\circ$  (благодаря эффекту Фарадея), проходит мимо волновода **IV** (поскольку условия его возбуждения аналогичны условиям для волновода **III**) и, преобразовавшись в волну  $H_{10}$ , попадает в волновод **II**.

При проходе отраженной волны из волновода **II** волна  $H_{10}$  трансформируется в волну  $H_{11}$ , проходит мимо волновода **IV** и на участке с ферритом поворачивает плоскость своей поляризации еще на  $45^\circ$ . Теперь плоскость поляризации волны  $H_{11}$  в области волновода **I** и **III** такова, что в волноводе **I** возбуждается волна  $H_{01}$  в закритическом режиме, а в волноводе **III** рабочая волна  $H_{10}$ . Легко убедиться, что порядок передачи сигнала от входа к выходу в рассматриваемом циркуляторе следующий: **I**→**II**→**III**→**IV**→**I**.

6. Фазовые циркуляторы обычно выполняются в двух конструктивных вариантах: с двумя щелевыми мостами или со щелевым мостом (1 на рис.3.10) и двойным Т-мостом (2 на рис.3.10). Около общей стенки сдвоенного волновода между мостами стоят две поперечно намагниченные ферритовые пластинки 3. Они создают невзаимный фазовый сдвиг  $90^\circ$  благодаря разным значениям коэффициентов фазы у прямой и обратной волн, что обусловлено, обратными направлениями вращения высокочастотного магнитного поля в области пластин.

В результате того, что в щелевом мосте при подаче сигнала на вход **I** благодаря противофазности возбуждения канала **III** волнами  $H_{10}$  и  $H_{20}$ , возникающими на протяжении  $L$  щели, на вход **III** сигнал не поступает. Волны  $H_{10}$  и  $H_{20}$ , распространяясь на протяжении щели, приобретают в ее конце сдвиг по фазе в  $90^\circ$  за счет различия их коэффициентов фазы (см.  $E_{H_{10}}$  и  $E_{H_{20}}$ ). В результате, в конце щели суммарные поля волн  $E_1$  и  $E_2$  имеют взаимный сдвиг по фазе  $90^\circ$ , а в сечениях А-А и В-В они синфазны и потому проходят в Н-плечо двойного Т-моста, т.е. в канал **II**.

Легко проследить, что последовательность передачи сигналов из канала в канал соответствует схеме: **I**→**II**→**III**→**IV**→**I**.

7. У (игрек) - циркуляторы выполняются на базе волноводного или полоскового разветвления с тремя каналами, повернутыми на  $120^\circ$  друг относительно друга в одной плоскости (рис.3.11). В центре разветвления размещается диэлектрическая втулка 1, ферритовый цилиндр 2, который намагничивается вдоль своей оси постоянным магнитом.

Принцип работы У-циркулятора заключается в следующем. Электромагнитная волна, поданная, например на вход **I** (рис. 3.11), разветвляется на две волны, огибающие феррит по и против часовой стрелки. Эти волны распространяются с разными фазовыми скоростями: одна из них бежит быстрее второй. Разница в скоростях позволяет путем подбора размеров циркулятора,

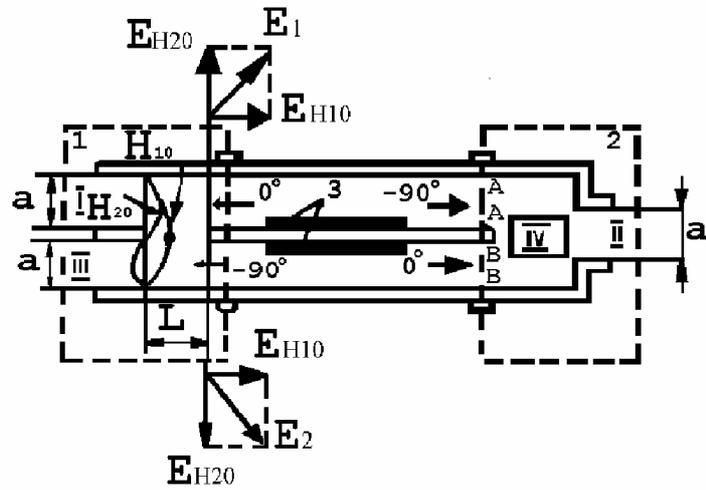


Рис.3.10. Фазовый циркулятор

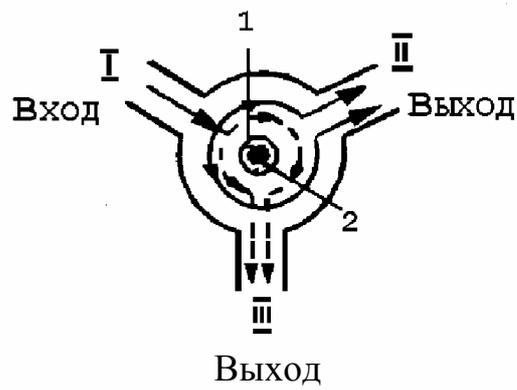


Рис.3.11. Y - циркулятор

параметров феррита и подмагничивающего поля сделать так, чтобы электрический путь (в числах длин волн) от входа **I** до выхода **II** быстрой волны, огибающей феррит против часовой стрелки, был бы равен электрическому пути медленной волны от входа **I** до выхода **II**, огибающей феррит по часовой стрелке. В результате на входе **II** поля волн сложатся в фазе, а на выходе **III** - в противофазе.

Развязка между каналами достигает 20-25 дБ при рабочей полосе частот 3-7%.

8. Коммутаторы, например, в виде переключателей могут быть выполнены с ферритовыми элементами, параметрами которых можно управлять изменением подмагничивающего поля  $H_0$ . Последнее регулируется изменением постоянного тока в обмотке соленоида.

Один из вариантов переключателя может быть реализован на базе поляризационного циркулятора, в котором переключение сигнала с выхода **IV** на выход **II** и наоборот, производится путем подачи в обмотку соленоида тока разного направления (или тока одного направления, но то в одну, то в другую обмотку подмагничивания, которые намотаны в противоположные стороны). В одном случае поворот плоскости поляризации производится на  $+45^\circ$ , в другом  $-45^\circ$  и потому согласно схеме, указанной на рис.3.9, передача сигнала будет производиться то во **II**-й, то в **IV**-й канал. Такие переключатели использованы в ДИСС. Развязка между каналами составляет 40-60 дБ.

Вращатель плоскости поляризации, использующий эффект Фарадея, может служить переключателем режимов работы, например, при получении двух взаимно перпендикулярных поляризаций поля - горизонтальной и вертикальной. Такой вращатель плоскости поляризации используется в бортовой РЛС "Гроза" для переключения режимов работы антенны с веерной на игольчатую диаграмму направленности (с режима "Земля" на режим "Метео").

### **3.3. Экспериментальная часть**

#### **3.3.1. Описание установки и ее схема**

Установка, схема которой показана на рис.1.9, предназначена для измерения параметров волноводных вентилях и циркуляторов, а также переключателя, конструкция которого выполнена на базе поляризационного циркулятора.

Экспериментальная установка соответствует схеме рис.1.9, с той только разницей, что исследуемым элементом в данной работе служат вентиль и циркулятор, на выходе которых подключается детекторная секция или согласованная нагрузка. В случае исследования работы переключателя

используется еще регулируемый источник постоянного тока, включаемый в обмотку катушки.

### 3.3.2 Порядок выполнения эксперимента и его методика

1. Измерение параметров вентиля. Основными параметрами вентиля, характеризующими его работу, являются:

1) обратное затухание

$$\alpha_{\text{обр}} = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{вх2}}}{P_{\text{вых1}}} \right) = \alpha_2 - \alpha_{\text{атт}} \text{ , дБ ;} \quad (3.1)$$

2) прямое затухание

$$\alpha_{\text{пр}} = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{вх1}}}{P_{\text{вых2}}} \right) = \alpha_1 - \alpha_{\text{атт}} \text{ , дБ ;} \quad (3.2)$$

3) вентиляльное отношение

$$V = \frac{\alpha_{\text{обр}}}{\alpha_{\text{пр}}} \text{ или } \alpha_{\text{обр}} - \alpha_{\text{пр}} \text{ , дБ ;} \quad (3.3)$$

4) коэффициент бегущей волны КБВ

$$20 \lg \text{КБВ} = 10 \lg \left( \frac{E_{\text{мин}}}{E_{\text{макс}}} \right) \text{ , дБ .} \quad (3.4)$$

В приведенных соотношениях  $P_{\text{вх1}}$  и  $P_{\text{вых2}}$ , мощность, подаваемая на вход вентиля и мощность на выходе при его прямом включении.

$P_{\text{вх2}}$  и  $P_{\text{вых1}}$  - мощность на входе и выходе при обратном включении вентиля.

Измерения параметров вентиля надо начинать с измерения обратного затухания. При этом направление стрелки на вентиле и направление движения сигнала от генератора противоположны. На выходе вентиля подсоединяется согласованная детекторная секция. Кабель от детекторной секции подключается к усилителю. Изменением затухания, вносимого эталонным аттенюатором, добиваются установки стрелки индикаторного прибора усилителя на любое деление его шкалы. Показание прибора и затухание, вносимое аттенюатором  $\alpha_{\text{атт}}$ , записываются. После этого затухание аттенюатора увеличивают до максимального, вентиль от тракта отключается, а к измерительной линии подключается детекторная секция. Постепенным уменьшением затухания от аттенюатора добиваются прежних показаний индикатора. Затухание от аттенюатора  $\alpha_1$  будет наибольшим, т.к. сигнал на вход детекторной секции поступает большой. Согласно (3.1) вычисляется  $\alpha_{\text{обр}}$ .

После этого производится прямое включение вентиля и аналогично производится измерение  $\alpha_{\text{пр}}$ .

Измерение КБВ производится согласно тому, как описано в работе №1

(с учетом, что КБВ = 1 / КСВ) при прямом включении вентиля и при согласованной нагрузке на его выходе.

2. Измерение параметров циркулятора. В циркуляторе каждая пара каналов представляет собой вентиль, у которого согласно предыдущему надо измерить прямое и обратное затухание, для чего необходимо произвести два измерения. Таких вентиляльных пар три. Кроме того, надо промерить затухание эталонного аттенюатора  $\alpha_1$  при включении детекторной секции непосредственно на вход измерительной линии. Во время всех измерений следует поддерживать аттенюатором неизменными показания индикатора. Всего делается 7 измерений. На свободный канал подключается согласованная нагрузка.

Можно ввести индексы у затухания, вносимого эталонным аттенюатором, по правилу: первый индекс отмечает номер входа, второй - выхода. Если индексы следуют кольцевой перестановке  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ , например  $\alpha_{12}$ ,  $\alpha_{23}$ ,  $\alpha_{31}$ , то прямые затухания у циркулятора будут равны

$$\alpha_{прi, i+1} = 10 \lg \left( \frac{P_{вхi}}{P_{выхi+1}} \right), \text{ дБ}, \quad (3.5)$$

так, что  $\alpha_{пр12} = \alpha_1 - \alpha_{12}$ ;  $\alpha_{пр23} = \alpha_1 - \alpha_{23}$ ;  $\alpha_{пр31} = \alpha_1 - \alpha_{31}$ . Обратные затухания соответственно равны

$\alpha_{обр21} = \alpha_1 - \alpha_{21}$ ;  $\alpha_{обр32} = \alpha_1 - \alpha_{32}$ ;  $\alpha_{обр13} = \alpha_1 - \alpha_{13}$ . Развязки между входами проводящим и непроводящем будут равны

$\alpha_{разв.23} = \alpha_{пр12} - \alpha_{обр13}$ ;  $\alpha_{разв13} = \alpha_{пр23} - \alpha_{обр21}$  и т. д.

Как видно, для нахождения развязок между каналами новые измерения делать не надо: они определяются из прямых и обратных затуханий.

Для сокращения времени эксперимента следует при включении сигнала, например, на вход 1 делать два измерения, меняя местами на входе 3 и 2 согласованную нагрузку и детекторную секцию. При этом измеряется  $\alpha_{12}$  и  $\alpha_{13}$ . Затем при подаче сигнала на вход 2-измеряется сразу  $\alpha_{23}$  и  $\alpha_{21}$  и т.д. Предлагается заполнить табл.3.1 измеренных величин затуханий, вносимых эталонным аттенюатором для поддержания постоянных значений показаний индикатора, и по этим значениям определить три прямых затухания, три обратных и три развязки между каналами.

Таблица 3.1

$\alpha_i$ , дБ	$\alpha_{12}$ , дБ	$\alpha_{13}$ , дБ	$\alpha_{21}$ , дБ	$\alpha_{23}$ , дБ	$\alpha_{31}$ , дБ	$\alpha_{32}$ , дБ

3. Измерение параметров переключателя производится при подключении его к выходу измерительной линии (см.рис.1.9). К каналу III (рис.3.9)

подключена согласованная поглощающая нагрузка. На выходах II и IV подключаются согласованная нагрузка и детекторная секция, которые меняются местами.

Производится измерение развязки между проводящим  $\alpha_{12}$  и непроводящим  $\alpha_{14}$  каналами при подаче сигнала на I вход путем изменения направления тока в обмотке соленоида. Производится 4 измерения, при которых находятся  $\alpha_{12}$  и  $\alpha_{14}$  при двух направлениях тока и вычисляются два значения развязки между каналами  $\alpha_{24} = |\alpha_{12} - \alpha_{14}|$ . Значение тока должно быть около 27,4 мА. Чтобы точнее определить ток, при котором развязка наибольшая, предлагается измерить  $\alpha_{12}$  и  $\alpha_{14}$  при нескольких, близких к указанному, значениях тока и найти ток наилучшей развязки.

Предлагается заполнить таблицу.

Таблица 3.2.

J $\alpha$	$J_1^+$	$J_1^-$	$J_2^+$	$J_2^-$	$J_3^+$	$J_3^-$	$J_4^+$	$J_4^-$	$J_5^+$	$J_5^-$
$\alpha_{14}$										
$\alpha_{12}$										
$\alpha_{24}$										

### 3.4. Контрольные вопросы

1. Почему на СВЧ непригодны проводящие магнитные материалы?
2. В чем проявляются свойства анизотропии ферритов?
3. Какая волна может считаться волной с линейной, круговой, эллиптической поляризацией?
4. Как можно представить эти волны в виде суммы волн линейной поляризации? круговой поляризации?
5. Нарисуйте график зависимости действительной и модуля мнимой части магнитной проницаемости волн правого и левого кругового вращения в зависимости от величины подмагничивающего поля.
6. Каковы условия для возникновения эффекта Фарадея и в чем он заключается? Объясните причину этого явления.
7. Какая волна называется "обыкновенной" и какая "необыкновенной"? Что происходит при их сложении?
8. В чем заключается явление ферромагнитного резонанса?
9. Какая температура называется "точкой Кюри"?
10. Принцип работы вентиля: резонансного, на смещении поля? Каковы их основные параметры?
11. Какое устройство называется циркулятором и каковы его основные параметры?
12. Принцип работы поляризационного циркулятора и его конструкция.
13. Принцип работы У-циркулятора. Его основные параметры.
14. Принцип работы фазового циркулятора.
15. Принцип работы электронного коммутатора, выполненного на основе поляризационного циркулятора. Его

основные параметры. 16. Дайте описание принципиальной схемы установки. 17. Порядок выполнения измерений параметров вентиля: прямого и обратного затухания, КБВ. 18. Порядок выполнения измерений параметров циркулятора: прямого затухания, обратного затухания, развязки между каналами. 19. Порядок измерения максимальной развязки между каналами переключателя.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Генератор сигналов высокочастотный Г4-83 – предназначен для регулировки и проверки радиоэлектронной аппаратуры в диапазоне рабочих частот от 7500 до 10500 МГц. Выполняет функции источника СВЧ сигнала, калиброванного по частоте, уровню выходной мощности и по параметрам импульсной модуляции. Он может использоваться для проверки чувствительности приемных устройств, измерения параметров четырехполосников, измерения динамического диапазона селективности приемных и анализирующих устройств, проверки полос пропускания трактов и приборов, проверки аттенуаторов, фильтров и других элементов тракта.

Генератор обеспечивает следующие виды работ:

- режим немодулированных колебаний (непрерывной генерации -НГ);
- внутреннюю и внешнюю амплитудно-импульсную модуляцию импульсами типа меандр;
- внешнюю амплитудно-импульсную модуляцию импульсами положительной и отрицательной полярности;
- внешнюю частотную модуляцию.

Генератор обеспечивает уровень мощности с разьема ВЫХОД, регулируемый в пределах от  $10^{-3}$  до  $10^{-15}$  Вт. С дополнительного разьема ВЫХОД mWI обеспечивается мощность не менее 50 дБ (от  $3 \cdot 10^{-3}$  до  $3 \cdot 10^{-8}$  Вт).

Принцип действия. Генератор состоит из следующих основных блоков: генератора СВЧ (на клистроне), модулятора, индикатора мощности и блока питания.

Генератор СВЧ является узлом прибора, определяющим его основные характеристики: диапазон частот, выходную мощность, качество импульсной модуляции. Генератор СВЧ имеет два регулируемых выхода сигнала: калиброванный ВЫХОД и не калиброванный выход мощности ВЫХОД mWI. Регулировка уровней мощности с выходов прибора ВЫХОД и ВЫХОД mWI осуществляется соответственно ручками, выведенными на переднюю панель.

Отсчет калиброванного уровня, проводится по счетчиковой шкале в дБ относительно уровня 1 Вт.

Последняя значащая цифра отсчетной шкалы 0,1 дБ. Генератор СВЧ имеет самоотсчетную счетчиковую шкалу частот. Последняя значащая цифра соответствует единицам МГц.

Индикатор мощности представляет самостоятельный блок и позволяет контролировать выходную мощность генератора в диапазоне от минус 43дБ до минус 22дБ относительно 1 Вт.

Встроенный индикатор мощности состоит из термоэлектрического преобразователя, усилителя постоянного тока и индикатора со шкалой, прокалиброванной в дБ.

Блок модулятора обеспечивает работу генератора в режиме импульсной модуляции. Импульсный режим работы генератора СВЧ осуществляется с помощью модулятора подачей модулирующих напряжений в цепь отражателя клистрона.

Порядок работы. Перед включением генератора рекомендуется установить аттенюатор в положение 40дБ, неиспользуемый выход нагрузить на согласованную нагрузку или закрыть заглушкой, при этом ручка установки выхода должна быть выведена.

Тумблер СЕТЬ ВКЛ. переключить в верхнее положение. При этом должна загореться сигнальная лампочка.

Прогреть генератор не менее 10 минут. Установить ручкой, связанной со шкалой МГц, требуемую частоту. Установить переключатель рода работ в положение НГ нажатием соответствующей кнопки (этот режим используется во всех лабораторных работах).

2. Измерительная линия предназначена для измерения коэффициента стоячей волны (КСВ) в устройствах, которые имеют вход на основе стандартных прямоугольных волноводов. Она представляет собой отрезок волновода с узкой щелью, прорезанной вдоль его оси. Через щель внутрь волновода помещен электрический зонд (штырь), соединенный с измерительной головкой и передвигаемый вдоль щели с помощью каретки (рис.П.1).

В процессе измерений, передвигая зонд, снимают картину распределения электрического поля вдоль линии. Перемещение зонда измерительной линии калибровано, и его положение отсчитывается с помощью специальной линейки или микрометрического устройства. Расстояние между двумя соседними минимумами (рис. П.1) равно половине длины волны, а отношение максимума к минимуму электрического поля определяет  $КСВ = E_{\max}/E_{\min}$ .

Измерительная головка состоит из резонатора и детектора. Энергия из волновода в резонатор отбирается зондом, глубина погружения в волновод которого регулируется специальным винтом. Настройка производится по наибольшему значению показаний индикаторного прибора усилителя.

Для уменьшения влияния зонда на режим работы линии резонатор настраивается в резонанс (по максимальному значению показаний индикаторного прибора усилителя). Энергия из резонатора поступает в детекторную секцию (встроенную), рабочим элементом которой является диод. С выхода встроенной детекторной секции низкочастотный сигнал (в случае модулированного по амплитуде СВЧ сигнала) или постоянное напряжение (при отсутствии модуляции) подается на усилитель.

3. Детекторная секция. Детекторы предназначены для преобразования (детектирования) модулированного радиосигнала в низкочастотный сигнал, который поступает на вход измерителя (усилителя). Детектирование основано на применении нелинейных устройств, функции которых на СВЧ выполняют полупроводниковые диоды. Конструкции детекторов, используемых на СВЧ, принято называть детекторными секциями (головками). Они представляют собой отрезок волновода (или коаксиальной линии), снабженной устройством для включения диода (рис.П.2). Детекторная секция согласуется с входной высокочастотной линией при помощи поршня. Выходная коаксиальная линия подсоединяется к усилителю и имеет блокировочный конденсатор (или высокочастотный дроссель) для предотвращения просачивания высокочастотной энергии в цепь постоянного тока. Держатель диода выполнен в виде закороченного на конце полуволнового коаксиального дросселя.

Для реализации более широкой полосы согласования высота волновода плавно уменьшается, т.е. волноводная детекторная секция, в этом случае представляет собой короткозамкнутый отрезок волновода с клином, расположенным на широкой стенке, и диодом, расположенным в коаксиальном волноводе (рис.П.3).

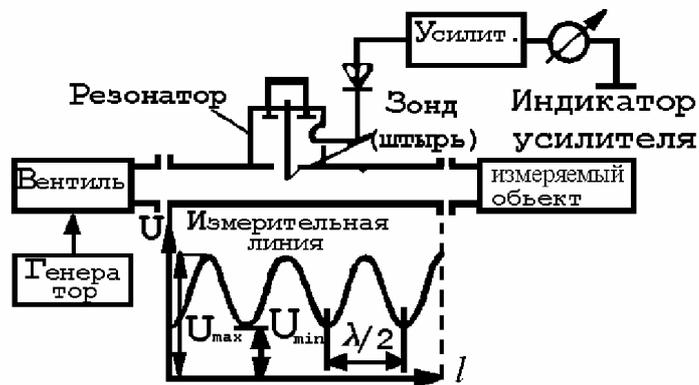


Рис.П.1. Функциональная схема измерительной линии и Расположение стоячей волны вдоль линии

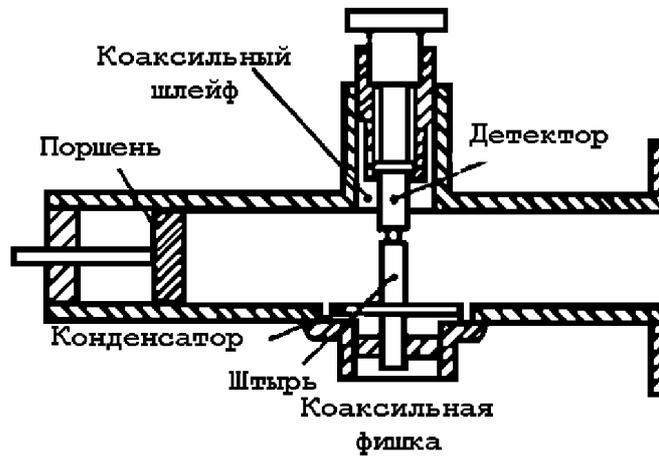


Рис.П.2. Волноводная детекторная секция

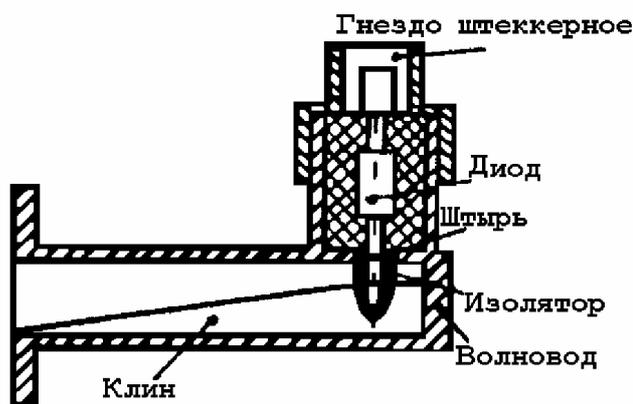


Рис.П.3. Волноводная детекторная секция (широкополосная)

Образец выполнения титульного листа отчета по  
лабораторной работе  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Кафедра радиотехнических устройств

Отчет защищен  
Преподаватель

---

(степень, звание, ф.и.о.)

---

(подпись, дата)

НАЗВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Отчет по лабораторной работе по дисциплине “Электродинамика и  
распространение радиоволн”

РС 02066. ЛР.01.00

Работу выполнил студент группы \_\_\_\_\_

---

(ф.и.о.)

---

(подпись, дата)

Москва – 20\_\_

## ЛИТЕРАТУРА

1. Яманов Д.Н. Основы электродинамики и распространение радиоволн. Часть 2: Тексты лекций. - М.: МГТУГА, 2005. - 100 с.
2. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ.- М.: Высшая школа, 1990.- 335 с.
3. Ильницкий Л.Я., Иванов В.А., Павленко В.Ф. Элементы и устройства сверхвысоких частот.- Киев: КИИ ГА, 1985.
4. Советов Н.А. Техника сверхвысоких частот. - М.: Высшая школа, 1976.
5. Семенов Н.А. Техническая электродинамика. - М.: Связь, 1973.-480 с.
6. Фальковский О.Н. Техническая электродинамика. -М.:Связь, 1978.-432с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВОДНЫЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	3
1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1	
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВОЛНОВОДНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ.....	4
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2	
ЭЛЕМЕНТЫ ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА.....	18
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3	
ВОЛНОВОДНЫЕ УСТРОЙСТВА, ПРИМЕНЯЮЩИЕ	
ПОДМАГНИЧЕННЫЕ ФЕРРИТЫ.....	29
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	45
ЛИТЕРАТУРА .....	50