

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Промышленная электроника»**

**Н. И. Вяхирев, А. А. Наумук**

## **УСТРОЙСТВА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ**

### **ПРАКТИКУМ**

**по одноименной дисциплине для студентов  
специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника»  
дневной формы обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2016**

УДК 621.385.69(075.8)  
ББК 32.840.4я73  
В99

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
факультета автоматизированных и информационных систем  
ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 4 от 24.11.2014 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Теоретические основы электротехники» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук, доц. *В. В. Кротенок*

**Вяхирев, Н. И.**

В99

Устройство сверхвысоких частот : практикум по одной дисциплине для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» днев. формы обучения / Н. И. Вяхирев, А. А. Наумук. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 85 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-296-0.

Предназначен для закрепления и получения знаний, требуемых в рамках учебной программы по предмету «Устройства сверхвысоких частот», на лабораторных занятиях и при самостоятельной работе.

Для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» дневной формы обучения.

УДК 621.385.69(075.8)  
ББК 32.840.4я73

ISBN 978-985-535-296-0

© Вяхирев Н. И., Наумук А. А., 2016  
© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2016

# Лабораторная работа № 1

## ПАНОРАМНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КСВ И ОСЛАБЛЕНИЙ

**Цель работы:** изучить назначение и принцип работы автоматического панорамного измерителя КСВ и ослаблений, приобрести практические навыки по калибровке прибора и проведению измерений с его помощью.

### 1.1. Описание панорамного измерителя КСВ и ослаблений

Панорамный измеритель предназначен для измерения КСВ и ослаблений в полосе частот с воспроизведением этих характеристик на экране осциллографического индикатора.

Общий вид лабораторной установки и ее структурная схема представлены на рис. 1.1 и 1.2, соответственно. В ее состав входят генератор качающейся частоты 1, индикаторный блок Я2Р-67 2, направленные ответвители (НО1) 3 и (НО2) 4 с детекторными секциями 5, сверхвысокочастотная (СВЧ) линия 6, коаксиальный переход 7, низкочастотные (НЧ) кабели 8, межблочный многожильный кабель 9, согласованная нагрузка 10, исследуемые рассогласованная нагрузка и аттенюатор 11.

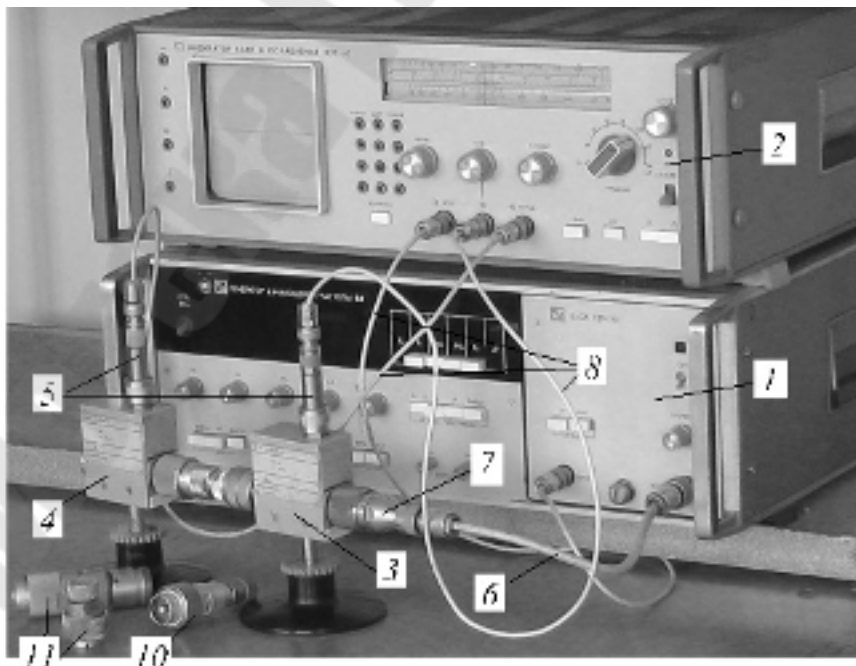


Рис. 1.1. Лабораторная установка

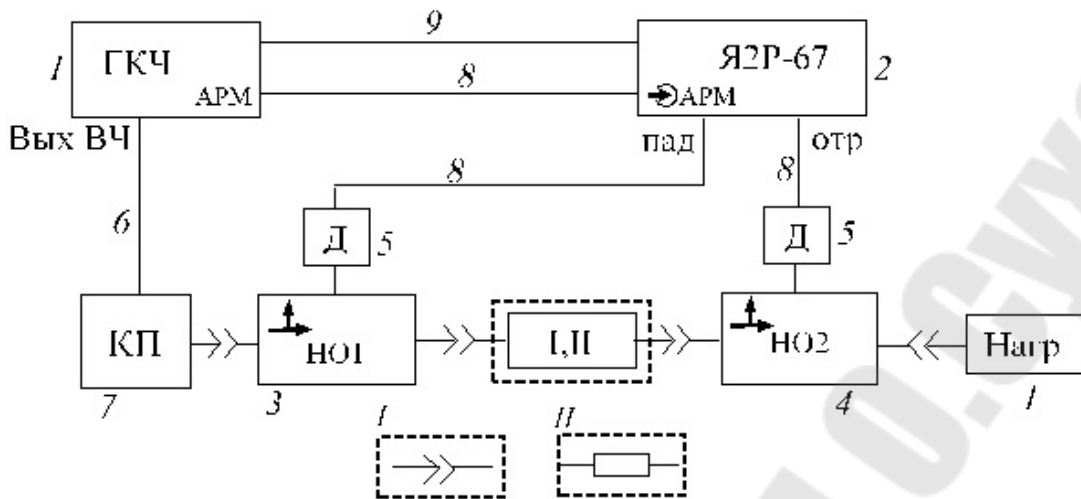


Рис. 1.2. Схема калибровки и измерения ослабления:  
 I – калибровка; II – измерение

Направленные ответвители, используемые в установке (рис. 1.3), конструктивно представляют собой два отрезка линии передачи с электромагнитной связью. Один конец вторичной линии передачи нагружен на детекторную секцию, а второй – на согласованное сопротивление. Входы I и 3 ответвителей являются развязанными.



Рис. 1.3. Нумерация входов и распределение мощности при возбуждении входа I в направленном ответвителе

Основными параметрами ответвителей являются КСВ входов, а также:

– переходное ослабление:

$$C_{14} = 10 \lg \frac{P_1}{P_4}; \quad (1.1)$$

– развязка:

$$C_{13} = 10 \lg \frac{P_1}{P_3}; \quad (1.2)$$

– направленность:

$$C_{43} = 10 \lg \frac{P_4}{P_3} = C_{13} - C_{14}; \quad (1.3)$$

– вносимые потери:

$$C_{12} = 10 \lg \frac{P_1}{P_2}. \quad (1.4)$$

В этих формулах обозначено:  $P_1$ – $P_4$  – мощности сигнала, соответственно, на 1–4-м выходах ответвителя.

В используемых измерителях КСВ и ослаблений направленные ответвители имеют переходное ослабление около 20 дБ, мощность сигнала на втором выходе (выходе основного канала) при этом всего на 1 % меньше мощности сигнала на входе. К выходу 4 направленного ответвителя подключается детекторная секция, которая реагирует на сигнал, распространяющийся в основной линии слева направо (по стрелке в обозначении ответвителя). На рис. 1.1 ответвитель 1, таким образом, реагирует на падающую волну.

В режиме калибровки прибора направленный ответвитель 1 соединяется с направленным ответвителем 2 непосредственно (через соединитель I). В режиме измерения ослаблений вместо соединителя I включается исследуемый элемент II. В режиме измерения КСВ после калибровки прибора направленный ответвитель 2 включается в обратном порядке непосредственно к направленному ответвителю I, исследуемый элемент включается вместо нагрузки.

Сигналы с выходов детекторных секций поступают на вход канала падающей волны и на вход канала отраженной (прошедшей) волны индикатора. Часть усиленного сигнала, пропорционального уровню падающей волны, ответвляется на разъем «АРМ» и через НЧ кабель подается на вход «АРМ» СВЧ блока генератора качающей частоты (ГКЧ), т. е. используется для стабилизации уровня падающей волны в полосе качания. Вторая часть сигнала, пропорциональная уровню падающей волны, используется в качестве опорного сигнала в синхродетекторе, на измерительный вход которого поступает сигнал, пропорциональный уровню отраженной (прошедшей) волны.

## 1.2. Домашнее задание

1. По данному методическому указанию и техническому описанию изучить принципы действия панорамного измерителя КСВ и ослаблений и правила работы с ним.

2. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить теоретический материал по теме лабораторной работы и ответить на контрольные вопросы.

3. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить принципы действия и характеристики коаксиальных согласованных нагрузок, аттенюаторов и направленных ответвителей.

### 1.3. Подготовка установки к работе

1. Соедините узлы СВЧ и блоки согласно структурной схеме, представленной на рис. 1.2, в которой направленные ответвители соединяются непосредственно. На выход направленного ответвителя 2 включите согласованную нагрузку. Включите индикатор и ГКЧ, дайте им прогреться в течение 15 мин.

2. Установите граничные частоты рабочего диапазона измерителя КСВ и ослаблений согласно табл. 1.1 или табл. 1.2. Для этого нажмите кнопку « $F_1$ » и ручкой « $F_1, F_0$ » по отсчетному устройству установите минимальную частоту рабочего диапазона  $f_{\text{мин}}$ ; нажмите кнопку « $F_2$ » и ручкой « $F_{2,\Delta F}$ » установите максимальную частоту рабочего диапазона  $f_{\text{макс}}$ .

Таблица 1.1

Исходные данные для группы ПС-41

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f_{\text{мин}}$ , ГГц	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	2,12
$f_{\text{макс}}$ , ГГц	3	3,15	3,3	3,45	3,6	3,75	4	3,12

Таблица 1.2

Исходные данные для группы ПС-42

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f_{\text{мин}}$ , ГГц	2,37	2,62	2,87	3,12	3,37	2	2	2
$f_{\text{макс}}$ , ГГц	3,17	3,42	3,5	3,65	3,87	3,3	3,7	4

3. Установите уровень мощности в канале падающей волны: установите переключатель «ПРЕДЕЛЫ» в положение «ПАД»; установите ручкой «ОТСЧЕТ» визир шкалы индикатора на отметку 2 мВ; совместите ручками «УРОВЕНЬ» и «ПАД» линию падающей мощности, наблюдаемой на экране индикатора, с линией электронного визира.

4. Проверьте наличие и пределы регулировки частотных меток: установите ручками «М1», «М2», «АМПЛИТУДА М1 М2» и «МЕТКА» частотные метки на экране индикатора; убедитесь, поворачивая поочередно ручки «АМПЛИТУДА М1, М2» и «МЕТКА», в возможности регулирования амплитуды меток в пределах 0–5 мм, после чего установите удобную для отсчета амплитуду (2–3 мм); совместите ручками «М1» и «М2» метки с началом и концом наблюдаемой на экране индикатора линии электронного визира.

5. Откалибруйте прибор в полосе частот: установите переключатель «ПРЕДЕЛЫ» в положение 0; установите ручкой «ОТСЧЕТ» визир на отметку 0 по верхней шкале дБ; совместите ручкой «КАЛИБР» наблюдаемую на экране линию калибровки с отсчетной линией так, чтобы отсчетная линия проходила посередине линии калибровки.

Измерьте неравномерность линии калибровки. Для этого ручкой «ОТСЧЕТ» совместите линию электронного визира с максимальным и минимальным отклонениями калибровки. Отклонения, отсчитанные по верхней шкале дБ индикатора, не должны превышать  $\pm 0,3$  дБ в рабочем диапазоне частот.

#### 1.4. Экспериментальное задание

1. Измерить в заданном диапазоне частот (табл. 1.1 или табл. 1.2) КСВ двух согласованных нагрузок. Для этого:

- откалибруйте прибор в соответствии с пп. 1–5;
- пересоедините направленный ответвитель 2 для измерения отраженной волны (п. 1.1) и подключите на выход измеряемый объект; установите переключателем «ВР. ПЕРЕСТРОЙКИ» период развертки 0,08;
- поставьте переключатель «ПРЕДЕЛЫ» так, чтобы кривая КСВ занимала на экране индикатора положение, удобное для наблюдения и измерения;
- совместите ручкой «ОТСЧЕТ» отсчетную линию на экране индикатора с интересующей точкой на кривой КСВ и по отсчетному устройству индикатора отсчитайте измеренное значение КСВ;
- для определения частоты, соответствующей интересующей точке наблюдаемой кривой КСВ, нажмите кнопку «М1», ручкой «М1» совместите частотную метку с этой точкой и по отсчетному устройству ГКЧ отсчитайте значение частоты;
- для двух нагрузок постройте в линейном масштабе зависимости КСВ от частоты с указанием характерных точек.

- Измерить в заданном диапазоне частот (табл. 1.1 или табл. 1.2) ослабление аттенюатора, соблюдая следующую последовательность:
- откалибруйте прибор в соответствии с пп. 1–5;
  - включите исследуемый аттенюатор между первым и вторым ответвителями;
  - установите переключателем «ВР. ПЕРЕСТРОЙКИ» период развертки 0,08;
  - установите переключатель «ПРЕДЕЛЫ» так, чтобы амплитудно-частотная характеристика занимала на экране индикатора положение, удобное для наблюдения и измерения;
  - совместите ручкой «ОТСЧЕТ» линию электронного визира с интересующей точкой на кривой ослабления; произведите отсчет по линейной шкале; измеряемое значение ослабления определите как алгебраическую сумму показаний переключателя «ПРЕДЕЛЫ» и отсчета по линейной шкале дБ;
  - постройте в линейном масштабе полученную частотную зависимость ослабления с указанием характерных точек.

### **1.5. Содержание отчета**

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- структурные схемы установки для ее калибровки, измерения КСВ и ослабления;
- основные радиотехнические параметры прибора и их числовые значения;
- перечень основных операций при подготовке прибора к работе и проведении контрольных измерений;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем;
- осциллограммы частотных характеристик, полученных при калибровке прибора и измерениях, с указанием задаваемой полосы частот, характерных частот на характеристиках КСВ и ослабления, значений КСВ и ослаблений, используемых масштабов;
- выводы по работе.

### **1.6. Контрольные вопросы**

1. Что такое КСВ и ослабление, какими методами они могут измеряться? Какова связь между КСВ и обратным ослаблением?
2. Какие частоты (длины волн) образуют диапазон СВЧ?



3. Почему СВЧ сигнал генератора модулируется НЧ сигналом типа «меандр»? Изобразите графически СВЧ сигнал до модуляции, после модуляции и сигнал после детектирования.

4. Почему внешний тракт измерителя выполняется на основе коаксиальных линий передачи? Каковы рабочие параметры этих линий?

5. Каково назначение детекторной головки, ее назначение, действие?

6. В чем состоит метод панорамного измерения КСВ данным прибором?

7. В чем состоит метод панорамного измерения ослабления данным прибором?

8. Состав измерительной установки.

9. Назначение отдельных приборов установки, ее выносных элементов и установки в целом.

10. Каковы основные технические данные прибора типа Р2-52?

11. Как правильно включать и выключать генераторный и индикаторный блоки установки?

12. Для чего и как осуществляется стабилизация СВЧ мощности в канале падающей волны?

13. Назначение органов управления ГКЧ.

14. Назначение органов управления индикатора.

15. Как измеряется частота генерации в режимах ручной и автоматической перестройки?

16. Последовательность процесса калибровки установки для измерения КСВ, ослабления. Изобразите структурную схему измерительной установки при калибровке и измерении КСВ и то же самое – при измерении затухания.

17. Порядок проведения измерений КСВ, ослабления.

18. Назначение, устройство и действие направленного ответвителя.

19. Назначение, устройство и принцип действия коаксиальных нагрузок.

20. Назначение, устройство и принцип действия коаксиальных аттенюаторов.

## 1.7. Литература

1. Сазонов, Д. М. Устройства СВЧ : учеб. пособие / Д. М. Сазонов, А. Н. Гридин, Б. А. Мишустин ; под ред. Д. М. Сазонова. – М. : Высш. шк., 1981. – 295 с. : ил.

2. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978. – 429 с.

3. Конспекты лекций по дисциплинам «Устройства СВЧ» и «Техническая электродинамика».

## *Лабораторная работа № 2* **ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕРИТЕЛЕМ КСВ И ОСЛАБЛЕНИЙ**

**Цель работы:** изучить принцип работы волноводного автоматического измерителя КСВ и ослаблений Р2-61, практически ознакомиться с методикой и техникой измерений коэффициента стоячей волны и ослабления исследуемых волноводных устройств.

### **2.1. Краткие сведения из теории**

Линия передачи служит для передачи электромагнитной энергии от передатчика к излучающей антенне, от приемной антенны к приемнику, а также для передачи энергии между элементами радиоэлектронных устройств. В зависимости от области применения и рабочей частоты используются разные конструкции линий передачи. Ко всем линиям передачи предъявляются следующие основные требования: линия передачи должна обеспечивать малые потери энергии, иметь заданную диапазонность; иметь наименьшие габариты при обеспечении передачи заданной мощности; должна быть конструктивно простой и экономичной как в производстве, так и в эксплуатации.

Все существующие типы линий передачи можно разделить на две группы: открытые линии передачи и закрытые линии передачи.

К открытым линиям передачи относятся проволочные двухпроводные и многопроводные линии, линии передачи с поверхностной волной (диэлектрические волноводы, ребристо-стержневые системы и т. д.), полосковые линии, открытые линзовые и зеркальные линии. К закрытым линиям относятся радиочастотные кабели различных типов, жесткие коаксиальные линии, полые металлические волноводы.

Каждый из указанных выше типов линий передачи, в свою очередь, может быть разбит на несколько видов в зависимости от назначения, рабочей частоты, конструктивного оформления. По сравнению

с коаксиальными линиями волноводы обладают меньшими потерями и более высоким напряжением пробоя.

В волноводе имеется также полная экранировка передаваемой по нему электромагнитной энергии, исключая потери на излучение и воздействие внешних полей. Одним из недостатков волноводов является то, что внутри его не могут распространяться волны больше определенной длины, которая определяется размерами поперечного сечения волновода. Помимо самих линий передачи, в тракт между источником высокочастотной энергии и нагрузкой включаются различные элементы, служащие для изменения направления передачи энергии, соединения между собой отдельных участков линий передачи (разъемы, фланцевые соединения и т. д.); для обеспечения передачи энергии от неподвижной части установки к подвижной (вращающиеся соединения); для трансформации сопротивлений и т. д. Эти элементы линий передачи весьма многочисленны и конструкции их различны для различных линий передачи.

Различаются следующие типы волн [1]–[3]:

- волны электрического типа ( $E$ -волны);
- волны магнитного типа ( $H$ -волны);
- поперечные волны ( $TEM$ -волны);
- смешанные или гибридные волны.

Волны электрического типа или поперечно-магнитные волны ( $TM$ ) характеризуются тем, что вектор напряженности электрического поля  $E$  обязательно имеет продольную (т. е. направленную вдоль линии передачи) составляющую. Вектор напряженности магнитного поля  $H$  имеет только поперечную составляющую.

Волны магнитного типа или поперечно-электрические волны ( $TE$ ) характеризуются тем, что вектор  $H$  обязательно имеет продольную составляющую и может иметь поперечную составляющую. Вектор же  $E$  для волны типа  $H$  имеет только поперечную составляющую.

Волнами типа  $TEM$  называют волны, векторы  $E$  и  $H$  которых лежат только в поперечном сечении. Гибридные волны имеют продольные составляющие векторов  $E$  и  $H$ .

Для каждого типа волн существует критическая длина волны  $\lambda_{кр}$ . Волны какого-либо типа могут распространяться вдоль линии передачи только при условии, что длина волны в заполняющем линию диэлектрике  $\lambda < \lambda_{кр}$ . Величина  $\lambda_{кр}$  определяется для каждого типа волны формой и размерами поперечного сечения волновода.

Коэффициент распространения  $\gamma$  в линии передачи равен:

$$\gamma = k \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{кр}} \right)^2}, \quad (2.1)$$

где  $k = \omega \sqrt{\epsilon \mu} = \frac{2\pi}{\lambda}$  – коэффициент распространения в диэлектрике, заполняющем линию.

Длина волны в линии передачи равна:

$$\lambda_B = \frac{2\pi}{\gamma} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{кр}} \right)^2}}. \quad (2.2)$$

Для волны *ТЕМ* критическая длина равна бесконечности. Поэтому коэффициент распространения и длина волны в линии равны, соответственно, коэффициенту распространения и длине волны в заполняющем линию диэлектрике.

Фазовая скорость распространения волны  $V_\phi$  равна:

$$V_\phi = \frac{\omega}{\gamma} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2}}, \quad (2.3)$$

а групповая скорость распространения энергии  $V_{гр}$ :

$$V_{гр} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2}. \quad (2.4)$$

Из формул (2.3) и (2.4) следует, что  $V_\phi V_{гр} = \frac{1}{\epsilon \mu}$ . Для волн *ТЕМ*

$$V_\phi = V_{гр} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}.$$

При рассмотрении многих задач вводится понятие характеристического сопротивления волны определенного типа. Для волн типа *E* в волноводах характеристическое сопротивление равно:

$$Z_B = \frac{\gamma}{\omega \epsilon} = \rho \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{кр}} \right)^2} = \rho \frac{\lambda}{\lambda_B}, \quad (2.5)$$

а для волн типа  $H$ :

$$Z_B = \frac{\omega\mu}{\gamma} = \rho \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} = \rho \frac{\lambda_B}{\lambda_0}, \quad (2.6)$$

где  $\rho = \sqrt{\mu/\varepsilon}$  – волновое сопротивление среды с параметрами  $\varepsilon$ ,  $\mu$ .

Для прямоугольного волновода со сторонами  $a$  (широкая стенка) и  $b$ , в котором распространяется волна  $H_{10}$ , характеристическое сопротивление равно:

$$Z_B = \rho \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}. \quad (2.7)$$

Характеристическое сопротивление связывает между собой поперечные составляющие векторов  $E$  и  $H$  в линии:

– для волн  $E$ :

$$H = \frac{1}{Z_B} [E, e_z]; \quad (2.8)$$

– для волн  $H$ :

$$E = Z_B [H, e_z], \quad (2.9)$$

где  $e_z$  – единичный вектор, направленный вдоль оси линии.

Для линий передачи с волной  $TEM$  характеристическое сопротивление (которое часто называется волновым сопротивлением) равно отношению напряжения между проводами к току в одном из проводов в режиме бегущей волны.

Основным назначением линии передачи является передача электромагнитной энергии от генератора к нагрузке с наименьшими потерями. Однако, даже когда линия не обладает потерями, не вся мощность, отдаваемая генератором  $P_\Gamma$ , поступает в нагрузку.

Мощность, поступающая в нагрузку, равна:

$$P_H = P_\Gamma (1 - |\Gamma_H|^2), \quad (2.10)$$

где  $|\Gamma_H|$  – модуль коэффициента отражения по напряжению, связанный с комплексным сопротивлением нагрузки  $Z_H$  и волновым сопротивлением линии  $W$  соотношением

$$\Gamma_{\text{H}} = |\Gamma_{\text{H}}| e^{j \arg \Gamma_{\text{H}}} = \frac{Z_{\text{H}} - W}{Z_{\text{H}} + W}. \quad (2.11)$$

Отсюда видно, что всегда  $|\Gamma_{\text{H}}| \leq 1$ . Формула (2.11) справедлива, если генератор согласован с линией передачи, т. е. его входное сопротивление активно и равно  $W$ .

Коэффициент отражения  $\Gamma$  связан с коэффициентом бегущей волны КБВ следующим соотношением:

$$\text{КБВ} = \frac{1 - |\Gamma|}{1 + |\Gamma|}, \quad \text{или} \quad |\Gamma| = \frac{1 - \text{КБВ}}{1 + \text{КБВ}}. \quad (2.12)$$

Линия передачи обычно представляет собой соединение отрезков регулярных линий передачи и различных элементов. Каждый из таких элементов в определенной степени рассогласован с присоединенными к нему отрезками линии передачи. Коэффициенты отражения отличаются друг от друга как по модулю, так и по фазе. Часто интересуются коэффициентом отражения на входе линии передачи, который представляет собой суммарный (с учетом амплитуды и фазы всех отраженных волн) коэффициент отражения от всех включенных в линию элементов.

Суммарный коэффициент отражения от двух элементов, последовательно включенных в линию передачи, на входе первого элемента равен:

$$\Gamma_{\Sigma} = \Gamma_1 - \frac{\Gamma_2 (1 - \Gamma_1^2) e^{-2\gamma l}}{1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\gamma l}}, \quad (2.13)$$

где  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  – коэффициенты отражения первого и второго элементов;  $l$  – длина линии между элементами. Предполагается, что за вторым элементом имеет место бегущая волна.

Соотношение (2.13) может быть распространено и на большее количество элементов. В ряде случаев при расчете линии передачи требуется пересчитать сопротивление, включенное в конце линии (сопротивление нагрузки)  $Z_{\text{H}}$ , в другое сечение  $l$ . Этот пересчет производится по формуле

$$Z_l = W \frac{Z_{\text{H}} + jW \operatorname{tg} \gamma l}{W + jZ_{\text{H}} \operatorname{tg} \gamma l}, \quad (2.14)$$

где  $l$  отсчитывается от нагрузки в сторону генератора.

Уменьшение мощности, переносимой волной при ее распространении вдоль линии передачи из-за потерь в металле и диэлектрике, характеризуется коэффициентом затухания  $\alpha$ . Мощность в согласованной нагрузке при длине  $l$  равна:

$$P_H = P_\Gamma e^{-2\alpha l}. \quad (2.15)$$

Отношение мощности в нагрузке к мощности генератора называют коэффициентом полезного действия линии  $\eta$ , который при согласованной линии принимает максимальное значение:

$$\eta_{\max} = e^{-2\alpha l}. \quad (2.16)$$

В соответствии с (2.15) и (2.16) считается, что ослабление поля вследствие потерь описывается функцией  $e^{-2\alpha l}$ , где  $\alpha$  – коэффициент затухания в неперах на единицу длины. Часто затухание выражается в логарифмическом масштабе – децибелах на единицу длины. Переход от одних величин к другим выполняется с помощью формул:

$$\alpha, \text{ дБ/м} = 8,68\alpha, \text{ неп/м}; \quad \alpha, \text{ неп/м} = 0,015\alpha, \text{ дБ/м}.$$

При наличии отражений мощность, поступившая в нагрузку, уменьшается, и КПД линии равен:

$$\eta = \eta_{\max} \frac{1 - |\Gamma_H|^2}{1 - |\Gamma_H|^2 \eta_{\max}^2} = \eta_{\max} \frac{4 \cdot \text{КБВ}}{(1 + \text{КБВ})^2 - (1 - \text{КБВ})^2 \eta_{\max}^2}. \quad (2.17)$$

Волновое сопротивление волновода в том смысле, как оно принято для волн *ТЕМ* (отношение напряжения к току), не имеет смысла. Однако для волноводов строится универсальная модель в виде эквивалентной линии передачи. В эквивалентной линии векторные функции полей в поперечных сечениях заменяются интегральными (усредненными) мерами электромагнитного поля – эквивалентными нормированными напряжениями волн.

Модуль нормированного напряжения волны представляет собой квадратный корень из мощности и имеет размерность  $\sqrt{\text{Вт}}$ . Фаза нормированного напряжения волны принимается равной фазе поперечной компоненты электрического поля.

Введение нормированного напряжения эквивалентно приравниванию волнового сопротивления  $W$  единице. При этом все соотношения для передачи мощности в линии передачи (2.10)–(2.17) применимы и для волноводов.

## 2.2. Описание панорамного измерителя КСВ и ослаблений

Используемый в работе панорамный измеритель предназначен для измерения КСВ и ослаблений в полосе частот (8–12) ГГц с воспроизведением этих характеристик на экране его индикатора.

Схема установки приведена на рис. 2.1. В ее состав входят генератор качающейся частоты 1, осциллографический индикатор 2, направленный ответвитель падающей волны (НО1) 3, направленный ответвитель отраженной волны (НО2) 4, детекторные головки (совмещены с НО1 и НО2) 5, высокочастотная (ВЧ) линия 6, коаксиально-волноводный переход 7, низкочастотные (НЧ) коаксиальные кабели 8, многожильный соединительный кабель 9, согласованная нагрузка 10 и измеряемые аттенуатор и волноводная нагрузка 11.

Коаксиально-волноводный переход 7 присоединяется непосредственно к направленному ответвителю НО1. Фланцевые соединения выполняются с помощью винтов или струбцин.

В режиме калибровки измерителя КСВ и ослаблений направленный ответвитель 1 соединяется с направленным ответвителем 2 через соединитель I (т. е. непосредственно). В режиме измерения ослаблений вместо соединителя I включается исследуемый элемент II. В режиме измерения КСВ после калибровки прибора направленный ответвитель 2 включается в обратном порядке непосредственно к направленному ответвителю 1, исследуемый элемент включается вместо нагрузки.

Направленные ответвители, используемые в установке, конструктивно представляют собой два волноводных отрезка с электромагнитной связью. Один конец вторичной линии передачи нагружен на детекторную секцию, а второй его конец заканчивается нагрузочным согласованным сопротивлением.

В используемом приборе направленные ответвители имеют переходное ослабление около 20 дБ, мощность сигнала на втором выходе (выходе основного канала) при этом всего на 1 % меньше мощности сигнала на входе. К ненагруженному выходу второго канала направленного ответвителя подключается детекторная секция, которая реагирует на сигнал, распространяющийся со входа на выход основного канала. На рис. 2.2 ответвитель 1, таким образом, реагирует на падающую волну.

К ответвителю падающей волны присоединяется ответвитель 2, ориентированный на падающую волну (при калибровке и измерении



ослаблений; в этом случае на выходе ответвителя 2 присоединяется согласованная нагрузка), либо на отраженную волну (при измерении КСВ, в этом случае на выходе присоединяется исследуемый объект).

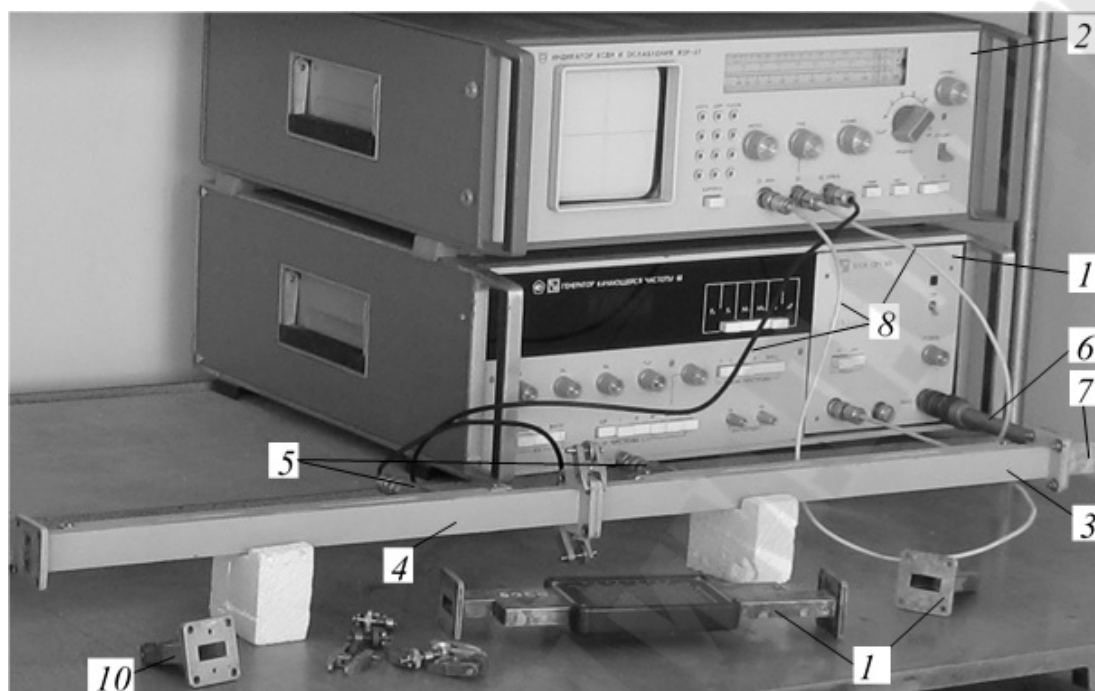


Рис. 2.1. Измеритель КСВ и ослаблений

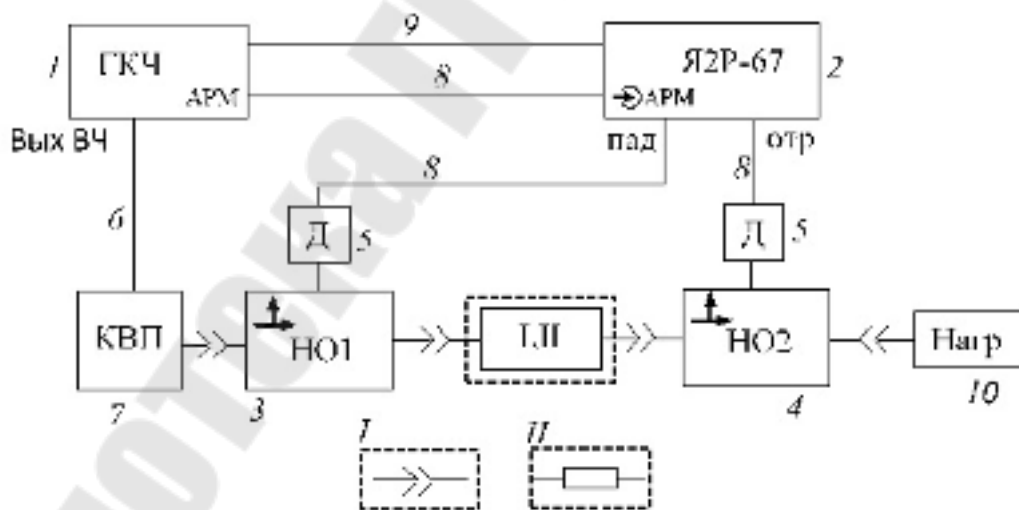


Рис. 2.2. Схема калибровки и измерения ослабления:  
I – калибровка, II – измерение

Сигналы с выходов детекторных секций поступают на вход канала падающей волны и на вход канала отраженной (прошедшей) волны индикатора. Часть усиленного сигнала, пропорционального

уровню падающей волны, ответвляется на разъем «АРМ» и через коаксиальный кабель подается на вход «АРМ» СВЧ блока ГКЧ и используется для стабилизации уровня падающей волны в полосе качания. Вторая часть сигнала, пропорциональная уровню падающей волны, используется в качестве опорного сигнала в синхродетекторе, на измерительный вход которого поступает сигнал, пропорциональный уровню отраженной (прошедшей) волны.

### 2.3. Домашнее задание

1. По данному методическому указанию и техническому описанию изучить принципы действия панорамного измерителя КСВ и ослаблений и правила работы с ним.

2. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить теоретический материал по теме лабораторной работы и ответить на контрольные вопросы.

3. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить конструкции, принципы действия и характеристики волноводных согласованных нагрузок, аттенуаторов и направленных ответвителей.

### 2.4. Подготовка установки к работе

1. Заземлите корпуса приборов. Соедините узлы СВЧ и блоки согласно структурной схеме, представленной на рис. 2.2. На выход направленного ответвителя 2 включите согласованную нагрузку. Включите индикатор и ГКЧ, дайте им прогреться в течение 15 мин.

2. Установите граничные частоты рабочего диапазона измерителя КСВ и ослаблений согласно табл. 2.1 или табл. 2.2. Для этого нажмите кнопку « $F_1$ » и ручкой « $F_1, F_0$ » по отсчетному устройству установите минимальную частоту рабочего диапазона  $f_{\text{мин}}$ ; нажмите кнопку « $F_2$ » и ручкой « $F_2, \Delta F$ » установите максимальную частоту рабочего диапазона  $f_{\text{макс}}$ .

Таблица 2.1

Исходные данные для группы ПС-41

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f_{\text{мин}}$ , ГГц	8	8,5	8,75	8,64	9,2	9,5	8,45	10,25
$f_{\text{макс}}$ , ГГц	9,15	9,5	9,75	10,15	10,75	12,05	11,75	12,05

Исходные данные для группы ПС-42

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f_{\text{мин}}$ , ГГц	8,27	8,35	9,45	9,6	10,12	10,7	11,2	9,35
$f_{\text{макс}}$ , ГГц	9,77	9,85	12,3	10,86	11,8	12,5	11,95	11,2

3. Установите уровень мощности в канале падающей волны: установите переключатель «ПРЕДЕЛЫ» в положение «ПАД»; установите ручкой «ОТСЧЕТ» визир шкалы индикатора на отметку 2 мВ; совместите ручками «УРОВЕНЬ» и «ПАД» линию падающей мощности, наблюдаемой на экране индикатора, с линией электронного визира.

4. Проверьте наличие и пределы регулировки частотных меток: установите ручками «М<sub>1</sub>», «М<sub>2</sub>», «АМПЛИТУДА М<sub>1</sub> М<sub>2</sub>» и «МЕТКА» частотные метки на экране индикатора; убедитесь, поворачивая поочередно ручки «АМПЛИТУДА М<sub>1</sub>, М<sub>2</sub>» и «МЕТКА», в возможности регулирования амплитуды меток в пределах 0–5 мм, после чего установите удобную для отсчета амплитуду (2–3 мм); совместите ручками «М<sub>1</sub>» и «М<sub>2</sub>» метки с началом и концом наблюдаемой на экране индикатора линии электронного визира.

5. Откалибруйте прибор в полосе частот: установите переключатель «ПРЕДЕЛЫ» в положение 0; установите ручкой «ОТСЧЕТ» визир на отметку 0 по верхней шкале дБ; совместите ручкой «КАЛИБР» наблюдаемую на экране линию калибровки с отсчетной линией так, чтобы отсчетная линия проходила посередине линии калибровки.

6. Измерьте неравномерность линии калибровки. Для этого ручкой «ОТСЧЕТ» совместите линию электронного визира с максимальным и минимальным отклонениями калибровки. Отклонения, отсчитанные по верхней шкале дБ индикатора, не должны превышать  $\pm 0,3$  дБ в рабочем диапазоне частот.

### 2.5. Экспериментальное задание и порядок его выполнения

Подготовить лабораторную установку к работе.

1. Измерение КСВ согласованных нагрузок:

а) откалибруйте прибор для измерения КСВ в заданном диапазоне частот (табл. 2.1 или табл. 2.2). При этом используйте согласованную нагрузку № 1;

б) зарисуйте частотную зависимость КСВ с указанием масштабов по горизонтальной и вертикальной осям графика;

в) измерьте КСВ в трех точках  $f_{\min}$ ,  $f_{\text{ср}}$ ,  $f_{\max}$  ( $f_{\text{ср}} = (f_{\min} + f_{\max})/2$ ).  
Для этого:

– поставьте переключатель «ПРЕДЕЛЫ» так, чтобы кривая КСВ занимала на экране ЭЛТ положение, удобное для наблюдения и измерения;

– совместите ручкой «ОТСЧЕТ» отсчетную линию на экране ЭЛТ с интересующей точкой на кривой КСВ и по отсчетному устройству шкалы «КСВ» индикатора отсчитайте измеренное значение;

– для определения частоты, соответствующей интересующей точке наблюдаемой кривой КСВ, нажмите кнопку «M1», ручкой «M1» совместите частотную метку с этой точкой и по отсчетному устройству ГКЧ отсчитайте значение частоты;

г) на выход направленного ответвителя 2 включите согласованную нагрузку № 2 и выполните пп. 1б и 1в;

д) выберите из двух нагрузок лучшую и далее работайте с ней.

2. Измерение КСВ входа и выхода аттенюатора:

а) откалибруйте прибор для измерения КСВ в заданном диапазоне частот (табл. 2.1 или табл. 2.2);

б) на выход направленного ответвителя 2 вместо согласованной нагрузки включите аттенюатор, нагруженный на согласованную нагрузку;

в) зарисуйте кривую КСВ в полосе частот;

г) измерьте КСВ в трех точках  $f_{\min}$ ,  $f_{\text{ср}}$ ,  $f_{\max}$ ;

д) поменяйте вход и выход аттенюатора местами и повторите предыдущие три пункта.

3. Измерение ослабления, вносимого аттенюатором:

а) откалибруйте прибор для измерения ослабления в заданном диапазоне частот (табл. 2.1 или табл. 2.2);

б) включите между направленными ответвителями исследуемый аттенюатор;

в) зарисуйте кривую ослабления в полосе частот с указанием масштабов по горизонтальной и вертикальной осям графика;

г) измерьте ослабление  $\alpha$ , вносимое аттенюатором на частотах  $f_{\min}$ ,  $f_{\text{ср}}$ ,  $f_{\max}$ . Для этого:

– установите переключатель «ПРЕДЕЛЫ» так, чтобы амплитудно-частотная характеристика (кривая ослабления) занимала на экране ЭЛТ положение, удобное для наблюдения и измерения;

– совместите ручкой «ОТСЧЕТ» линию электронного визира с интересующей точкой на кривой ослабления; произведите отсчет по линейной шкале (верхней шкале прибора); измеряемое значение ос-

лабления определите как алгебраическую сумму показаний переключателя «ПРЕДЕЛЫ» и отсчета по линейной шкале дБ;

– для определения частоты, соответствующей интересующей точке наблюдаемой кривой ослабления, нажмите кнопку «M1», ручкой «M1» совместите частотную метку с этой точкой и по отсчетному устройству ГКЧ отсчитайте значение частоты;

– зарисуйте в линейном масштабе полученную частотную зависимость ослабления с указанием характерных точек.

## **2.6. Содержание отчета**

Отчет должен содержать:

- блок-схемы установки для измерения КСВ и ослаблений;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем;
- частотные характеристики исследованных объектов;
- выводы по работе.

## **2.7. Контрольные вопросы**

1. Состав измерительной установки.
2. Каково назначение детекторной головки, ее назначение, действие?
3. Назначение отдельных приборов установки, ее выносных элементов и установки в целом.
4. Каковы основные технические данные прибора типа P2-61?
5. Как правильно включать и выключать генераторный и индикаторный блоки установки?
6. Для чего и как осуществляется стабилизация СВЧ мощности в канале падающей волны?
7. Назначение органов управления ГКЧ.
8. Назначение органов управления индикатора.
9. Как измеряется частота генерации в режимах ручной и автоматической перестройки?
10. Последовательность процесса калибровки установки для измерения КСВ, ослабления. Изобразите структурную схему измерительной установки при калибровке и измерении КСВ и то же самое – при измерении затухания.
11. Порядок проведения измерений КСВ, ослабления.
12. Назначение, устройство и действие направленного ответвителя.
13. Назначение, устройство и принцип действия волноводных нагрузок.

14. Назначение, устройство и принцип действия волноводных аттенюаторов.
15. Что такое коаксиально-волноводный переход? Каково его назначение?
16. Основные типы линий передачи.
17. Какие требования предъявляются к линиям передачи?
18. Назовите типы волн в линиях передачи, охарактеризуйте их.
19. Что такое критическая длина волны?
20. Дайте определение коэффициентов отражения и ослабления.
21. Как связана длина волны в прямоугольном волноводе с его поперечными размерами?
22. Какой тип колебаний в прямоугольном волноводе является основным?
23. Как связана длина волны в прямоугольном волноводе с частотой питающего его генератора?

## **2.8. Литература**

1. Сазонов, Д. М. Устройства СВЧ : учеб. пособие / Д. М. Сазонов, А. Н. Гридин, Б. А. Мишустин ; под ред. Д. М. Сазонова. – М. : Высш. шк., 1981. – 295 с. : ил.
2. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978. – 429 с.
3. Конспекты лекций по дисциплинам «Устройства СВЧ» и «Техническая электродинамика».

## **Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНОГО АТТЕНЮАТОРА**

**Цель работы:** изучить основные принципы работы и параметры аттенюаторов, экспериментально исследовать характеристики аттенюатора, ознакомиться с конструктивным исполнением волноводных аттенюаторов.

### **3.1. Краткие теоретические сведения**

Аттенюаторы – четырехполюсники, обеспечивающие ослабление уровня сигнала на выходе по сравнению с уровнем сигнала на входе. Уменьшение мощности сигнала на выходе аттенюатора происходит за счет превращения части входной мощности в тепло.

Различают фиксированные и переменные аттенюаторы. Ослабление сигнала фиксированным аттенюатором неизменно во всем рабочем диапазоне частот аттенюатора. В переменном аттенюаторе вносимое ослабление плавно или дискретно изменяется от минимального до максимального значения.

Конструктивно аттенюатор представляет собой отрезок линии передачи, внутрь которого введен элемент с большим поглощением электромагнитных волн.

Основными параметрами, характеризующими аттенюаторы, являются: величина вносимого ослабления, пределы регулировки ослабления, точность калибровки ослабления, КСВ входа и выхода, допустимая мощность рассеивания, тип и геометрические размеры основного тракта. Ослабление, вносимое аттенюатором, выражается в децибелах (дБ):

$$A = 20 \lg \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} = 10 \lg \frac{P_{\text{ВХ}}}{P_{\text{ВЫХ}}}, \text{ дБ}, \quad (3.1)$$

где  $U_{\text{ВХ}}, P_{\text{ВХ}}$  – напряженность поля и мощность волны на входе;  $U_{\text{ВЫХ}}, P_{\text{ВЫХ}}$  – на выходе аттенюатора.

Очень часто поглощающий элемент выполняется в виде тонкой пластины, располагаемой вдоль оси линии передачи. В коаксиальном переменном аттенюаторе пластина вводится внутрь линии через узкую продольную щель во внешнем цилиндре (аттенюатор ножевого типа). Чем глубже погружается пластина внутрь коаксиальной линии, тем больше вносимое аттенюатором затухание.

Фиксированные коаксиальные аттенюаторы выполняются обычно на базе стандартных пленочных СВЧ резисторов по схеме симметричного  $T$ -образного четырехполюсника (рис. 3.1).

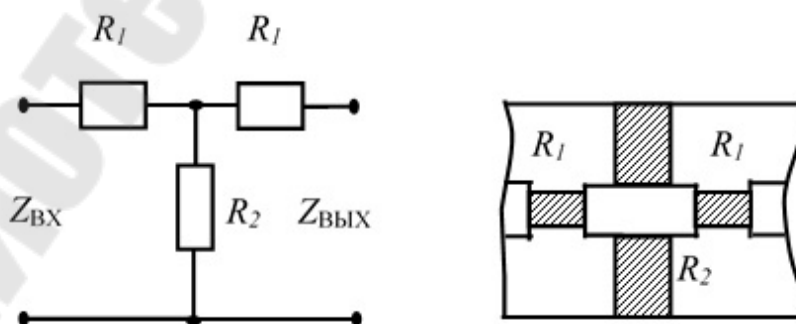


Рис. 3.1. Схема  $T$ -образного четырехполюсника

На сантиметровых волнах применяют также волноводные аттенюаторы с поглощающими пластинами. Пластина может вводиться в волновод через узкую продольную щель в центре широкой стенки. Это аттенюаторы ножевого типа. Кроме того, пластины (одна или две) могут располагаться внутри волновода и перемещаться вдоль широкой стенки (рис. 3.2). При перемещении поглощающих пластин в область волновода с более высокой напряженностью поля  $E$  увеличивается мощность, поглощаемая пластинами, и, следовательно, возрастает ослабление, вносимое аттенюатором. Форма пластин определяет качество согласования аттенюаторов.

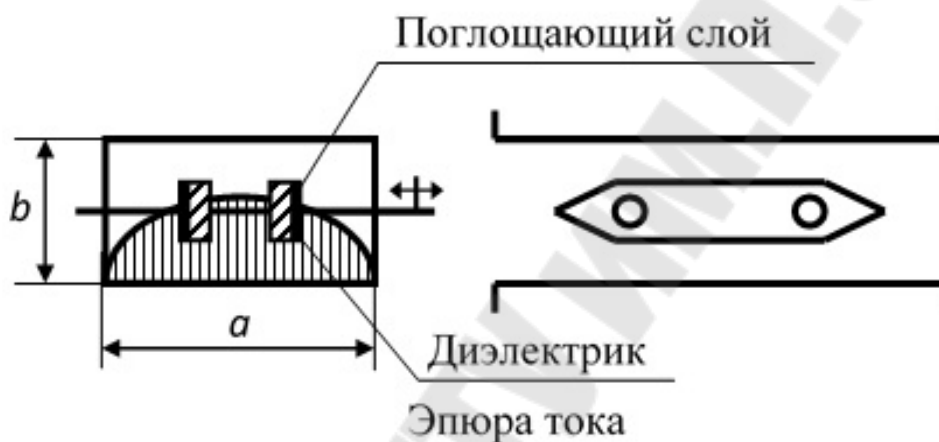


Рис. 3.2. Волновод

В технике СВЧ находят применение поляризационные аттенюаторы. Такие аттенюаторы состоят из трех секций, включенных каскадно. Секции выполняются из круглых волноводов. Крайние секции закреплены неподвижно на основании прибора, средняя имеет возможность поворачиваться вокруг продольной оси. Внутри каждой секции помещена поглощающая пластина, которая разделяет секцию волновода на две равные части, причем поглощающие пластины крайних секций расположены в одной плоскости.

Принцип действия аттенюатора следующий. Предположим, что каждая пластина имеет бесконечно малую толщину и обладает бесконечно большой поглощающей способностью для электромагнитной волны, электрическое поле которой тангенциально к поверхности пластины, и считаем, что отражение от концов пластины отсутствует. Пусть в первой секции распространяется в сторону второй секции волна типа  $H_{11}$ , линии электрического поля которой нормально ориентированы к плоскости поглощающей пластины, а амплитуда векто-



ра электрического поля равна  $E_0$ . Если поглощающая пластина второй секции находится в плоскости крайних пластин, то в этом случае волна проходит через аттенюатор без ослабления. Повернем вторую секцию на некоторый угол  $\theta$ . Тогда электрическая составляющая  $E_0$  электромагнитной волны на входе второй секции может быть разложена на две составляющие: параллельную и перпендикулярную к плоскости поглощающей пластины второй секции.

Составляющая волны с электрическим вектором, параллельным пластине второй секции, полностью поглотится, а составляющая волны с электрическим вектором, перпендикулярным пластине, свободно пройдет до выхода второй секции. Амплитуда волны, дошедшей до выхода второй секции, будет равна  $E_0 \cos\theta$ .

Электромагнитная волна с амплитудой  $E_0 \cos\theta$  на входе третьей секции может быть разложена на две волны: волну, электрический вектор которой параллелен плоскости пластины третьей секции, и волну с электрическим вектором, перпендикулярным плоскости пластины. Последняя волна без ослабления пройдет через третью секцию, и ее амплитуда будет равна  $E_0 \cos^2\theta$ .

### 3.2. Описание лабораторной установки

Затухание, вносимое исследуемым аттенюатором, измеряется методом замещения. Общий вид и структурная схема лабораторной установки приведены на рис. 3.3 и 3.4, соответственно. Она состоит из генератора СВЧ колебаний 1, коаксиального СВЧ кабеля 2, коаксиально-волноводного перехода 3, эталонного 4 и исследуемого 5 аттенюаторов, детектора 6, низкочастотного коаксиального кабеля 7 и селективного вольтметра 8. На рис. 3.3 показаны также конструкции различных аттенюаторов 9. Эталонный и исследуемый аттенюаторы являются регулируемыми, при нулевых значениях их указателей вносимые затухания равны нулю.

Высокочастотное колебание генератора поступает на вход эталонного аттенюатора, далее – на исследуемый аттенюатор. Детектор с вольтметром являются индикатором сигнала.

СВЧ генератор работает в режиме внутренней амплитудной модуляции. Частота модулирующего колебания задается генератором. После детектирования сигнала детектором образуется колебание с частотой, равной частоте модулирующего колебания. На эту частоту настраивается вольтметр, работающий в селективном режиме.

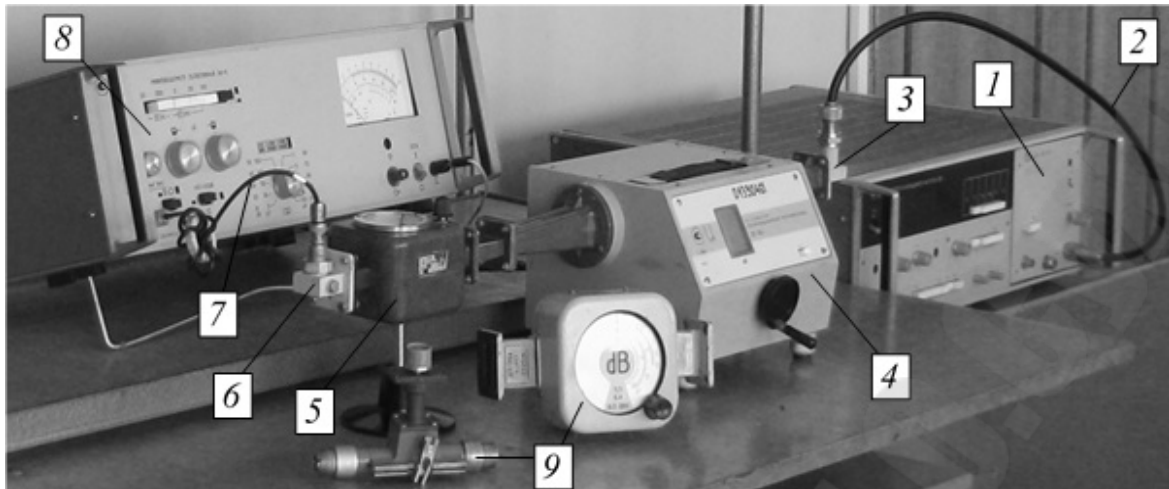


Рис. 3.3. Общий вид лабораторной установки

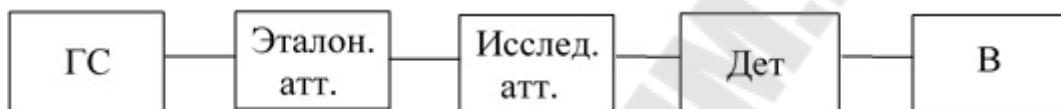


Рис. 3.4. Структурная схема измерительной установки

Исследуемый аттенюатор содержит две поглощающие пластины, перемещающиеся вдоль широкой стенки волновода (рис. 3.2). Пластины перемещаются симметрично относительно оси волновода так, что расстояния от каждой из пластин до ближайшей узкой стенки волновода одинаковы и соответствуют значению указателя (по внешней шкале) в миллиметрах.

Затухание  $A$ , дБ, исследуемого аттенюатора при заданном значении его указателя измеряется следующим образом. При нулевом значении затухания эталонного аттенюатора снимается показание вольтметра. Значение указателя исследуемого аттенюатора ставится на нуль и с помощью эталонного аттенюатора восстанавливается значение на вольтметре. Затухание эталонного аттенюатора и будет равно величине  $A$ .

### 3.3. Домашнее задание

1. По данному методическому указанию и техническому описанию изучить принципы действия измерительных приборов и правила работы с ними.
2. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить теоретический материал по теме лабораторной работы и ответить на контрольные вопросы.

3. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить конструкции, принципы действия и характеристики механических аттенуаторов.

### 3.4. Задание и порядок его выполнения

1. Собрать лабораторную установку согласно структурной схеме (рис. 3.4). Включить измерительные приборы, дать им прогреться в течение 15 мин.

2. Включить необходимый режим работы генератора – режим внутренней амплитудной модуляции. Установить частоту несущего колебания генератора 8 ГГц и включить СВЧ сигнал на его выходном разъеме.

3. Настроить вольтметр, для этого включить селективный режим, включить частотный диапазон, в котором содержится частота модулирующего колебания.

Первоначальное обнаружение сигнала проводите на самом нечувствительном поддиапазоне 100 мВ.

С помощью ручек грубой и точной настройки частоты настройтесь на частоту входного сигнала, добившись максимальных показаний стрелочного индикатора. При этом, чтобы стрелка индикатора не зашкаливала, пользуйтесь ручкой регулировки чувствительности прибора. Далее, после настройки вольтметра положения ручек настройки частоты не изменять.

4. Методом замещения (п. 3.2) определить зависимость затухания исследуемого аттенуатора от частоты. Значение указателя аттенуатора  $N$  задается согласно табл. 3.1 или табл. 3.2. Частоту сигнала генератора изменять от 8 до 12 ГГц через 250 МГц.

5. Построить график зависимости затухания исследуемого аттенуатора от частоты.

Таблица 3.1

Исходные данные для группы ПС-41

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f$ , ГГц	8	9	10	11	12	11,75	8,5	9,5
$N$	8	4	2	3	5	6	7	9

Исходные данные для группы ПС-42

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f$ , ГГц	10,5	11,5	9,25	8,25	11,25	8,75	9,75	10,75
$N$	8,5	4,5	2,5	3,5	5,5	6,5	7,5	9,5

6. Для заданной частоты  $f$  (табл. 3.1 или табл. 3.2) определить зависимость затухания исследуемого аттенюатора от положения в волноводе поглощающих пластин. Указатель исследуемого аттенюатора устанавливать на оцифрованные значения шкалы в пределах 0–10.

7. Построить график зависимости затухания, вносимого исследуемым аттенюатором, от положения поглощающих пластин. Расстояния от каждой из пластин до ближайшей узкой стенки волновода одинаковы и соответствуют значению указателя (по внешней шкале) в миллиметрах.

### 3.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- эскиз волноводного аттенюатора;
- определение основных измеряемых параметров;
- блок-схему измерительной установки с указанием назначения отдельных блоков;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем;
- частотную характеристику аттенюатора;
- зависимость ослабления волны аттенюатором от положения поглощающих пластин;
- выводы по работе. В выводах необходимо проанализировать результаты измерений, сравнить полученные характеристики с ожидаемыми теоретическими, указать возможные причины расхождения.

### 3.6. Контрольные вопросы

1. Что такое аттенюатор, для чего он служит?
2. Состав измерительной установки.
3. Методы измерения затуханий, вносимых аттенюаторами.

4. Назначение отдельных приборов установки, ее выносных элементов и установки в целом.
5. Как точность измерения затухания зависит от характеристики детектора?
6. В каком режиме должен работать генератор установки?
7. Как правильно включать и выключать измерительные приборы измерительной установки?
8. В каких единицах измеряется ослабление аттенюатора?
9. Порядок настройки измерительной установки.
10. Как настраивать генератор на необходимую несущую частоту и частоту модулирующего колебания?
11. В каком режиме должен работать вольтметр и как его настраивать?
12. Как обеспечивается выполнение техники безопасности в лабораторной установке?
13. Какие бывают типы аттенюаторов?
14. Устройство волноводного, коаксиального аттенюаторов.
15. Почему в лабораторной установке вольтметр должен работать в селективном режиме?
16. Как обеспечивается согласование входов волноводного, коаксиального аттенюаторов?
17. Чем определяется точность измерения затухания поляризационным аттенюатором?
18. Где должна помещаться поглощающая пластина в волноводе для получения максимального ослабления аттенюатора?

### **3.7. Литература**

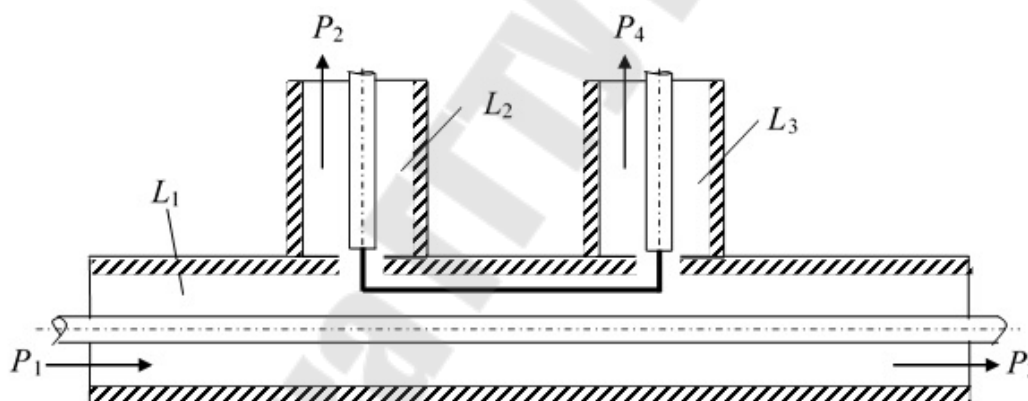
1. Сазонов, Д. М. Устройства СВЧ : учеб. пособие / Д. М. Сазонов, А. Н. Гридин, Б. А. Мишустин ; под ред. Д. М. Сазонова. – М. : Высш. шк., 1981. – 295 с. : ил.
2. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978. – 429 с.
3. Конспекты лекций по дисциплинам «Устройства СВЧ» и «Техническая электродинамика».

## *Лабораторная работа № 4* **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕННЫХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ**

**Цель работы:** изучить основные принципы работы направленных ответвителей, ознакомиться с методикой измерения и экспериментально исследовать параметры направленного ответвителя.

### 4.1. Краткие сведения из теории

Направленные ответвители (НО) – это устройства, позволяющие определять амплитуды падающих и отраженных волн, распространяющихся по линиям передачи сверхвысоких частот. Направленные ответвители могут использоваться непосредственно для ответвления части высокочастотной энергии из передающей линии в другие линии с целью подвода энергии к нескольким элементам или СВЧ устройствам. Направленные ответвители состоят из электромагнитно связанных между собой линий передачи.



*Рис. 4.1.* Направленный ответвитель на связанных коаксиальных линиях

На рис. 4.1 изображен направленный ответвитель на связанных коаксиальных линиях  $L_1$  и  $L_2-L_3$ . Внешние проводники линий электрически соединены между собой.

Принцип работы направленного ответвителя на связанных линиях состоит в том, что направленная передача волны из первичной линии  $L_1$  во вторичную  $L_2-L_3$  осуществляется за счет расположения центрального проводника вторичной линии в поле первичной линии. При этом расстояние между центральными проводниками линий делается достаточно малым. Электрическое поле первичной линии на-

водит во вторичной линии электрическое поле  $E_e$ . Относительно вертикальной (рис. 4.1) плоскости симметрии наведенное поле симметрично и в плечах 2 и 4 образуются синфазные волны. Другая составляющая электрического поля  $E_m$  во вторичной линии наводится за счет магнитной связи с первичной линией. Часть магнитного поля первичной линии охватывает оба центральных проводника и индицирует во вторичной линии ток, который в плечах 2 и 4 образует противофазные волны. Комплексные амплитуды двух составляющих волн зависят от расстояния между линиями, длины области связи и от частоты. Регулируя расстояние между линиями, можно обратить в нуль суммарное электрическое поле на выходе 4. Результирующая наведенная волна направится в плечо 2.

Различают три типа направленных ответвителей, различающихся входами, между которыми делится мощность СВЧ. Перенумерацией входов все их можно свести к одному, изображенному на рис. 4.2.

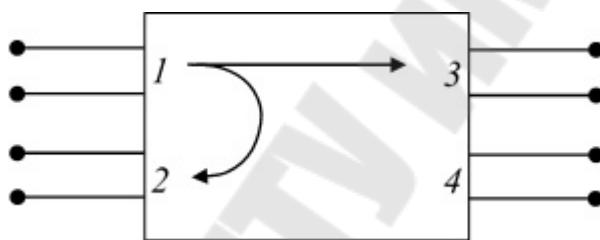


Рис. 4.2. Нумерация входов и распределение мощности при возбуждении входа 1 в направленном ответвителе

Основными характеристиками НО являются: коэффициент связи, переходное затухание, направленность, развязка, согласование плеч ответвителя с подводящими линиями (КСВ), фазовые соотношения для напряжений в выходных плечах, рабочее затухание в основной линии.

Коэффициент связи НО определяется как корень квадратный из отношения выходной мощности рабочего плеча вторичной линии к входной мощности первичной линии:

$$q = \sqrt{P_2 / P_1}. \quad (4.1)$$

Переходное затухание определяется отношением входной мощности первичной линии к выходной мощности рабочего плеча вторичной линии:

$$C_{12} = 10 \lg P_1 / P_2, \text{ дБ}. \quad (4.2)$$

Направленностью называется отношение мощностей на выходе рабочего и нерабочего плеч вторичной линии, выраженное в децибелах:

$$C_{24} = 10 \lg P_2/P_4, \text{ дБ.} \quad (4.3)$$

Развязка определяется как отношение входной мощности первичной линии к выходной мощности нерабочего плеча вторичной линии:

$$C_{14} = 10 \lg P_1/P_4, \text{ дБ.} \quad (4.4)$$

Рабочее затухание первичной линии определяется отношением мощностей на входе и выходе первичной линии:

$$C_{13} = 10 \lg P_1/P_3, \text{ дБ.} \quad (4.5)$$

Согласование плеча НО с входной подводящей линией характеризуется коэффициентом стоячей волны (КСВ) на входе НО. Все рассмотренные параметры НО определяются при условии подачи сигнала в плечо  $I$  и согласованных нагрузках в свободных плечах.

В зависимости от переходного затухания  $C_{14}$  НО делятся на устройства с сильной ( $C_{12} < 10$  дБ) и слабой ( $C_{12} > 0-10$  дБ) связью. НО с равными мощностями в выходных плечах ( $C_{12} = 3$  дБ) называются трехдецибельными НО или мосты СВЧ. Величина переходного затухания зависит от типа, размеров и числа элементов связи между первичным и вторичным каналами НО. В типовых НО  $C_{12} = 3-60$  дБ.

Направленность характеризует просачивание мощности в нерабочее плечо за счет неидеальности свойств НО. У идеального НО  $P_2 \rightarrow 0$  и  $C_{24} \rightarrow \infty$  (в реальных конструкциях НО  $C_{24} = 15-40$  дБ). Этот параметр характеризует качество НО и при конструировании НО его стремятся иметь как можно большим. Развязка у идеально выполненного НО должна быть бесконечно большой.

В зависимости от используемых линий передачи и элементов связи НО подразделяются на коаксиальные, волноводные и полосковые, с одиночными и многими элементами связи, со щелевой связью, многодырочные, двух- и многошлейфовые и т. д.

Идеальные направленные ответвители имеют матрицу рассеяния вида:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -jq & \sqrt{1-q^2} & 0 \\ -jq & 0 & 0 & \sqrt{1-q^2} \\ \sqrt{1-q^2} & 0 & 0 & -jq \\ 0 & \sqrt{1-q^2} & -jq & 0 \end{bmatrix}.$$



Из вида матрицы следует, что все входы НО согласованы ( $s_{11} = s_{22} = s_{33} = s_{44} = 0$ ), входы 1 и 4, а также 3 и 2 взаимно развязаны, т.е.  $s_{41} = s_{14} = 0$  и  $s_{23} = s_{32} = 0$ . При возбуждении плеча 1 фаза колебаний в плече 2 отстает на  $90^\circ$  от фазы колебаний в плече 3.

#### 4.2. Описание экспериментальной установки

Общий вид и структурная схема лабораторной установки для измерений параметров направленных ответвителей приведены на рис. 4.3 и 4.4, соответственно. Она состоит из генератора СВЧ 1, высокочастотного кабеля 2, коаксиального переходника-аттенюатора 3, исследуемого направленного ответвителя 4, согласованных нагрузок 5, детектора 6, низкочастотного кабеля 7 и селективного вольтметра 8.

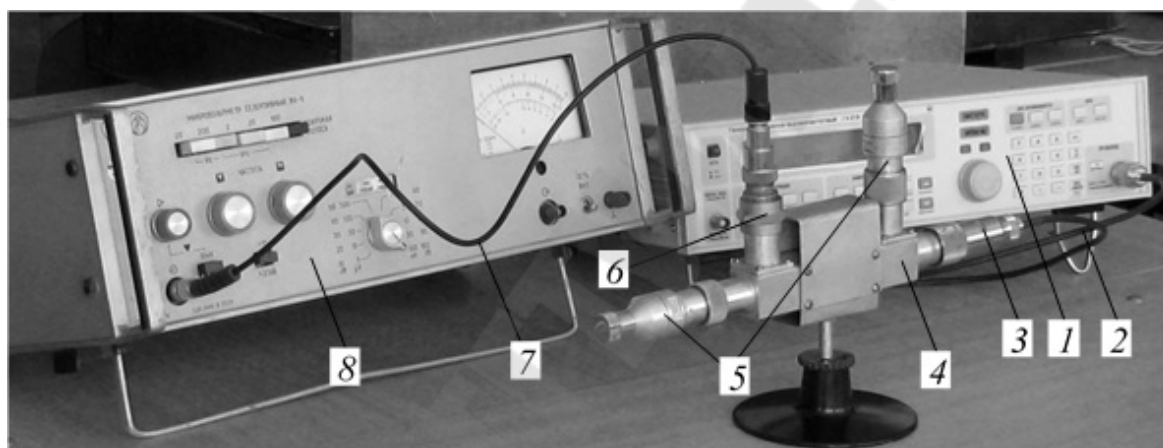


Рис. 4.3. Общий вид измерительной установки



Рис. 4.4. Структурная схема измерительной установки

Исследуемый направленный ответвитель представляет собой ответвитель на связанных коаксиальных линиях (п. 4.1). Нумерация входов направленного ответвителя соответствует нумерации на рис. 4.1.

Высокочастотный сигнал заданной частоты подается с генератора через аттенуатор на плечо 1 направленного ответвителя. К плечу 3 при этом подключена согласованная нагрузка. Часть высокочастотной мощности ответвляется в плечо 2. В плече 4 при достаточной развязке между ним и плечом 1 и при качественной согласованной нагрузке мощность должна быть близка к нулю. Информация о частоте сигнала снимается по шкале генератора. Информация о параметрах направленного ответвителя снимается по измерителю амплитуды волны, состоящему из детекторной секции и индикатора. При измерении амплитуды волны на одном из плеч направленного ответвителя на другие плечи включаются согласованные нагрузки. Генератор работает в режиме внутренней амплитудной модуляции. Индикатором является вольтметр, работающий в селективном режиме.

### **4.3. Домашнее задание**

1. По данному методическому указанию и техническому описанию изучить правила работы с используемыми в работе измерительными приборами.

2. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить теоретический материал по теме лабораторной работы и ответить на контрольные вопросы.

3. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить конструкции, принципы действия и характеристики коаксиальных согласованных нагрузок и направленных ответвителей.

### **4.4. Экспериментальное задание и порядок его выполнения**

1. Собрать лабораторный стенд. Включить тумблеры питания и дать прогреться измерительным приборам в течение 15 мин.

2. Включить измеритель амплитуды на третье плечо направленного ответвителя, в плечи 2 и 4 включить согласованные нагрузки. Включить на генераторе режим внутренней амплитудной модуляции и установить частоту модулирующего колебания 1 кГц и глубину амплитудной модуляции 60–70 %. Установить частоту несущего колебания генератора равной минимальной  $f_{\text{мин}}$  из заданного диапазона частот (табл. 4.1 или табл. 4.2). Включить СВЧ сигнал на выходе генератора (входе НО) и установить уровень выходного сигнала 100 мВ.

3. Настроить вольтметр, для этого включить селективный режим, включить частотный диапазон, в котором содержится частота 1 кГц.

Таблица 4.1

## Исходные данные для группы ПС-41

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f_{\text{мин}}$ , МГц	100	200	300	400	500	600	150	250
$f_{\text{макс}}$ , МГц	300	400	500	600	700	800	350	450

Таблица 4.2

## Исходные данные для группы ПС-42

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f_{\text{мин}}$ , МГц	125	225	325	425	525	575	475	375
$f_{\text{макс}}$ , МГц	325	425	525	625	725	775	675	575

Первоначальное обнаружение сигнала проводите на самом нечувствительном поддиапазоне 100 мВ.

С помощью ручек грубой и точной настройки частоты настройтесь на частоту входного сигнала, добившись максимальных показаний индикатора. При этом, чтобы стрелка вольтметра не зашкаливала, пользуйтесь ручкой регулировки чувствительности прибора. Далее положения ручек настройки частоты не изменять.

Установите уровень выходного сигнала на выходе генератора такой, чтобы на поддиапазоне вольтметра 100 мВ его показание было на отметке 100 мВ.

4. В диапазоне частот от  $f_{\text{мин}}$  до  $f_{\text{макс}}$  измерить переходное затухание направленного ответвителя  $C_{12}$ . Для этого:

– переключите детектор с вольтметром к плечу 2, на плечо 3 включите согласованную нагрузку;

– установите на генераторе частоту  $f_{\text{мин}}$ ;

– измерьте амплитуды  $U_2$  сигнала в плече 2;

– измерение произвести для всех частот из диапазона от  $f_{\text{мин}}$  до  $f_{\text{макс}}$  с шагом  $\Delta f = 25$  МГц;

5. Измерить направленность  $C_{24}$ . Для этого:

– переключить вольтметр к плечу 4, отсоединив с него согласованную нагрузку и установив ее к плечу 3;

– измерить амплитуды сигнала в плече 4  $U_4$  в том же диапазоне частот;

6. Определить амплитуду сигнала в плече 1 (плече 3)  $U_1$ . Для этого:

– к плечам 2 и 4 присоедините согласованные нагрузки, а вольтметр подключите к плечу 3;

– измерьте сигнал  $U_1$  в том же диапазоне частот.

7. Все измерения занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

#### Результаты измерений

Измеряемые величины	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	...
$f_i$						
$U_2$						
$U_4$						
$U_1$						
$C_{12}$						
$C_{24}$						

Здесь же привести результаты расчета переходного затухания и направленности. При расчете считать характеристику детекторной секции квадратичной.

8. Рассчитать средние значения  $C_{12}$  и  $C_{24}$  и их значения в децибелах.

9. Построить зависимости  $C_{12}$  и  $C_{24}$  от частоты  $f$ .

#### 4.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

– цель работы;

– эскиз волноводного аттенюатора;

– определение основных измеряемых параметров;

– блок-схему измерительной установки с указанием назначения отдельных блоков;

– протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем;

– частотные характеристики исследованных параметров направленного ответвителя;

– выводы по работе. В выводах необходимо проанализировать результаты измерений, сравнить полученные характеристики с ожидаемыми теоретическими, указать возможные причины расхождения.

#### 4.6. Контрольные вопросы

1. Какое устройство называется направленным ответвителем?
2. Для чего применяются направленные ответвители?
3. Что такое коэффициент связи и переходное ослабление?
4. Что такое направленность направленного ответвителя?
5. Каковы параметры идеального направленного ответвителя?
6. Структурная схема измерительной установки.
7. Назначение отдельных узлов измерительной установки.
8. Какова последовательность настройки лабораторного стенда?
9. Как настраивается генератор измерительной установки?
10. Как настраивается индикатор измерительной установки?
11. Что такое детекторная секция? Как в лабораторной работе учитывается ее характеристика?
12. Зачем к плечам направленного ответвителя, не подключенным к генератору и измерителю, необходимо подключать согласованные нагрузки?
13. Как правильно включать и выключать измерительные приборы лабораторной установки?
14. Для чего в лабораторной установке необходим коаксиальный переходник-аттенюатор?
15. Как обеспечивается электромагнитная связь между линиями передачи направленного ответвителя?
16. Что такое направленный ответвитель с малой связью? Где он используется?
17. Как в исследуемом направленном ответвителе обеспечивается развязка между входным и выходным нерабочим плечом?
18. Каковы фазовые соотношения между напряжениями в выходных плечах исследуемого направленного ответвителя?
19. Как определить КСВ входа исследуемого направленного ответвителя?
20. Что такое трехдецибельный направленный ответвитель? Где он используется?
21. Каковы элементы матрицы рассеяния направленного ответвителя?

#### 4.7. Литература

1. Сазонов, Д. М. Устройства СВЧ : учеб. пособие / Д. М. Сазонов, А. Н. Гридин, Б. А. Мишустин ; под ред. Д. М. Сазонова. – М. : Высш. шк., 1981. – 295 с. : ил.

2. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978. – 429 с.

3. Конспекты лекций по дисциплинам «Устройства СВЧ» и «Техническая электродинамика».

## **Лабораторная работа № 5** **ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРИТОВОГО ВЕНТИЛЯ**

**Цель работы:** изучить принципы работы и основные электрические характеристики ферритовых вентильных устройств СВЧ, ознакомиться с конструкцией, экспериментально исследовать характеристики вентиль с постоянным подмагничиванием.

### **5.1. Краткие сведения из теории**

Существует две группы устройств с ферритами. К первой группе относятся вентили, гираторы и циркуляторы. Вентиль – устройство, которое пропускает волну в одном направлении почти без отражения и ослабления, и поглощает волну с обратного направления. Вентили применяются для исключения влияния несогласованной нагрузки на генератор, а также в измерительных установках. Гиратор – устройство, сдвигающее фазу прямой и обратной волн на различный угол, отличающийся на  $180^\circ$ .

Циркулятор – многополюсник, в котором передача энергии происходит в одном направлении (например, для шестиполюсника на рис. 5.1 с входа 1 на вход 2, с входа 2 на вход 3, с входа 3 на вход 1).



*Рис. 5.1. Условные обозначения СВЧ устройств*

Вторая группа ферритовых устройств включает фазовращатели, выключатели, коммутаторы, аттенюаторы, делители мощности и фильтры. Все эти устройства управляемые. Их характеристики изменяются

регулированием или переключением тока в управляющих обмотках. Использование явления магнитного гистерезиса позволяет создать также ферритовые устройства с внутренней магнитной памятью. Перестройка таких устройств осуществляется одиночными импульсами тока.

### **Свойства ферритов**

Феррит – магнитоэлектрический материал с  $\varepsilon \approx 10$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 10^{-2}-10^{-3}$ . Феррит обладает гиромангнитным свойством – способностью поворачивать вектор (плоскость) поляризации электромагнитной волны, проходящей сквозь него. Различают различные кристаллические структуры ферритов. Обязательным для всех ферритов является содержание окислов железа. Путем спекания окислов железа с оксидами никеля, цинка или других металлов при температурах в 1000 °С и выше получают ферритовые материалы различной формы и различных свойств. Материал феррита прочный и напоминает керамику. Ферритам присуща спонтанная намагниченность, проявляющаяся в отдельных микроскопических областях, которые называются доменами. В разных доменах вектора суммарной намагниченности ориентированы хаотично и суммарный магнитный момент ферритового образца в отсутствие внешнего магнитного поля равен нулю. В магнитном поле состояние феррита характеризуется вектором намагниченности  $M$ . При этом величина  $X = M/H$  называется магнитной восприимчивостью,  $B = \mu_0(M + H)$  – вектором магнитной индукции, а  $\mu$  – магнитной проницаемостью. Величина магнитной проницаемости для ферритов  $\mu \gg 1$ . Зависимость магнитной индукции  $B$  (а значит  $\mu$ ) от напряженности  $H$  магнитного поля не является линейной. Ферритам присуще явление гистерезиса – различной величины  $B$  при намагничивании и размагничивании ферритового образца.

На рис. 5.2, а показана типичная зависимость магнитной индукции  $B$  от величины напряженности магнитного поля  $H$ . Намагниченность ферритов падает с повышением температуры вследствие того, что тепловое движение разрушает их доменную ориентацию вдоль внешнего поля. При достижении температуры  $T_k$  (температуры Кюри) магнитная восприимчивость становится равной нулю (рис. 5.2, б). Для различных ферритов  $T_k$  – 200–500 °С.

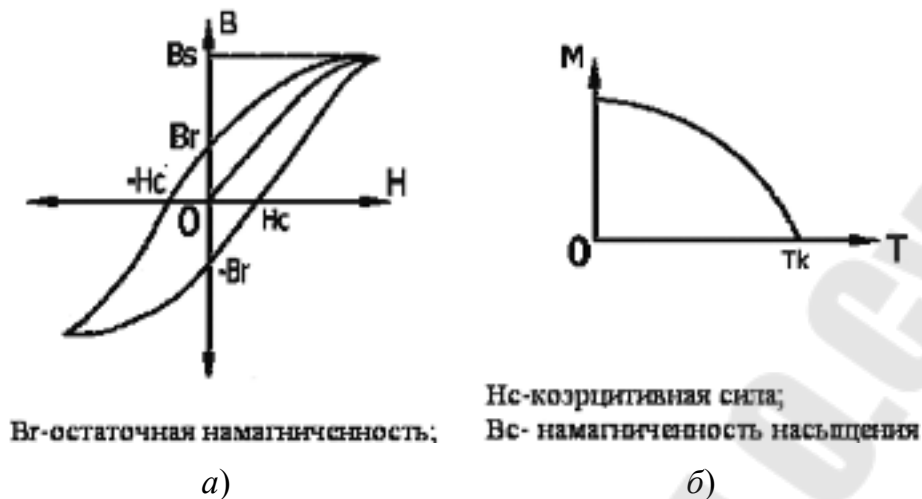


Рис. 5.2. Электрические характеристики феррита:  
 а – зависимость  $B(H)$ ; б – зависимость намагниченности от температуры

Из курса физики известно, что электроны обладают орбитальными магнитными моментами, создаваемыми их перемещениями по орбитам вокруг ядер атомов, и спиновыми магнитными моментами, обусловленными вращением электронов вокруг своей оси. Образование магнитных свойств веществ обусловлено спиновыми магнитными моментами электронов. Однако ферромагнетизм возникает только у тех веществ, у которых имеются незаполненные внутренние энергетические уровни в атоме, благодаря особому взаимодействию электронов (обменному), находящихся на этих уровнях.

В магнитном поле возникают силы, стремящиеся ориентировать вектор намагниченности и связанный с ним механический момент в направлении поля. Это приводит к прецессии механического (подобно тому, как происходит прецессия волчка в механике) момента и, вслед за ним, магнитного момента вокруг направления внешнего поля с определенной частотой  $\omega_0$ . Значение  $\omega_0$  может быть определено для большинства ферритов по следующей эмпирической формуле:

$$\omega_0 = 1380 \cdot 10^6 H_0. \quad (5.1)$$

При плавном изменении частоты СВЧ поля, приложенного к образцу перпендикулярно постоянному магнитному полю  $H_0$ , в случае равенства ее частоты с  $\omega_0$  возникает резонансное поглощение электромагнитной энергии СВЧ поля. Это явление называется ферромагнитным резонансом. Величина высокочастотной восприимчивости  $\chi$  определяется выражением



$$\chi = \frac{\chi_0}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}. \quad (5.2)$$

Здесь  $\chi$  – восприимчивость в поле  $H_0$  в отсутствие СВЧ поля ( $\omega = 0$ ).

Согласно (5.2), величина  $\chi$  резко возрастает при приближении  $\omega$  к  $\omega_0$ . Вследствие затухания при  $\omega = \omega_0$   $\chi$  конечна и ее зависимость от  $\omega$  имеет вид, показанный на рис. 5.3.

Так как прецессия электронного спина происходит всегда по часовой стрелке относительно направления поля, то спины будут оказывать различное влияние на распространяющуюся вдоль поля волну круговой поляризации в зависимости от направления вращения вектора напряженности электрического поля этой волны. Исходя из этого, магнитная проницаемость феррита различна для право- ( $\mu+$ ) и лево- ( $\mu-$ ) поляризованных по кругу волн. С изменением направления распространения волн также изменяется величина магнитной проницаемости. Качественная зависимость  $\mu+$  и  $\mu-$  от  $H_0$  представлена на рис. 5.3, б. Линейно-поляризованная волна, которая может быть представлена в виде суммы двух поляризованных по кругу навстречу друг другу волн, будет изменять ориентацию плоскости поляризации при распространении вдоль внешнего магнитного поля (эффект Фарадея). Важно отметить, что направление поворота плоскости поляризации связано лишь с направлением постоянного магнитного поля и не зависит от того, в какую сторону движется волна.

При распространении волны в феррите в направлении, перпендикулярном постоянному полю, она распадается на волну, постоянная распространения которой зависит от напряженности магнитного поля, и на волну с независимой постоянной распространения. В процессе распространения между этими волнами возникает разность фаз, так как они имеют различные фазовые скорости. Вид поляризации волны при этом меняется вдоль направления распространения. Это явление носит название двойного лучепреломления. При поперечном магнитном поле наблюдается также ферромагнитный резонанс, при этом происходит поглощение волны, постоянная распространения которой зависит от поля. Поперечный резонанс наблюдается при меньших напряженностях полей, чем продольный.

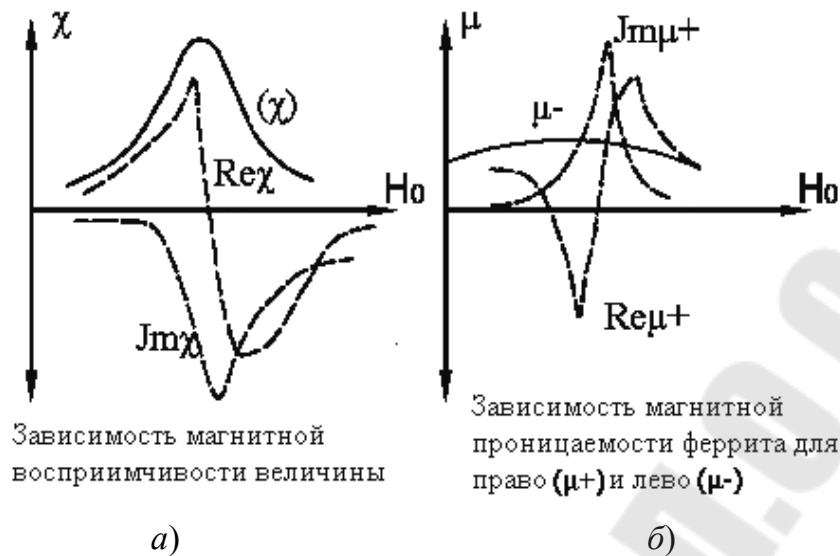


Рис. 5.3. График зависимости магнитной восприимчивости (а) и магнитной проницаемости (б)

Вентиль с поперечно-намагниченными ферритами приведен на рис. 5.4.

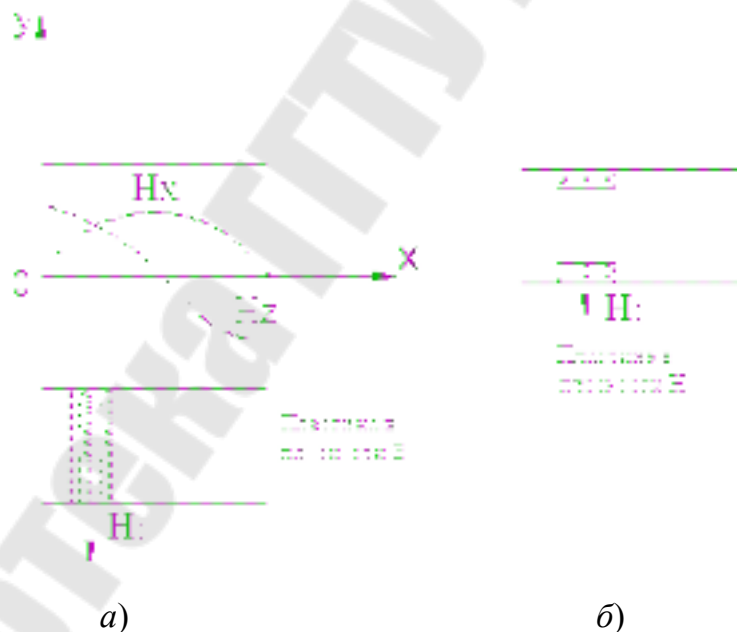


Рис. 5.4. Выбор места установки ферритовой пластины в прямоугольном волноводе

Как известно из курса электродинамики, распространяющиеся в волноводах  $H$ -волны имеют продольные и поперечные составляющие вектора  $H$ , сдвинутые друг относительно друга по фазе на  $90^\circ$ . Законы распределения амплитуд этих волн различны. Для волны  $H_{10}$  в прямо-

угольном волноводе вектор  $\mathbf{H}$  имеет составляющие  $H_x$  и  $H_z$  (рис. 5.4), которые с точностью до постоянного множителя равны:

$$H_x = \frac{j\beta a}{\pi} \sin \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z}; \quad H_z = \cos \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z}, \quad (5.3)$$

где  $\beta = 2\pi/\lambda_B$  – коэффициент распространения волны в волноводе;  $\lambda_B$  – длина волны в волноводе;  $a$  – размер поперечного сечения волновода по оси  $X$ .

В волноводе существуют области, в которых амплитуды продольных и поперечных составляющих равны между собой. Вследствие сдвига их на  $90^\circ$  в этих точках волна имеет круговую поляризацию. Равенство амплитуд (5.3) получается в продольных плоскостях  $x = x_0$

и  $x = a - x_0$ , где  $x_0 = \frac{a}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\pi}{2a}$ . На рис. 5.4 эти области отмечены

пунктирными линиями. Направление вращения зависит от направления распространения волны и различно в соседних сечениях. Если в прямоугольном волноводе на участке с вращающимся полем  $H$  поместить продольную ферритовую пластину и создать поперечное постоянное поле  $H_0$ , то внутри пластины для волн, распространяющихся в различных направлениях, будет различная магнитная проницаемость  $\mu_+$  и  $\mu_-$  (рис. 5.3, б). Если величина поперечного подмагничивания равна полю гиромангнитного резонанса для поляризованной волны, то волна левополяризованная проходит по волноводу с незначительным затуханием, а отраженная волна вследствие смены направления вращения поляризации интенсивно затухает.

Существует две конструкции резонансных вентиляей на прямоугольном волноводе. Размещение ферритовой пластины в  $E$ -плоскости (рис. 5.4, а) требует менее сильного постоянного магнита, чем при расположении в плоскости  $H$  (рис. 5.4, б). Для высокоомощных вентиляей с целью обеспечения интенсивного отвода тепла размещают две пластины в плоскости  $H$ .

Существование гиромангнитного резонанса и его частота определяются величиной поля  $H_0$ . Место установки феррита в волноводе определяется этими же параметрами в совокупности. Отсюда следует узкополосность резонансного вентиля. Некоторое расширение полосы достигается дополнительным введением диэлектрической пластины, скрепленной с ферритом (рис. 5.5).

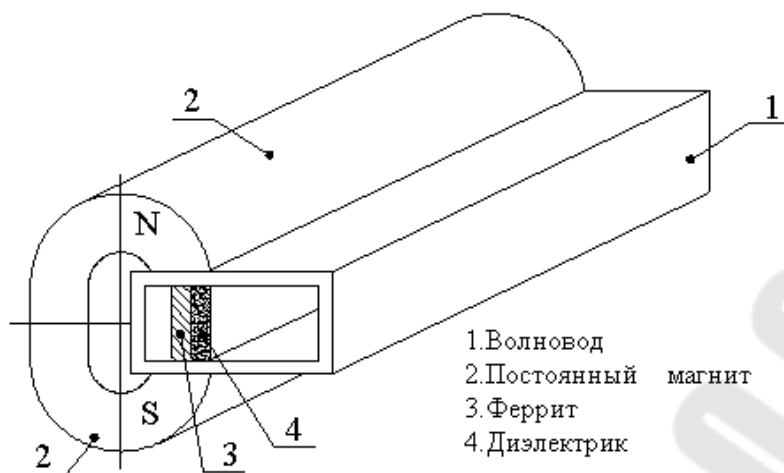


Рис. 5.5. Ферритовый резонансный вентиль

Имеются также резонансные вентили для коаксиальных и плосковых линий. Для этих линий первоначально применяют специальные меры для создания продольной составляющей поля  $\mathbf{H}$ , отсутствующей в структуре  $TEM$ -волны. Такое изменение структуры поля достигается введением внутрь линии передачи диэлектрического вкладыша (рис. 5.6). Подбором формы, размеров и диэлектрической проницаемости вкладыша удастся добиться, чтобы вектор  $\mathbf{H}$  возле его поверхности был поляризован по кругу (вращение векторов  $\mathbf{H}$  падающей и отраженной волн происходит в противоположных направлениях). Резонансный вентиль получается благодаря расположению намагниченной ферритовой пластины в области с вращающимся вектором  $\mathbf{H}$ , причем направление постоянного магнитного поля  $H_0$  выбирается перпендикулярным плоскости, в которой вращается вектор  $\mathbf{H}$ , а величина  $H_0$  соответствует области ферромагнитного резонанса. Диапазон рабочих частот коаксиальных и плосковых резонансных вентилях, в которых используются диэлектрические вкладыши, определяется шириной области ферромагнитного резонанса феррита и может соответствовать даже двукратному изменению частоты. В диапазоне рабочих частот затухание в прямом направлении составляет 1–1,5 дБ, в обратном направлении составляет 15–20 дБ.

Основным недостатком подобных вентилях является довольно большое затухание в прямом направлении, обусловленное потерями в диэлектрическом вкладыше. Кроме того, общим недостатком вентилях с резонансным поглощением является необходимость иметь высокие значения напряженности поля подмагничивания  $H_0$  и, как следствие этого, большую массу постоянного магнита. Снизить величину  $H_0$

удается в вентилях со смещенным полем. В таких вентилях (рис. 5.7) ферритовую пластинку размещают в области волновода с вращающимся магнитным полем, но  $H_0$  выбирают таким, чтобы магнитная проницаемость правовращающейся волны была отрицательной. В этом случае волна внутри феррита не распространяется и вытесняется из него (рис. 5.7, слева).

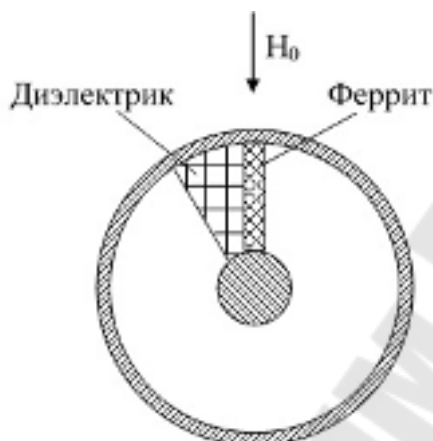


Рис. 5.6. Коаксиальный резонансный вентиль

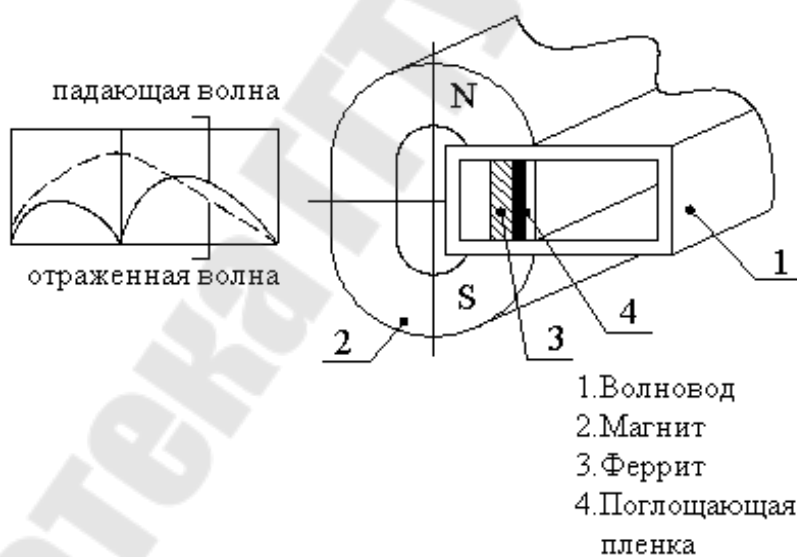


Рис. 5.7. Вентиль со смещением поля

Отраженная левовращающаяся волна, для которой  $\mu > 0$ , концентрируется вследствие большого значения  $\mu$  и  $\epsilon$  вблизи пластины. На поверхность пластины наносят поглощающую металлическую пленку, в которой интенсивно затухает отраженная волна. На падающую волну, вследствие ее вытеснения, пленка влияет слабо. Такие

вентили имеют большую широкополосность, но работают только при сравнительно низких уровнях мощности. Подобные конструкции вентилях со смещением поля имеются и для линий передач других типов.

## 5.2. Описание лабораторной установки

В работе исследуется коаксиальный ферритовый вентиль с поперечным направлением намагничивающего магнитного поля (рис. 5.6).

Общий вид лабораторной установки представлен на рис. 5.8. Установка состоит из панорамного измерителя КСВ и ослаблений 1, коаксиальных переходов 2, исследуемого вентиля 3.

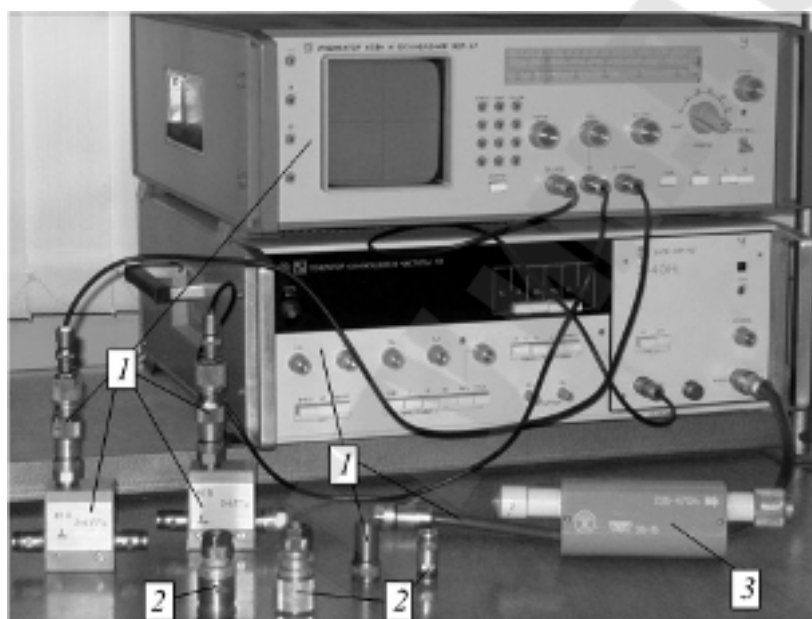


Рис. 5.8. Общий вид измерительной установки

На рис. 5.9 приведена структурная схема установки для измерения КСВ и ослабления вентиля. На схеме обозначены: ГКЧ – генератор качающей частоты; Я2Р-67 – индикаторный блок; НО1 и НО2 – направленные ответвители; Д – детекторы; Нагр – согласованная нагрузка; П – исследуемый ферритовый вентиль.

В режиме калибровки измерителя КСВ и ослаблений направленный ответвитель 2 соединяется с направленным ответвителем 1 через соединитель I (т. е. непосредственно). В режиме измерения ослаблений вместо соединителя I включается исследуемый ферритовый вентиль П. В режиме измерения КСВ после калибровки прибора направленный ответвитель НО2 включается в обратном порядке непосредственно к направленному ответвителю НО1, исследуемый вентиль с согласованной нагрузкой на выходе включается вместо нагрузки.

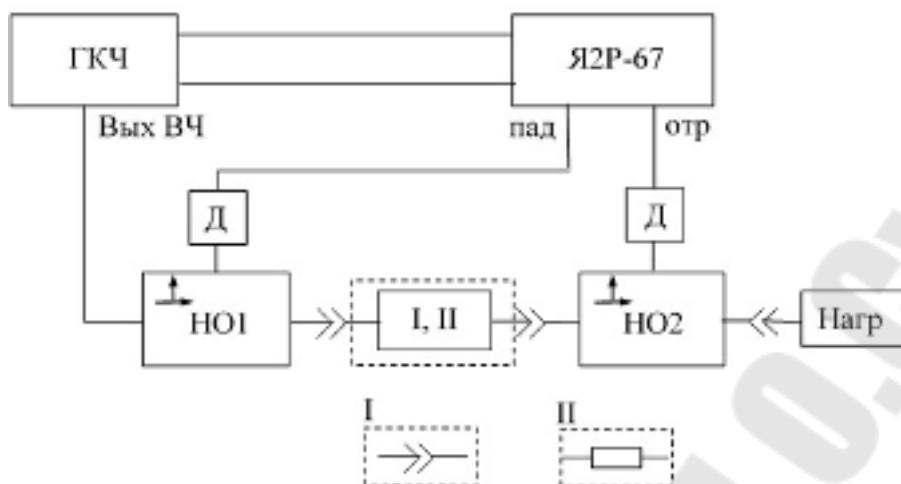


Рис. 5.9. Структурная схема измерительной установки

Исследуемый ферритовый вентиль подключается к измерительной схеме через коаксиальные переходники, имеющие разное поперечное сечение на входе и выходе. Переходники позволяют включать вентиль в разном направлении при измерении ослаблений, а также измерять КСВ любого входа вентиля.

### 5.3. Домашнее задание

1. По данному методическому указанию и техническому описанию изучить принципы действия панорамного измерителя КСВ и ослаблений и правила работы с ним.

2. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить теоретический материал по теме лабораторной работы и ответить на контрольные вопросы.

3. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить конструкции, принципы действия и характеристики ферритовых коаксиальных вентилях, коаксиальных переходов согласованных нагрузок и направленных ответвителей.

### 5.4. Экспериментальное задание и порядок его выполнения

1. Собрать лабораторную установку согласно структурной схеме (рис. 5.9). Включить тумблеры питания и дать прогреться измерительным приборам в течение 15 мин.

2. Измерить в диапазоне частот от  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$  (табл. 5.1 или табл. 5.2) ослабление, вносимое всеми каскадно включенными коаксиальными переходами, для чего:

а) откалибровать измеритель КСВ и ослаблений для измерения ослаблений согласно инструкции по эксплуатации (лабораторная работа № 1);

б) между направленными ответвителями включить коаксиальные переходы и к выходу направленного ответвителя НО2 присоединить согласованную нагрузку;

в) измерить ослабление, вносимое коаксиальными переходами, построить график зависимости ослабления от частоты.

Таблица 5.1

#### Исходные данные для группы ПС-41

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f_{\text{мин}}$ , ГГц	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	2,12
$f_{\text{макс}}$ , ГГц	3	3,15	3,3	3,45	3,6	3,75	4	3,12

Таблица 5.2

#### Исходные данные для группы ПС-42

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f_{\text{мин}}$ , ГГц	2,37	2,62	2,87	3,12	3,37	2	2	2
$f_{\text{макс}}$ , ГГц	3,17	3,42	3,5	3,65	3,87	3,3	3,7	4

3. Измерить в диапазоне частот от  $f_{\text{мин}}$  до  $f_{\text{макс}}$  (табл. 5.1 или табл. 5.2) ослабление, вносимое ферритовым вентилем для прямого и обратного направлений пропускания, для чего:

а) при помощи коаксиальных переходов установить ферритовый вентиль между направленными ответвителями падающей и отраженной волн (вентиль ориентировать на прямое прохождение волны). Измерить ослабление, вносимое вентилем;

б) выполнить п. 2а при ориентации вентиля на обратное прохождение волны;

в) зарисовать полученные зависимости.

4. Измерить в диапазоне частот от  $f_{\text{мин}}$  до  $f_{\text{макс}}$  (табл. 5.1 или табл. 5.2) КСВ ферритового вентиля для прямого и обратного направления пропускания электромагнитной волны (входа и выхода вентиля), для чего:

а) откалибровать измеритель КСВ и ослаблений для измерения КСВ согласно инструкции по эксплуатации (лабораторная работа № 1);



б) при помощи коаксиального перехода присоединить ферритовый вентиль, ориентированный на прямое прохождение волны (указано стрелкой) к направленному ответвителю отраженной волны. К выходу вентиля присоединить согласованную нагрузку;

в) измерить КСВ ферритового вентиля;

в) выполнить измерения по пп. 3б и 3в при ориентации вентиля на обратное прохождение волны;

г) зарисовать полученные зависимости.

### 5.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

– цель работы;

– эскиз волноводного аттенюатора;

– определение основных измеряемых параметров;

– блок-схему измерительной установки с указанием назначения отдельных блоков;

– протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем;

– графики зависимости ослабления от частоты:

а) для каскадного соединения коаксиальных переходов;

б) для прямого и обратного направления распространения волны через вентиль;

– графики зависимости КСВ входов вентиля от частоты;

– выводы по работе. В выводах необходимо проанализировать результаты измерений, сравнить полученные характеристики с ожидаемыми теоретическими, указать возможные причины расхождения.

### 5.6. Контрольные вопросы

1. Что такое феррит?

2. Назовите основные свойства ферритов.

3. Что такое вентиль и каковы его свойства?

4. Из каких элементов состоит измерительный стенд? Каково их назначение?

5. Каково назначение детекторной головки, ее действие?

6. Каковы основные технические данные прибора типа Р2-53?

7. Как правильно включать и выключать генераторный и индикаторный блоки установки?

8. Для чего необходимы коаксиальные переходы в лабораторной установке?

9. Назначение органов управления ГКЧ.
10. Назначение органов управления индикатора.
11. Какова последовательность настройки измерительного стенда?
12. Что такое эффект Фарадея?
13. Каковы свойства волны при распространении в феррите в направлении, перпендикулярном постоянному намагничивающему полю?
14. В чем состоит преимущество вентиля со смещенным полем?
15. Почему при построении устройств на ферритах в линиях передачи с *ТЕМ*-волной требуется разрушение структуры поля этой волны?
16. Где в прямоугольном волноводе существуют области с круговой поляризацией поля?

### 5.7. Литература

1. Сазонов, Д. М. Устройства СВЧ : учеб. пособие / Д. М. Сазонов, А. Н. Гридин, Б. А. Мишустин ; под ред. Д. М. Сазонова. – М. : Высш. шк., 1981. – 295 с. : ил.
2. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978. – 429 с.
3. Конспекты лекций по дисциплинам «Устройства СВЧ» и «Техническая электродинамика».

## *Лабораторная работа № 6* **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ**

**Цель работы:** изучить основные принципы работы и параметры фазовращателей, ознакомиться с конструктивным исполнением волноводных фазовращателей, экспериментально исследовать характеристики фазовращателей.

### 6.1. Краткие теоретические сведения

Фазовращатель является управляющим устройством, предназначенным для регулирования фазы СВЧ сигналов.

Отражательные фазовращатели – двухполюсники с коэффициентом отражения  $\rho = |\rho| e^{-j\psi}$ , фазу коэффициента отражения  $\psi$  которых можно изменять плавно или ступенчато, а модуль коэффициента отражения  $|\rho|$  близок к единице. В идеале отражательный фазовраща-

тель представляет собой переменное реактивное сопротивление и может быть реализован в виде короткозамкнутого или разомкнутого шлейфа переменной длины. Проходные фазовращатели – согласованные четырехполюсники, в идеале реактивные, обладающие переменной фазой коэффициента передачи.

Фазовращатели бывают плавными – с непрерывным изменением фазы и ступенчатыми, в которых фаза принимает фиксированные значения, различающиеся на постоянную величину  $\Delta\psi$  – дискрет фазы.

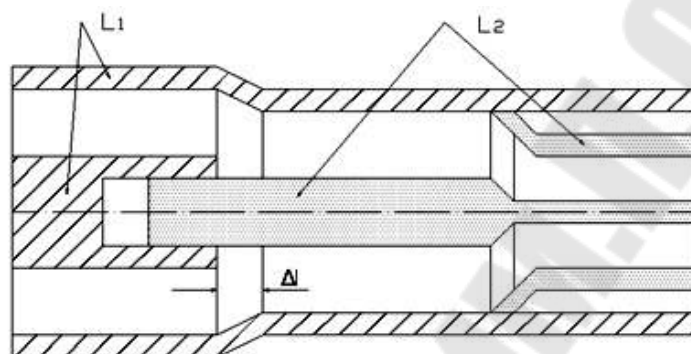


Рис. 6.1. Фазовращатель типа «Трамбон»

В механических фазовращателях проходного типа изменение электрической длины отрезков линии передачи можно осуществлять путем регулировки их геометрической длины или с помощью изменения коэффициента фазы. Простейшим таким фазовращателем является фазовращатель, известный под названием «Трамбон». Этот фазовращатель предназначен для жесткого коаксиального тракта. Схема фазовращателя типа «Трамбон» показана на рис. 6.1.

Для обеспечения согласования точки скользящих контактов во внутреннем и внешнем проводниках коаксиального волновода они разнесены по продольной координате так, что на всех стыкуемых между собой отрезках линии передачи сохраняется одинаковое отношение диаметров внешнего и внутреннего проводников, т. е. обеспечивается постоянное волновое сопротивление. Дополнительная компенсация отражений на стыках производится небольшим смещением ступенек  $\Delta l$  во внутреннем и внешнем коаксиальных проводниках.

Величина фазового сдвига рассмотренного фазовращателя равна:

$$\Delta\psi = kl = \frac{2\pi l}{\lambda}, \quad (6.1)$$

где  $l$  – изменение длины фазовращателя при регулировке;  $\lambda$  – длина волны.

Волноводные фазовращатели с изменением коэффициента фазы волны  $H_{10}$  прямоугольного волновода показаны на рис. 6.2.

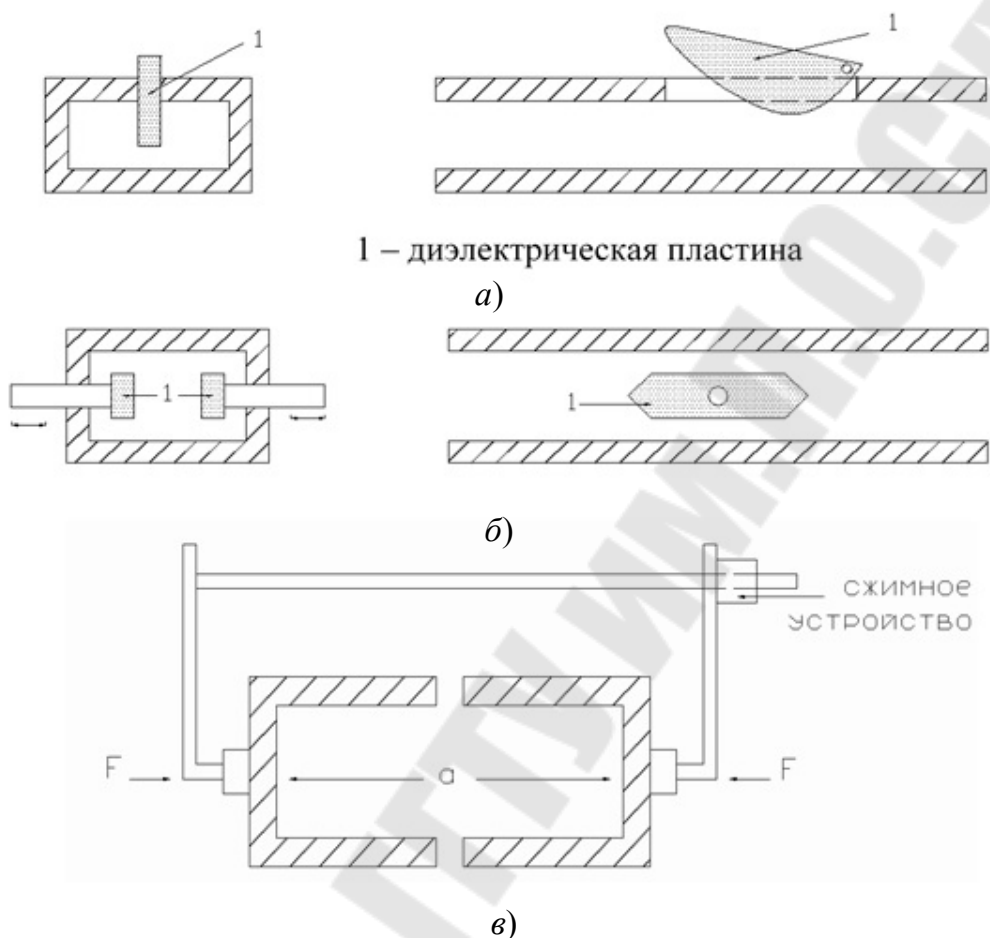


Рис. 6.2. Некоторые типы волноводных фазовращателей

В конструкции (рис. 6.2, а) диэлектрическую пластинку погружают параллельно силовым линиям поля  $E$  в прямоугольный волновод через неизлучающую продольную щель в середине широкой стенки, что приводит к замедлению волны и увеличению запаздывания на выходе фазовращателя. Скосы на краях диэлектрической пластины играют роль плавных переходов, обеспечивающих согласование фазовращателя. Подбором формы скосов можно изменять вид зависимости вносимого фазового сдвига от глубины погружения пластины. В конструкции (рис. 6.2, б) диэлектрическая пластина (одна или две пластины) перемещается от края к центру волновода держателем, пропущенным через отверстие в боковой стенке волновода. При продвижении пластины в область большей концентрации поля  $E$  (к центру волновода) увеличивается замедление волны в волноводе

и растет запаздывание, вносимое фазовращателем. Края пластины скошены для уменьшения отражений.

В конструкции (рис. 6.2, в) волновод выполнен из упругого металла и в середине широких стенок прорезаны неизлучающие продольные щели. Под действием внешнего усилия  $F$ , приложенного к боковым стенкам волновода, ширина волновода  $a$  изменяется, что приводит к изменению критической длины волны  $\lambda_{кр} = 2a$  и фазовой скорости волны  $H_{10}$  (сжатие волновода уменьшает запаздывание фазы).

Действительно, существует общая зависимость между длиной волны в волноводе  $\lambda_B$ , длиной волны в свободном пространстве  $\lambda$  и критической длиной волны  $\lambda_{кр}$ , справедливая для волноводов с любой формой поперечного сечения:

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{кр})^2}}. \quad (6.2)$$

Тогда набег фазы на участке длиной  $l$  при изменении поперечного сечения волновода с  $a_1$  до  $a_2$  составит:

$$\Delta\psi = k_1 l - k_2 l = 2\pi l \left( \frac{1}{\lambda_{в1}} - \frac{1}{\lambda_{в2}} \right) = 2\pi \frac{l}{\lambda} \left[ \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{2a_1} \right)^2} - \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{2a_2} \right)^2} \right]. \quad (6.3)$$

Наибольший фазовый сдвиг достигается, когда длина волны в свободном пространстве  $\lambda$  близка к критической, однако в этом случае резко возрастает затухание в волноводе.

## 6.2. Описание лабораторной установки и метода измерений

Общий вид лабораторной установки и ее структурная схема представлены на рис. 6.3 и 6.4, соответственно. Установка состоит из генератора СВЧ колебаний 1, вентиля (встроен в генератор), измерительной линии 2, исследуемого фазовращателя 3 с короткозамыкателем 4, индикатора (вольтметра) 5, соединительных отрезков линии передачи 6 и коаксиально-волноводного перехода 7.

Исследуемый в работе фазовращатель представляет собой отрезок прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной внутри. Пластина располагается параллельно оси волновода и перемещается вдоль широкой стенки волновода (аналогично рис. 6.2, б).

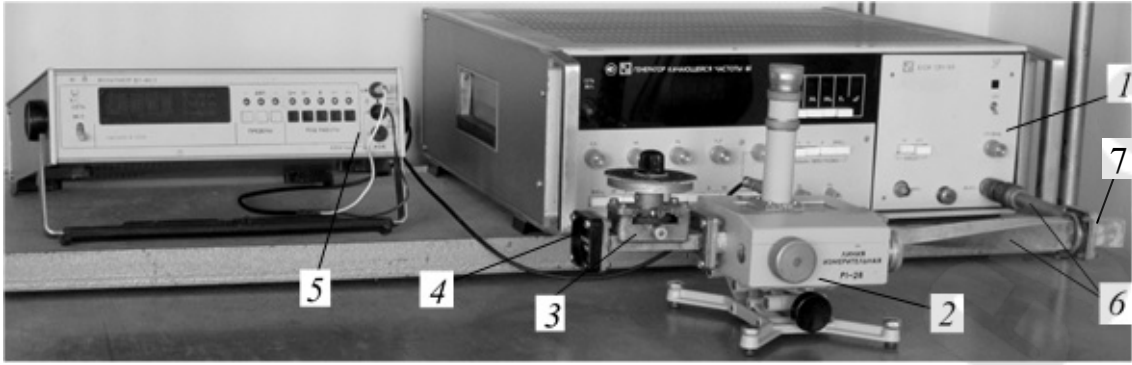


Рис. 6.3. Лабораторная установка



Рис. 6.4. Блок-схема измерительной установки

Высокочастотный сигнал заданной частоты поступает от генератора СВЧ через развязывающий вентиль и измерительную линию на исследуемый фазовращатель. Измерительная линия служит для измерения фазового сдвига между сигналами, распространяющимися в противоположных направлениях. Для этого выход фазовращателя замкнут на короткозамкнутую нагрузку.

Измерение фазового сдвига выполняется следующим образом. После калибровки измерительной линии и индикатора на выход линии включается короткозамыкатель. Перемещается каретка вдоль линии и определяется положение узла напряженности, ближайшего ко входу линии (к генератору). Между короткозамыкателем и измерительной линией включается исследуемый фазовращатель. Смещение узла напряженности в сторону фазовращателя определяет фазовый сдвиг, вносимый фазовращателем:

$$\Delta\psi = k \cdot \Delta l = \frac{2\pi \cdot \Delta l}{\lambda_{\text{в}}}; \quad \lambda_{\text{в}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2}}. \quad (6.4)$$

### 6.3. Домашнее задание

1. По данному методическому указанию и техническому описанию изучить принципы действия измерительных приборов и правила работы с ними.

2. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить теоретический материал по теме лабораторной работы и ответить на контрольные вопросы.

3. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить конструкции, принципы действия и характеристики механических фазовращателей.

4. Рассчитать фазовую задержку в отрезке прямоугольного волновода (фазовращателе при нулевом положении указателя) сечением  $23 \times 10$  мм и длиной 90 мм. Частота колебания  $f$  приведена в табл. 6.1 или табл. 6.2.

Таблица 6.1

Исходные данные для группы ПС-41

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f$ , ГГц	8	9	10	11	12	11,75	8,5	9,5
$N$	80	40	20	30	50	60	70	90

Таблица 6.2

Исходные данные для группы ПС-42

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f$ , ГГц	10,5	11,5	9,25	8,25	11,25	8,75	9,75	10,75
$N$	85	45	25	35	55	65	75	95

### 6.4. Экспериментальное задание и порядок его выполнения

1. Соберите лабораторную установку согласно структурной схеме. Включите генератор СВЧ и вольтметр в сеть и прогрейте их в течение 15 мин. Далее использовать: режим работы генератора – непрерывная генерация, вольтметра – измерение постоянного напряжения.

2. Снятие градуировочной кривой фазовращателя:  
– установите на генераторе частоту, на которой выполнялся расчет;

– измерьте набег фазы сигнала  $\Delta\psi_0$  при нулевом значении указателя фазовращателя (п. 6.2), при этом используйте формулу (6.4); сравните полученный результат с расчетным;

– увеличивая значение указателя фазовращателя от нуля до 100 через 10 делений, измерьте набег фазы сигнала по отношению к значению фазы при нулевом положении указателя  $\Delta\psi_{i0}$ ;

– рассчитайте зависимость сдвига фаз, вносимого фазовращателем, (градуировочную кривую) по формуле  $\Delta\psi_i = \Delta\psi_0 + \Delta\psi_{i0}$ . Постройте полученную зависимость.

3. Постройте зависимость фазового сдвига фазовращателя от расстояния фазосдвигающей пластины до узкой стенки волновода. Расстояние пластины от узкой стенки волновода определяется как число делений указателя фазовращателя, деленное на 20.

4. Измерьте зависимость фазового сдвига, вносимого исследуемым фазовращателем, от частоты. Значение указателя фазовращателя  $N$  приведено в табл. 6.1 или табл. 6.2. Частоту сигнала генератора изменять от 8 до 12 ГГц через 250 МГц. При этом для каждой частоты аналогично п. 6.4.2 измеряются значения фазовых сдвигов  $\Delta\psi_0$  и  $\Delta\psi_{i0}$ . Постройте полученную зависимость.

### 6.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- блок-схему экспериментальной установки;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем;
- частотную характеристику фазовращателя;
- зависимость фазового сдвига, вносимого фазовращателем, от положения фазосдвигающей пластины;
- выводы по работе.

### 6.6. Контрольные вопросы

1. Какое устройство называется фазовращателем?
2. Что такое отражательный фазовращатель?
3. Что такое проходной фазовращатель?
4. Какие существуют конструкции волноводных механических фазовращателей?
5. Где используются фазовращатели?
6. Как зависит фазовый сдвиг, вносимый волноводным фазовращателем, от положения фазосдвигающей пластины в волноводе?



7. Какими диэлектрическими параметрами должна обладать фазосдвигающая пластина волноводного фазовращателя?
8. Как зависит фазовый сдвиг, вносимый волноводным фазовращателем, от длины фазосдвигающей пластины?
9. Как обеспечивается согласование входа и выхода волноводного фазовращателя?
10. Из каких элементов состоит измерительный стенд? Каково их назначение?
11. Как измерить фазовый сдвиг, вносимый фазовращателем?
12. Как связаны между собой режимы работы генератора и индикатора?
13. Какова последовательность настройки измерительного стенда?
14. Как включать и выключать используемые в работе измерительные приборы?
15. Как настраивается генератор измерительной установки?
16. Как настраивается индикатор измерительной установки?
17. Как калибровать измерительную линию?

## 6.7. Литература

1. Сазонов, Д. М. Устройства СВЧ : учеб. пособие / Д. М. Сазонов, А. Н. Гридин, Б. А. Мишустин ; под ред. Д. М. Сазонова. – М. : Высш. шк., 1981. – 295 с. : ил.
2. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978. – 429 с.
3. Конспекты лекций по дисциплинам «Устройства СВЧ» и «Техническая электродинамика».

## *Лабораторная работа № 7* **ФЕРРИТОВЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ ЦИРКУЛЯТОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

**Цель работы:** ознакомиться с принципами работы и конструкцией ферритовых циркуляторов и построением на их основе различных СВЧ-устройств – переключателей, регуляторов мощности и др.; экспериментально исследовать характеристики циркуляторов.

### 7.1 Краткие сведения из теории

В круглом волноводе наибольшее применение получили циркуляторы, в которых используется эффект Фарадея.

Важной частью этих устройств является невзаимный поляризатор. Он представляет собой отрезок круглого волновода (рис. 7.1), на оси которого с помощью диэлектрической (пенопластовой) втулки укреплен тонкий ферритовый стержень, заостренный с обоих концов для уменьшения отражений. Вокруг волновода расположен соленоид с током, создающий продольное намагничивание ферритового стержня. При распространении в волноводе волны  $H_{11}$ , имеющей в области расположения тонкого ферритового стержня поперечный и линейно поляризованный вектор  $\mathbf{H}$ , и при наличии продольного постоянного поля  $H_0$ , величина которого значительно меньше резонансного значения, в устройстве существуют условия для волноводного эффекта Фарадея, который состоит в невзаимном повороте структуры поля волны  $H_{11}$ . Пройдя вдоль стержня, линейно поляризованная волна  $H_{11}$  повернется вокруг оси поляризатора по часовой стрелке, если смотреть в направлении вектора  $\mathbf{H}_0$ , независимо от направления распространения волны, причем угол поворота определяется величиной  $H_0$  и длиной ферритового стержня.

На рис. 7.1, *а* изображен четырехплечный циркулятор, в котором используется эффект Фарадея. Прямоугольные одноволновые волноводы 2 и 4 повернуты вокруг оси поляризатора относительно одноволновых волноводов 1 и 3 на угол  $45^\circ$  по часовой стрелке, если смотреть в направлении от плеча 1 к плечу 2. Поляризатор создает поворот структуры поля  $H_{11}$  также на угол  $45^\circ$  по часовой стрелке, если смотреть в том же направлении (внутри феррита вектор  $\mathbf{H}_0$  направлен от плеча 1 к плечу 2).

Поступающая в прямоугольный волновод 1 волна  $H_{10}$  преобразуется в волну  $H_{11}$  круглого волновода, которая, проходя через поляризатор, поворачивается и затем преобразуется в волну  $H_{10}$ , выходящую из плеча 2 (рис. 7.1, *б*). При этом в волноводах 3 и 4 могли бы возбуждаться волны класса  $E$ . Однако, поскольку волноводы сделаны одноволновыми, этого не происходит.

При поступлении волны  $H_{10}$  в плечо 2 и распространении волны  $H_{11}$  в поляризаторе справа налево вновь происходит поворот структуры поля на  $45^\circ$  по часовой стрелке, в результате которого создаются условия для полного прохождения волны  $H_{10}$  в плечо 3 (рис. 7.1, *б*). Аналогичным образом из плеча 3 волна проходит в плечо 4, а из плеча 4 – в плечо 1 (рис. 7.1, *б*).

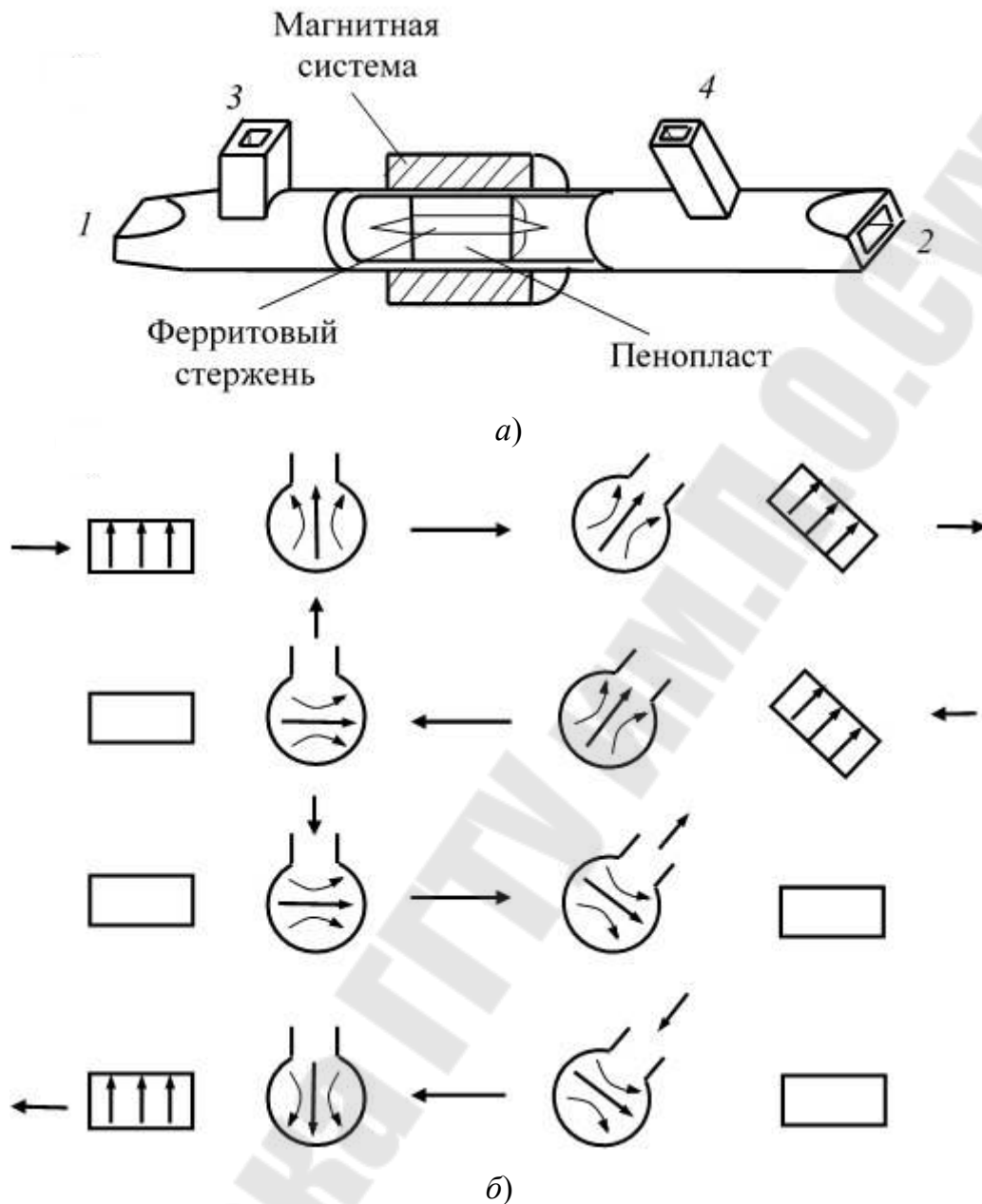


Рис. 7.1. Ферритовый циркулятор на круглом волноводе

При противоположном направлении намагничивающего поля  $H_0$  поляризатор поворачивает структуру поля  $H_{11}$  на  $45^\circ$  против часовой стрелки, если смотреть в направлении от плеча 1 к плечу 2 (поворот осуществляется по часовой стрелке относительно направления  $H_0$ ). В результате этого рассмотренная выше последовательность коммутации плеч  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$  заменяется на обратную  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ . Это обстоятельство используют для создания быстродействующих переключателей плеч, управляемых изменением направления тока соленоида. Таким переключателем может быть рассмотренный нами выше циркуля-

тор (без плеча 3), у которого направление передачи  $1 \rightarrow 2$  изменяется на  $1 \rightarrow 4$  при изменении направления тока.

Достоинством невзаимных ферритовых устройств, использующих эффект Фарадея, является малая величина намагничивающего поля  $H_0$ . Это обстоятельство, в частности, позволяет получить весьма быстродействующие переключатели, производящие переключение каналов за время около 0,15 мкс. Основными недостатками устройств, использующих эффект Фарадея, являются сравнительная сложность конструкции, большие габариты, трудность обеспечения хорошего согласования переходов от прямоугольных волноводов 3 и 4 (рис. 7.1, а) к круглому, необходимость применения длинных соленоидов.

В большинстве случаев более простым и компактным оказывается волноводный трехплечный Y-циркулятор (рис. 7.2). Такой циркулятор часто состоит из симметричного тройника в плоскости  $H$  и намагниченной ферритовой шайбы в его центре (рис. 7.2, а). Величину  $H_0$  выбирают значительно меньше резонансной.

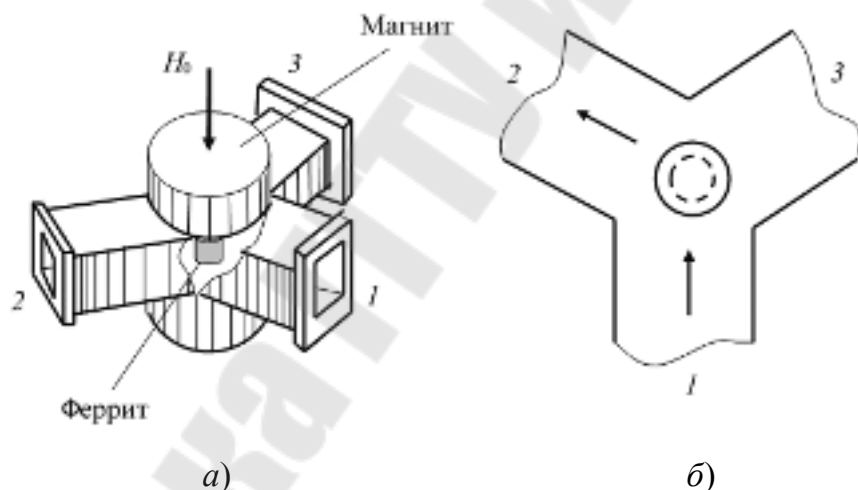


Рис. 7.2. Волноводный Y-циркулятор

Упрощенно действие этого циркулятора можно представить следующим образом. Можно считать, что при поступлении волны из плеча 1 поля в плечах 2 и 3 являются результатом суперпозиции двух волн — первичной и вторичной. Первичные волны в плечах 2 и 3 симметричного тройника имеют одинаковые амплитуды и фазы. Амплитуды и фазы вторичных волн в плечах 2 и 3 зависят от размеров и электрических характеристик намагниченных ферритовых шайб. Можно так подобрать эти параметры, чтобы первичные и вторичные волны имели одинаковые амплитуды и были бы в плече 2 синфазны, а в плече 3 противофазны. При этом волна из плеча 1 проходит в плечо 2. Вследствие симметрии

устройства действие циркулятора происходит по схеме  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ . При противоположном направлении поля  $H_0$  циркулятор действует по схеме  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ . Для расширения полосы рабочих частот  $Y$ -циркулятора целесообразно надеть на ферритовую шайбу диэлектрическое кольцо. Подобные серийные циркуляторы работают в полосе частот 10–15 %, вносят потери в прямом направлении не более 1 дБ, имеют потери в обратном направлении не менее 20 дБ и КСВ входов – 1,08–1,10.

Рассмотрим некоторые типичные случаи применения в трактах СВЧ циркуляторов.

Для устранения влияния произвольной нагрузки на генератор (для развязки) часто используют трехплечий циркулятор, который направляет эту волну в плечо с оконечной поглощающей нагрузкой (рис. 7.3). Эту схему наиболее целесообразно применять при работе мощного генератора на плохо согласованную нагрузку, когда использовать для поглощения большой мощности отраженной волны вентиль становится затруднительным. Сигнал СВЧ генератора, поданный на вход 1 циркулятора, передается на вход 2 и далее – в нагрузку. Сигнал, отраженный от нагрузки, поступает на вход 2, передается на вход 3 и далее поглощается оконечной поглощающей нагрузкой.

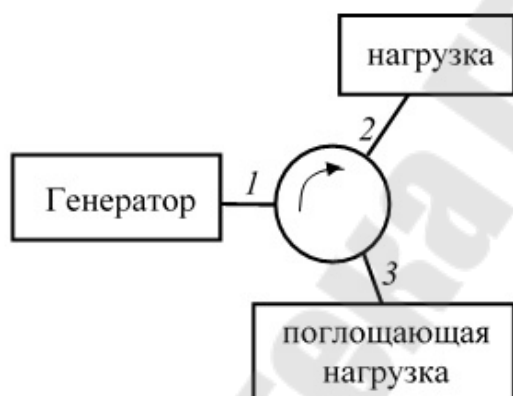


Рис. 7.3. Применение трехплечьего циркулятора для развязки СВЧ генератора и нагрузки



Рис. 7.4. Фазовращатель на основе трехплечьего циркулятора

Применение  $Y$ -циркулятора позволяет получить аналоговый фазовращатель. Для этого ко второму входу циркулятора подключается отрезок волновода с короткозамыкающим поршнем (рис. 7.4). Сигнал, поданный на первый вход циркулятора (вход фазовращателя), передается на второй вход, проходит отрезок волновода с поршнем и далее

передается на третий вход циркулятора (выход фазовращателя). При нулевом положении поршня (нулевой длине волновода) сигнал получает набег фазы, определяемый размерами циркулятора. Изменение положения поршня приведет к дополнительному набегу фазы сигнала при прохождении от входа к выходу фазовращателя.

Циркуляторы можно применять для одновременной работы передатчика и приемника на одну антенну (рис. 7.5). Сигнал генератора подается на первый вход циркулятора и поступает далее в антенну (по стрелке). Если антенна согласована с питающим кабелем, то вся мощность генератора поступает в антенну и не попадает в приемник. Сигнал, принятый антенной, поступает на второй вход циркулятора и передается на третий вход (по стрелке) и на вход приемника. Если вход приемника не согласован с питающим кабелем, то отраженный от него сигнал передается на четвертый вход циркулятора и поглощается в оконечной поглощающей нагрузке.



Рис. 7.5. Одновременная работа передатчика и приемника на одну антенну

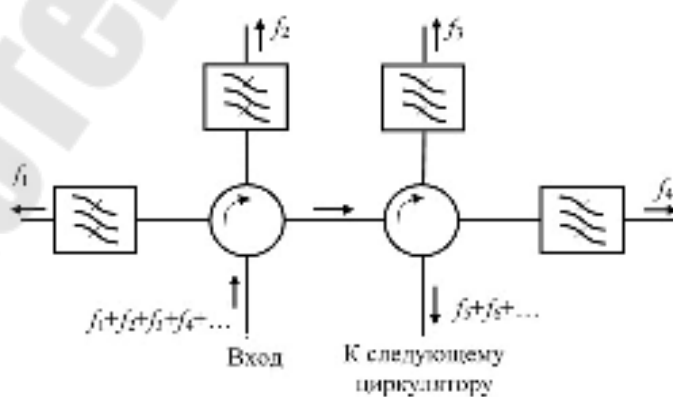


Рис. 7.6. Применение циркуляторов для построения разделительных фильтров

Использование циркуляторов совместно с частотными фильтрами СВЧ позволяет создать разделительные фильтры (рис. 7.6). Несколько высокочастотных сигналов, которые поступают одновременно в тракт СВЧ, например, из антенны, разделяются между различными каналами с помощью циркулятора и включенных в его плечи полосовых фильтров, отражающих волны вне своей полосы пропускания. Очевидно, что это же устройство может объединить в одном тракте сигналы от нескольких передатчиков, работающих на различных частотах.

## 7.2. Описание лабораторной установки

Общий вид и структурная схема лабораторной установки для исследования  $Y$ -циркулятора приведены на рис. 7.7 и 7.8, соответственно. Установка состоит из генератора СВЧ колебаний 1, высокочастотного коаксиального кабеля 2, коаксиально-волноводного перехода 3, калиброванного аттенюатора 4, исследуемого циркулятора 5, коаксиально-волноводных переходов 6 для подключения циркулятора к измерительной схеме, согласованной нагрузки 7, детекторной секции с развязывающим аттенюатором (или вентилем) 8, селективного вольтметра 9.

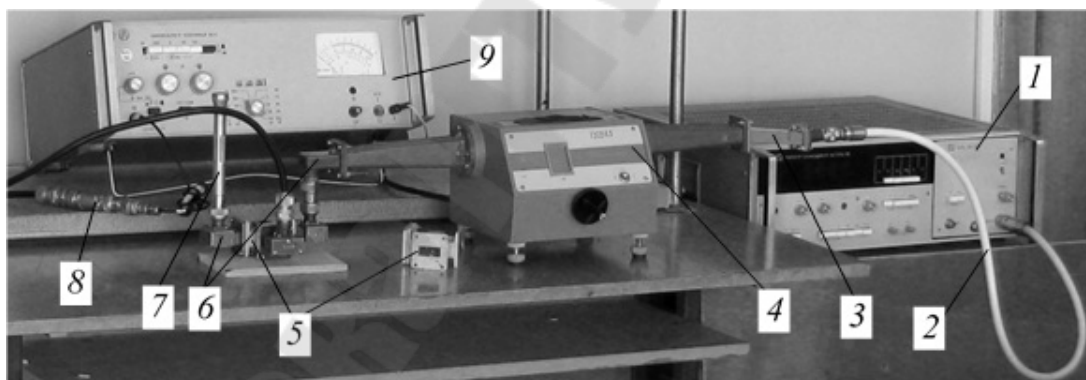


Рис. 7.7. Общий вид лабораторной установки для исследования  $Y$ -циркулятора

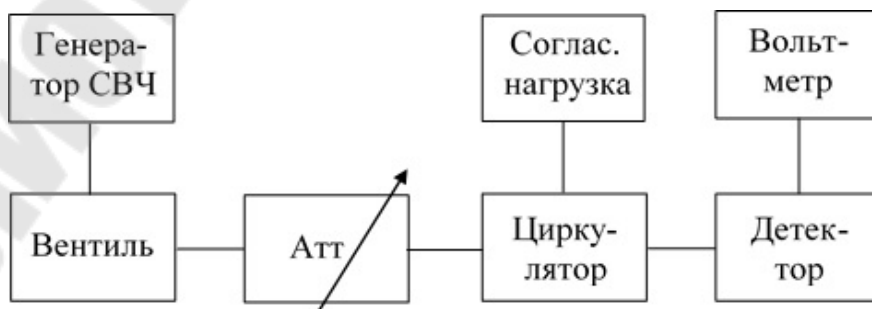


Рис. 7.8. Блок-схема установки для исследования  $Y$ -циркулятора

Испытуемый циркулятор встраивается в волноводный тракт между переменным (эталонным) аттенюатором и согласованной детекторной секцией с вольтметром. Для исключения влияния измерительного тракта на режим источника колебаний на выходе генератора включается развязывающий вентиль (может быть встроен в генератор). Наличие вентиля особенно важно при полностью выведенном аттенюаторе, так как в этом случае обратное влияние (реакция) измерительного тракта наибольшее.

В схеме для исследования четырехплечего циркулятора с продольно намагниченным ферритом (рис. 7.9) используются два детектора с вольтметрами. На рис. 7.9 обозначено: 1 – генератор СВЧ колебаний; 2 – высокочастотный коаксиальный кабель; 3 – коаксиально-волноводный переход; 4 – согласованная нагрузка; 5 – исследуемый циркулятор; 6 – две детекторные секции с развязывающими вентилями; 7 – два вольтметра; 8 – источник постоянного напряжения; 9 – миллиамперметр.

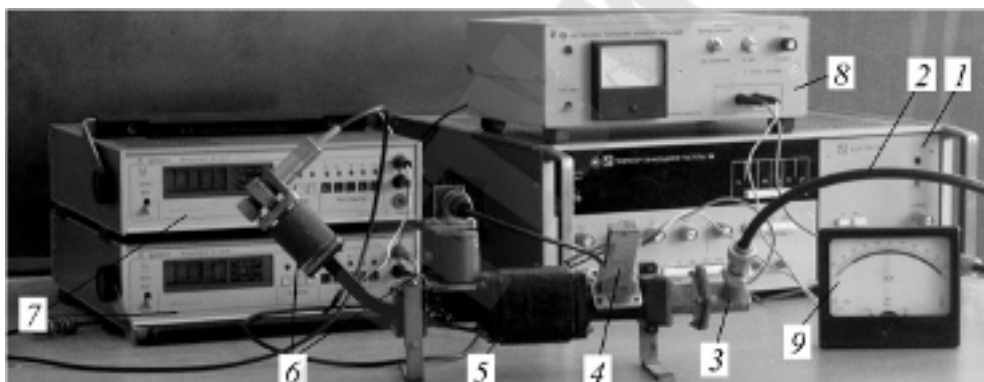


Рис. 7.9. Общий вид лабораторной установки для исследования циркулятора с продольно намагниченным ферритом



Рис. 7.10. Блок-схема установки для исследования циркулятора с продольно намагниченным ферритом



Обмотка намагничивания подключается к регулируемому источнику постоянного напряжения с миллиамперметром (рис. 9.10). Установка может включать развязывающий вентиль или аттенуатор на выходе генератора.

Основными характеристиками циркулятора, исследуемыми экспериментально, в данной работе являются:

1. Прямые потери (потери в проводящем канале) –  $\alpha_{\text{пров}}$  (как правило, оцениваются в децибелах).

2. Обратные потери (потери в непроводящем канале) –  $\alpha_{\text{непр}}$  (как правило, оцениваются в децибелах).

3. Развязка между каналами –  $p$  (разность между потерями в децибелах в непроводящем и в проводящем каналах).

Развязка между каналами вычисляется в децибелах с помощью формулы

$$p = 10 \lg \frac{P_{\text{пров}}}{P_{\text{непр}}} = \alpha_{\text{непр}} - \alpha_{\text{пров}}, \text{ дБ}, \quad (7.1)$$

где  $P_{\text{пров}}$  – мощность на выходе проводящего канала;  $P_{\text{непр}}$  – мощность на выходе непроводящего канала.

К незадействованным при измерениях плечам циркуляторов обязательно должна быть присоединена согласованная нагрузка.

Входом циркулятора может служить любое из его плеч, тогда выходом окажется второе плечо проводящего канала.

### 7.3. Домашнее задание

1. По данному методическому указанию и техническому описанию изучить принципы действия используемых в работе измерительных приборов и правила работы с ними.

2. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить теоретический материал по теме лабораторной работы и ответить на контрольные вопросы.

3. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить конструкции, принципы действия и характеристики ферритовых волноводных вентилях и циркуляторов, коаксиально-волноводных переходов и согласованных нагрузок.

## 7.4. Экспериментальное задание и порядок его выполнения

### 7.4.1. Исследование Y-циркулятора

Собрать лабораторную установку согласно рис. 7.8, дать приборам прогреться в течение 15 мин и выполнить измерения.

1. Подключить детекторную секцию непосредственно к выходу переменного аттенюатора. Установить на выходе генератора частоту колебания  $f$ , приведенную в табл. 7.1 или табл. 7.2. Установить режим внутренней амплитудной модуляции сигнала генератора.

Таблица 7.1

Исходные данные для группы ПС-41

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f$ , ГГц	8	9	10	11	12	11,75	8,5	9,5

Таблица 7.2

Исходные данные для группы ПС-42

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f$ , ГГц	10,5	11,5	9,25	8,25	11,25	8,75	9,75	10,75

2. Настроить вольтметр, для этого включить селективный режим, включить частотный диапазон, в котором содержится частота модулирующего колебания генератора.

Первоначальное обнаружение сигнала проводите на самом нечувствительном поддиапазоне 100 мВ.

С помощью ручек грубой и точной настройки частоты настройтесь на частоту входного сигнала, добившись максимальных показаний индикатора. При этом, чтобы стрелка вольтметра не зашкаливала пользуйтесь ручкой регулировки чувствительности прибора. Далее положения ручек грубой и точной настройки частоты вольтметра не изменять.

3. Установить удобное для дальнейших вычислений ослабление аттенюатора ( $n_0 \geq 30$  дБ), зафиксировать показание вольтметра (показание вольтметра должно изменяться при изменении ослабления аттенюатора в ту или иную сторону).

4. Измерить потери в прямом и обратном направлениях и развязку (в децибелах) между плечами циркулятора. Для этого включить в тракт циркулятор в прямом направлении. Уменьшая ослабление аттенюатора, добиться прежнего показания вольтметра. Зафиксировать показание шкалы аттенюатора ( $n_1$ ). Разность показаний шкалы аттенюатора  $n_0 - n_1$  даст величину потерь в прямом направлении циркулятора.

Включить в тракт циркулятор в обратном направлении и измерить величину потерь в обратном направлении циркулятора. С помощью формулы (7.1) рассчитать развязку между плечами циркулятора.

5. Повторить п. 7.2 для двух других способов включения циркулятора.

6. Для одного из способов включения циркулятора измерить зависимость развязки между плечами циркулятора от частоты. Измерения выполнить в диапазоне 8–12 ГГц с шагом 250 МГц. Построить полученную зависимость.

#### ***7.4.2. Исследование устройств на циркуляторе с продольно намагниченным ферритом***

1. Подготовить лабораторную установку к работе согласно блок-схеме на рис. 7.10. Одно из плеч циркулятора подключить через развязывающий вентиль (или аттенюатор) к выходу генератора. К двум другим плечам циркулятора подключить согласованные детекторные секции (детекторные секции с вентилями). К выходу каждой детекторной секции подключить вольтметр. Соединить последовательно катушку намагничивания циркулятора, миллиамперметр и источник постоянного напряжения. Выполнить следующие измерения.

2. Исследовать работу циркулятора в режиме переключения СВЧ сигналов. Для этого установить:

- заданную частоту сигнала на выходе генератора;
- изменением величины напряжения источника питания ток через катушку намагничивания 70 мА;
- подстройкой в небольших пределах тока через катушку намагничивания добиться в одном из каналов циркулятора максимальной передачи мощности, а в другом – минимальной. Переключая направление тока через катушку намагничивания (переключением проводов на выходе источника питания), повторить эту операцию несколько раз так, чтобы при одном направлении тока СВЧ мощность передавалась в один канал, а при другом – в другой канал.

3. Исследовать работу циркулятора в режиме регулирования СВЧ мощности. Для этого установить:

- заданную частоту сигнала генератора;
- изменяя ток через катушку намагничивания в пределах 0–70 мА с шагом 10 мА, снять зависимости мощности на выходах каждого канала от тока в катушке;
- повторить предыдущие измерения для противоположного направления тока в катушке намагничивания;
- построить полученные зависимости.

### 7.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- эскизы исследованных устройств с ферритами;
- определение основных измеряемых параметров;
- блок-схемы измерительных установок с указанием назначения отдельных блоков;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем;
- результаты измерения развязки  $Y$ -циркулятора для различных способов его включения;
- график зависимости развязки  $Y$ -циркулятора от частоты;
- результаты экспериментальных исследований циркулятора с продольно намагниченным ферритом в режиме переключения СВЧ мощности;
- графики зависимости мощности на выходах каналов циркулятора с продольно намагниченным ферритом от тока в катушке намагничивания;
- выводы по работе. В выводах необходимо проанализировать результаты измерений, сравнить полученные характеристики с ожидаемыми теоретическими, указать возможные причины расхождения.

### 7.6. Контрольные вопросы

1. Что такое феррит? Назовите основные свойства ферритов.
2. Что такое циркулятор и каковы его свойства?
3. Каковы структурные схемы измерительных установок?
4. Каково назначение детекторной головки, ее действие?
5. Как правильно включать и выключать измерительные приборы установки?

6. Для чего необходимы коаксиально-волноводные переходы в лабораторной установке?

7. Какие методы развязки генератора и схемы возможны? Зачем осуществляется развязка?

8. Какова последовательность настройки лабораторного стенда?

9. Как настраивается генератор измерительной установки?

10. Как настраивается индикатор измерительной установки?

11. Как измеряются исследуемые параметры циркулятора?

12. Объяснить устройство и принцип действия циркулятора на круглом волноводе.

13. Объяснить устройство и принцип действия  $Y$ -циркулятора на прямоугольном волноводе.

14. Объяснить устройство и принцип действия коммутатора на круглом волноводе.

15. Объяснить устройство и принцип действия регулятора мощности на круглом волноводе.

16. В чем заключается методика измерения прямых и обратных потерь?

17. Что такое эффект Фарадея?

18. Каковы свойства волны при распространении в феррите в направлении, перпендикулярном намагничивающему полю?

19. Объяснить причины неидеальных развязок в циркуляторе.

## 7.7. Литература

1. Сазонов, Д. М. Устройства СВЧ : учеб. пособие / Д. М. Сазонов, А. Н. Гридин, Б. А. Мишустин ; под ред. Д. М. Сазонова. – М. : Высш. шк., 1981. – 295 с. : ил.

2. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978. – 429 с.

3. Конспекты лекций по дисциплинам «Устройства СВЧ» и «Техническая электродинамика».

### *Лабораторная работа № 8* **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СВЧ С PIN-ДИОДАМИ**

**Цель работы:** изучить принципы работы и основные параметры  $pin$ -диодных переключателей, регуляторов мощности и фазовращателей, экспериментально исследовать характеристики таких устройств.

## 8.1. Краткие теоретические сведения

В последнее время в технике СВЧ широкое распространение получили регулирующие устройства (например, переключатели, фазовращатели) на полупроводниковых *pin*-диодах, управляемые постоянным напряжением. Основными достоинствами этих устройств являются большое быстродействие (до  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  с), малая управляющая мощность (десятки милливатт), большой срок службы (до 200000 ч) и способность работать при весьма значительных высокочастотных мощностях (импульсная мощность может достигать десятков киловатт, средняя мощность – сотен ватт). Использование *pin*-диодов с полосковыми линиями позволяет создавать миниатюрные электрически управляемые регулирующие устройства.

Эквивалентная упрощенная схема на СВЧ полупроводникового диода с *p-i*- и *i-n*-переходами (*pin*-диода) представляет собой параллельное соединение активного сопротивления  $r_d$  и весьма малой емкости  $C_d$ , причем изменение напряжения смещения на диоде изменяет в  $10^2$ – $10^4$  раз значение  $r_d$  и почти не влияет на  $C_d$ . Емкость  $C_d$  часто компенсируют параллельным подключением к *pin*-диоду индуктивности. При прямом напряжении смещения (плюс источника соединен с областью *p*), сопровождаемом небольшим управляющим током, *pin*-диод на СВЧ обладает очень малым комплексным сопротивлением и в первом приближении представляет собой короткозамкнутую цепь. При нулевом или обратном напряжении смещения комплексное сопротивление *pin*-диода становится очень большим, что в первом приближении можно считать разрывом цепи.

Многообразные виды *pin*-диодов приспособлены к применению в различных типах линий передачи, параллельному и последовательному способам включения, работе с различными уровнями высокочастотной мощности, различному быстродействию, креплению при помощи введения в линию передачи специальных конструктивных элементов или без них.

Эквивалентная схема простейшего узкополосного двухканального переключателя представлена на рис. 8.1. Можно так подобрать дополнительные согласующие элементы (на рисунке не показаны), что для электромагнитных волн в узком диапазоне частот параллельно включенный *pin*-диод будет представлять либо короткое замыкание линии передачи (при положительном напряжении смещения), либо очень большое сопротивление, практически не шунтирующее линию передачи (при отрицательном напряжении смещения). Пусть,

например, управляющие напряжения таковы, что левый диод открыт и отражает электромагнитную волну, а правый диод закрыт и пропускает ее. При этом на частоте  $f_0$  (которой соответствует длина волны в линии передачи  $\lambda_B$ ) плечо 2 имеет в точках  $a$ – $a$  бесконечно большое сопротивление и сигнал из 1 полностью проходит в плечо 3. При противоположной полярности управляющих напряжений сигнал из плеча 1 поступает в плечо 2. Для расширения полосы пропускания и увеличения ослабления по закрытому каналу следует применить в каждом плече каскадное включение нескольких параллельных *pin*-диодов через отрезки линии длиной  $\lambda_B/4$ .

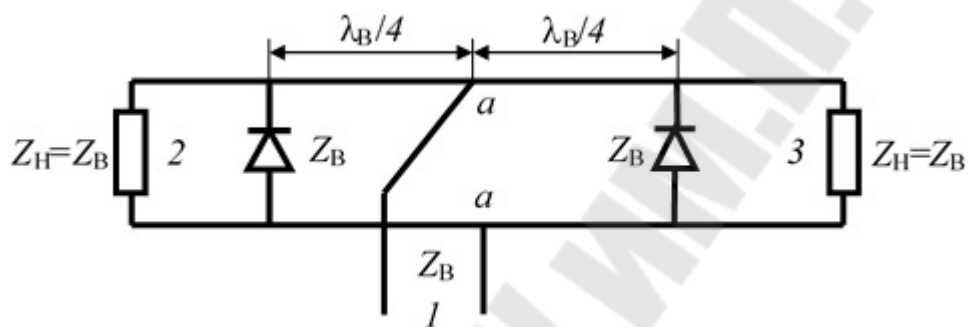


Рис. 8.1. *Pin*-диодный переключатель

На рис. 8.2 изображены два каскадно-соединенных моста и между ними параллельно включенные в линии передачи управляемые *pin*-диоды. Если на диоды подать отрицательное напряжение смещения, то вся мощность из входного плеча 1 пройдет в плечо 4. Если на диоды подать положительное смещение, при котором они накоротко замыкают линии передачи, то вся мощность из плеча 1 пройдет в плечо 3. Таким образом, схема на рис. 8.2 может быть использована в качестве управляемого двухканального переключателя.

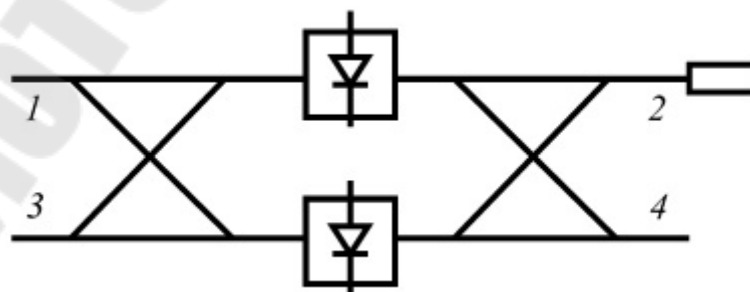


Рис. 8.2. *Pin*-диодный переключатель на основе мостовых устройств

Переключатели на большое число каналов получаются путем каскадного включения двухканальных переключателей (рис. 8.3, а), либо на основе разветвительных цепей (рис. 8.3, б).

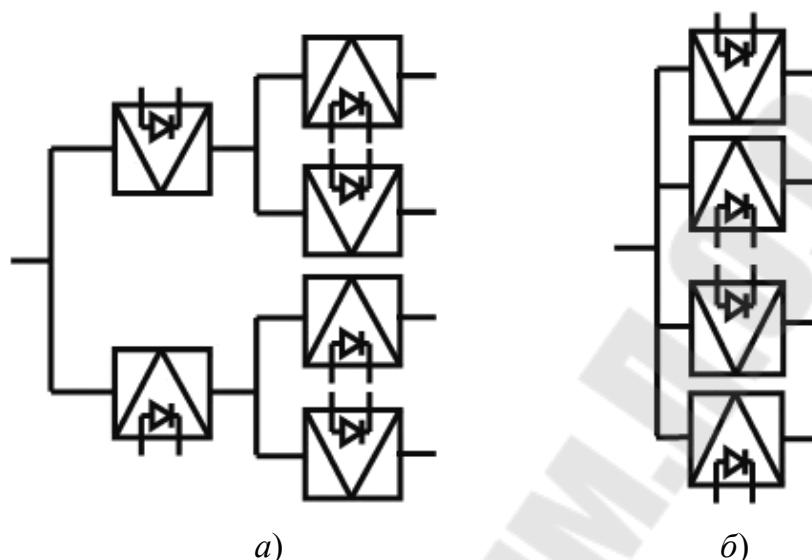


Рис. 8.3. Многоканальные переключатели

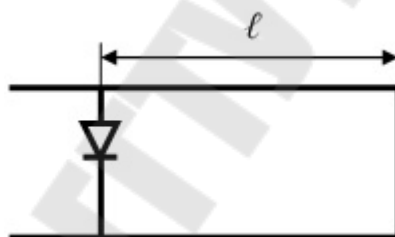


Рис. 8.4. Отражательный *pin*-диодный фазовращатель

Очень важным классом регулирующих устройств являются фазовращатели на *pin*-диодах с электрически управляемым дискретным изменением фазы, которые широко используются в технике фазированных антенных решеток. Применяются отражательные и проходные дискретные фазовращатели. Простейший узкополосный отражательный одноступенчатый фазовращатель представляет собой короткозамкнутый отрезок линии передачи СВЧ с параллельно включенным управляемым *pin*-диодом (рис. 8.5). Поскольку волна проходит через отражательный фазовращатель дважды – в прямом и обратном направлениях, то в случае отражения от открытого *pin*-диода ее фазовый сдвиг на выходе фазовращателя будет на величину  $2\beta l$  меньше, чем в случае отражения от короткозамкнутого конца линии при закрытом *pin*-диоде ( $\beta = 2\pi/\lambda_B$  – коэффициент фазы). Простейший проходной



одноступенчатый фазовращатель представляет собой устройство с переменным подключением к схеме с помощью управляемых *pin*-диодов двух согласованных отрезков линии передачи различной длины (рис. 8.4, *pin*-диоды включены последовательно). При этом на выходе фазовращателя разность фазовых сдвигов, соответствующих двум различным управляющим напряжениям, будет равна  $\beta(l_1 - l_2)$ .

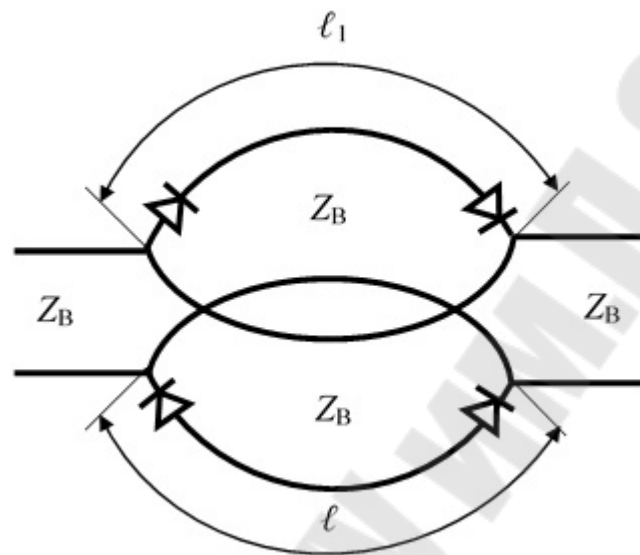


Рис. 8.5. Проходной *pin*-диодный фазовращатель

Проходной одноступенчатый фазовращатель можно также получить из двух одинаковых и синхронно работающих одноступенчатых отражательных фазовращателей и моста (рис. 8.6). При этом волна, поступающая во входное плечо 1, делится мостом на две волны одинаковой амплитуды, которые отражаются от фазовращателей в плечах 2 и 4, приобретают один из двух возможных фазовых сдвигов и проходят в выходное плечо 3.

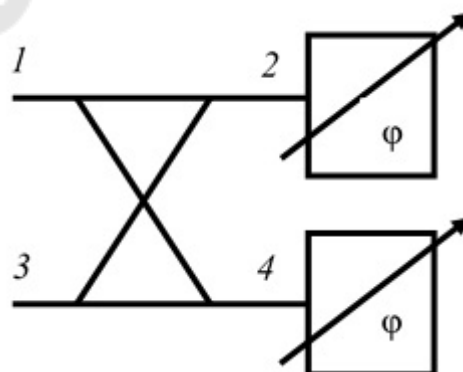


Рис. 8.6. Проходной фазовращатель на основе моста

Наибольший практический интерес представляют многоступенчатые фазовращатели, обеспечивающие скачок фазы  $\Delta\varphi$  и число фазовых состояний  $m$ . Обычно принимают  $\Delta\varphi = 2\pi/m$ , чтобы фазовращатель мог изменять фазу от 0 до  $2\pi$  через  $\Delta\varphi$ .

Проходной многоступенчатый фазовращатель можно создать, например, каскадным соединением  $p$  одноступенчатых проходных фазовращателей, каждый из которых характеризуется значениями фазового сдвига 0 или  $\pi/2^{k-1}$ , где  $k$  – номер каскада (рис. 8.6). Такой фазовращатель позволяет изменять фазу от 0 до  $2\pi$  через  $\Delta\varphi = \pi/2^{k-1}$ , причем для выбора любого из  $m = 2^p$  возможных фазовых состояний фазовращателя требуется использовать всего  $p$  управляющих сигналов (по числу каскадов), каждый из которых принимает условные значения 0 (фазовый сдвиг каскада равен нулю) или 1 (фазовый сдвиг равен  $\pi/2^{k-1}$ ).

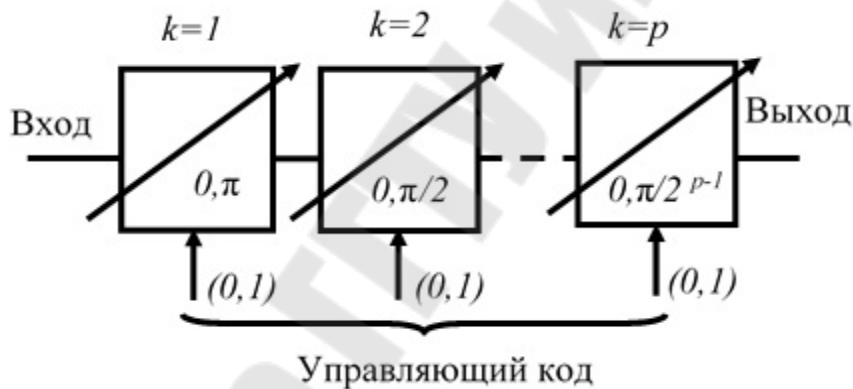


Рис. 8.7. Проходной многоступенчатый фазовращатель

Например, в двухразрядном фазовращателе (т. е. при  $p = 2$ ) управляющим сигналам (00) соответствует нулевой фазовый сдвиг  $\Phi_{00} = 0$ , сигналам (01) соответствует  $\Phi_{01} = \pi/2$ , сигналам (10) –  $\Phi_{10} = \pi$  и, наконец, сигналам (11) –  $\Phi_{11} = 3\pi/2$ .

Потери мощности в фазовращателе существенно зависят от параметров *pin*-диодов и увеличиваются с ростом числа каскадов  $p$ . Для длины волны  $\lambda = 10$ – $15$  см ослабление трехкаскадного фазовращателя достигает 1,0–1,5 дБ. Поэтому на практике обычно ограничиваются значением  $p = 3$  ( $\Delta\varphi = \pi/4$ ,  $m = 8$ ).

Отражательный многоступенчатый фазовращатель можно получить путем короткого замыкания выхода проходного фазовращателя. Поскольку волна проходит отражательный фазовращатель дважды, то

фазовый сдвиг в каждом его каскаде получится в 2 раза больше, чем в исходном проходном фазовращателе. Это необходимо учитывать при проектировании отражательного фазовращателя.

## 8.2. Описание лабораторных макетов, установки и метода измерений

В работе исследуются: переключатель СВЧ мощности, электрически управляемый аттенуатор, дискретный фазовращатель.

Общий вид лабораторной установки для исследования *pin*-диодного СВЧ переключателя и дискретного фазовращателя приведен на рис. 8.8. Установка состоит из генератора СВЧ колебаний 1, высокочастотных коаксиальных линий 2, измерительной линии 3, детекторной секции 4, низкочастотного коаксиального кабеля 5, коаксиального тройника 6, согласованной нагрузки 7, вольтметра 8, источника питания 9, миллиамперметра 10, исследуемых переключателя 11, управляемого аттенуатора 12 и дискретного фазовращателя 13 и его блока управления 14, коаксиального переходника 15.

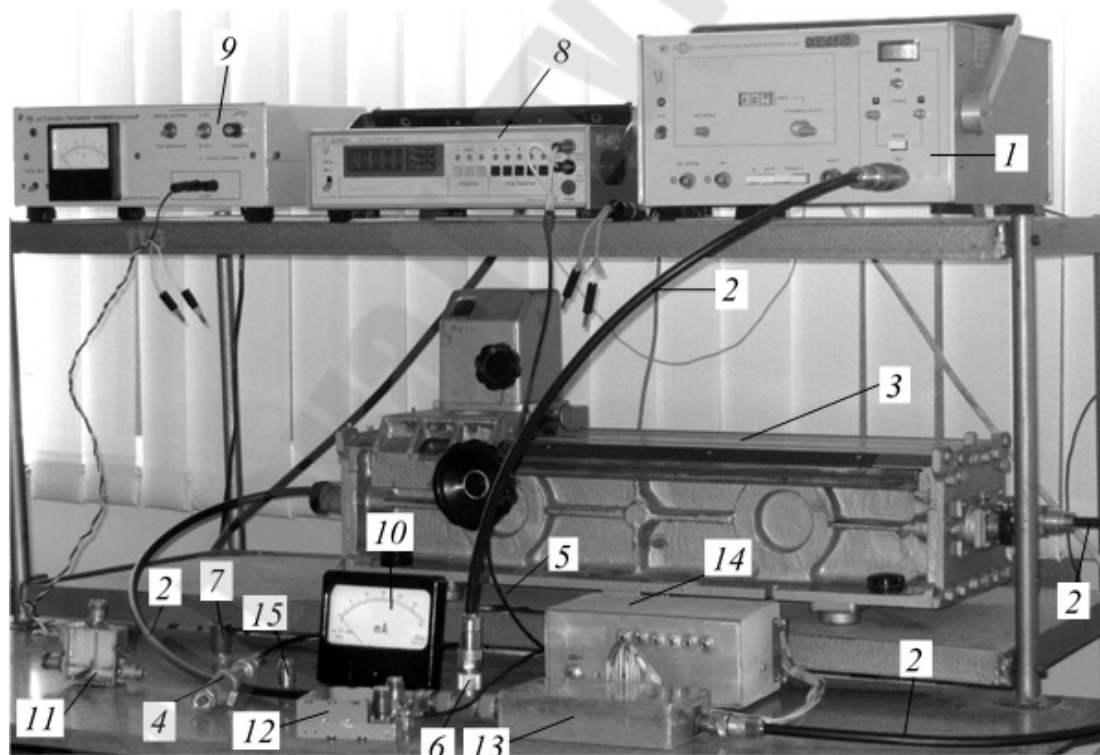


Рис. 8.8. Общий вид лабораторной установки

Общий вид и принципиальная схема исследуемого *pin*-диодного СВЧ переключателя приведены на рис. 8.9 и 8.10, соответственно. В переключателе применены диоды *VD1* и *VD2* со структурой *p-i-n*.

В зависимости от наличия сигнала управления на выводах «1» или «2» СВЧ мощность проходит, соответственно, со входа 1 или входа 2 на выход. При подаче напряжения управления примерно +9 В на вывод «1» переключателя и отсутствии напряжения на выводе «2» ток протекает через резистор  $R1$ , диод  $VD1$  и дроссель  $L1$ . Ток равен примерно 10 мА (определяется сопротивлением  $R1$ ). При этом сопротивление диода не превышает 3–5 Ом. Одновременно, поскольку напряжения на аноде и катоде диода  $VD2$  практически равны нулю, ток через диод  $VD2$  не протекает и его сопротивление составляет 5–7 кОм. Высокочастотный сигнал со входа 1 проходит на выход, а со входа 2 не проходит.

При подаче напряжения +9 В на вывод «2» и отсутствии его на выводе «1» ток потечет через диод  $VD2$ , а через  $VD1$  – нет. При этом на выход СВЧ сигнал проходит со входа 2.

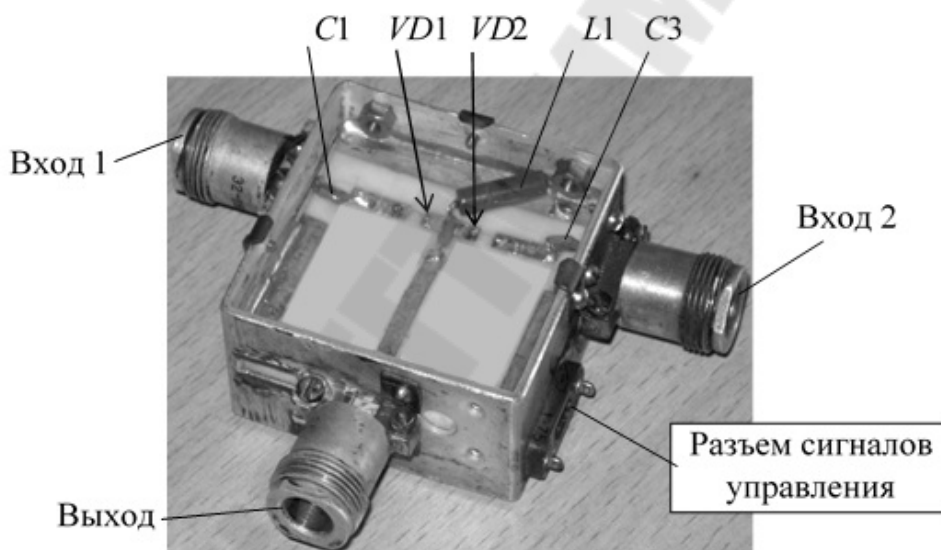


Рис. 8.9. Pin-диодный переключатель СВЧ мощности

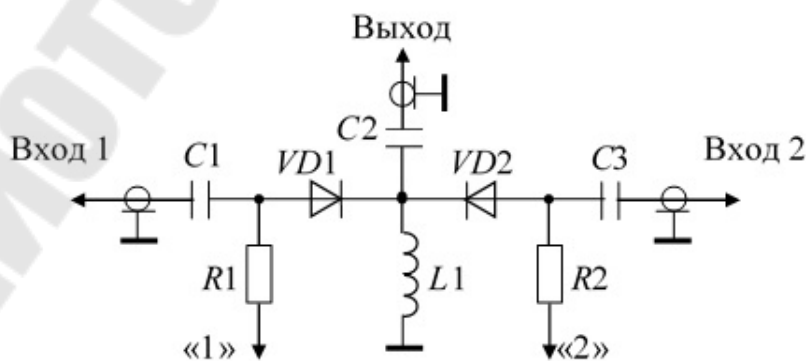


Рис. 8.10. Принципиальная схема pin-диодного переключателя

Для регулирования СВЧ мощности применяются электрически управляемые аттенюаторы. В лабораторном аттенюаторе применены *pin*-диоды (2A516A), изменяющие свое сопротивление (и затухание аттенюатора) в зависимости от пропускаемого через них тока. Общий вид и принципиальная схема аттенюатора приведены на рис. 8.10 и 8.11, соответственно. *Pin*-диоды (*VD1–VD3*, *VD5–VD7*), управляющие затуханием аттенюатора, включаются в линию передачи параллельно. Протекающий по ним ток изменяет их сопротивление. При отрицательном напряжении смещения диодов они имеют очень большое сопротивление и практически не шунтируют линию передачи, при положительном напряжении смещения сопротивление диодов уменьшается, и они шунтируют линию передачи, приводя к возрастанию затухания аттенюатора.

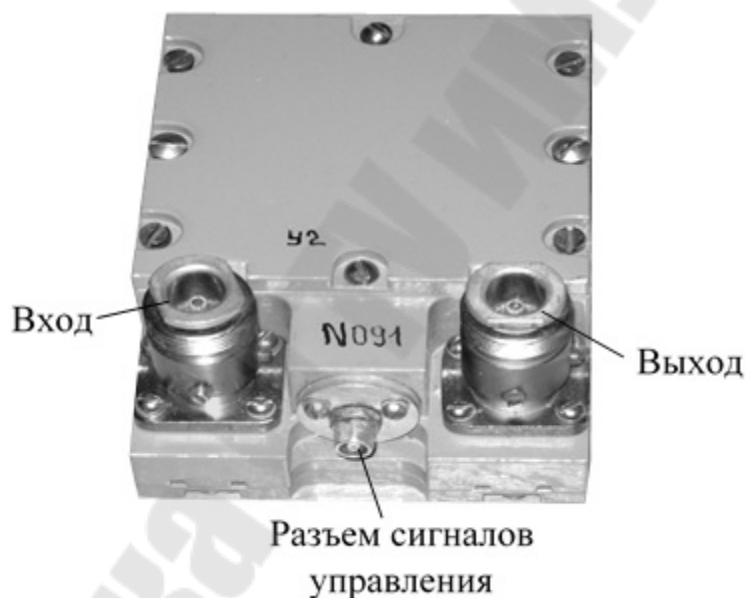


Рис. 8.11. Электрически управляемый аттенюатор

В работе исследуется также шестикаскадный дискретный фазовращатель, принцип действия которого рассмотрен выше. Лабораторный макет состоит из выполненного по изображенным на рис. 8.4 и 8.6 схемам фазовращателя со светодиодными индикаторами включения каскадов (светодиод светится – в каскаде фазовращателя включен длинный отрезок кабеля, не светится – короткий) и блока питания и управления. Переключение кабеля в каскаде фазовращателя осуществляется тумблером на блоке управления.

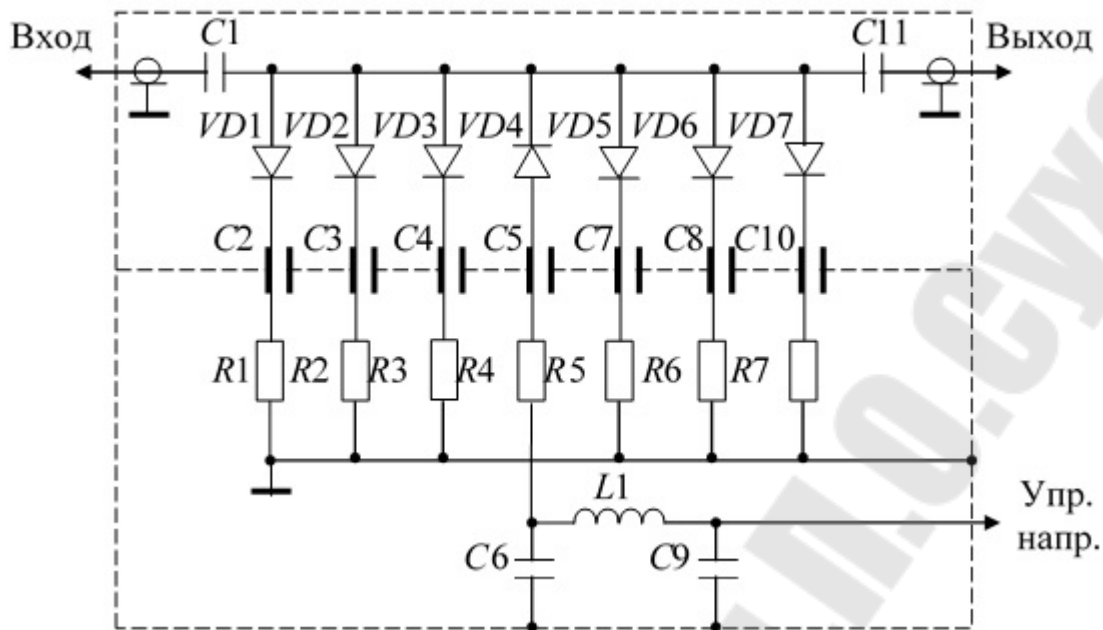


Рис. 8.12. Принципиальная схема аттенюатора

В работе исследуются входные и передаточные функции *pin*-диодных устройств дециметрового диапазона волн. Структурная схема для исследования *pin*-диодных СВЧ устройств приведена на рис. 8.13.



Рис. 8.13. Блок-схема установки для исследования СВЧ переключателя

Измерительная линия служит для измерения КСВ входов и выхода исследуемых устройств. Высокочастотный сигнал заданной частоты поступает от генератора СВЧ (Г4-144 или аналогичный) через развязывающий аттенюатор на измерительную линию, к выходу которой подключается исследуемое устройство. Неиспользуемый вход и выход исследуемого устройства нагружается на согласованную нагрузку. Индикаторным устройством измерительной линии служит вольтметр В7-40 (или аналогичный) в режиме измерения постоянного

напряжения. Генератор СВЧ работает в режиме непрерывной генерации. Перемещая каретку измерительной линии, находятся значения сигнала в максимуме и минимуме продольного распределения поля, по которым рассчитывается значение КСВ:

$$\text{КСВ} = \sqrt{\frac{n_{\text{макс}}}{n_{\text{мин}}}}, \quad (8.1)$$

где  $n_{\text{макс}}$  – показание вольтметра в максимуме поля;  $n_{\text{мин}}$  – показание вольтметра в минимуме поля. Характеристика детектора измерительной линии здесь считается квадратичной.

При измерении коэффициента передачи устройства детекторная секция с индикатором подключается вначале к выходу исследуемого устройства, а затем к выходу измерительной линии. Делением первого результата на второй рассчитывается коэффициент передачи устройства. При измерении КСВ и коэффициента передачи устройства необходимо учитывать квадратичность характеристики детектора.

При исследовании регулируемого аттенюатора в разрыв одного из проводов между источником питания и управляющим входом аттенюатора необходимо включить миллиамперметр постоянного тока.

Структурная схема лабораторной установки для измерения фазового сдвига, вносимого фазовращателем, приведена на рис. 8.14. Она состоит из генератора СВЧ колебаний, развязывающего аттенюатора (или вентиля), делителя сигнала, измерительной линии с индикатором, исследуемого фазовращателя с блоком питания и управления.

Сигнал заданной частоты с выхода генератора через развязывающий аттенюатор поступает на вход коаксиального тройника. Сигнал делится на две равные части, одна часть поступает на один вход измерительной линии, а другая – через исследуемый фазовращатель на другой. Измерительная линия служит для измерения фазового сдвига между сигналами, распространяющимися в противоположных направлениях. Один из выходов тройника подключается непосредственно ко входу фазовращателя. Этим, а также выбором длин кабелей обеспечивается равенство электрических длин соединительных трактов между выходами измерительной линии и тройника.

Измерение фазового сдвига выполняется следующим образом. После калибровки измерительной линии и индикатора устанавливается нулевое значение фазы, вносимой фазовращателем. Перемещается каретка вдоль линии и определяется положение узла напряженности поля, ближайшего к концу линии (к правому выходу линии).



Рис. 8.14. Блок-схема установки для измерения фазового сдвига

Переключатель фазовращателя устанавливается в положение, для которого необходимо измерить значение фазового сдвига и определяется смещение узла напряженности поля к правому концу линии. Смещение узла напряженности  $\Delta l$  к началу измерительной линии (куда через кабель подключается один из выходов тройника) определяет фазовый сдвиг, вносимый фазовращателем:

$$\Delta\psi = 2\beta \cdot \Delta l = \frac{4\pi \cdot \Delta l}{\lambda_B}; \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda_B}; \quad \lambda_B = \lambda.$$

### 8.3. Домашнее задание

1. По данному методическому указанию и техническому описанию изучить принципы действия используемых в работе измерительных приборов и правила работы с ними.
2. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить теоретический материал по теме лабораторной работы и ответить на контрольные вопросы.
3. По данному методическому указанию и рекомендованной литературе изучить конструкции, принципы действия и характеристики *pin*-диодных аттенюаторов, переключателей и фазовращателей.

### 8.4. Экспериментальное задание и порядок его выполнения

#### 8.4.1. Исследование СВЧ переключателя и регулируемого аттенюатора

1. Изучить инструкции по эксплуатации генератора СВЧ, измерительной линии и других измерительных приборов.



2. Собрать лабораторную установку для измерения КСВ входов исследуемых устройств (рис. 8.13). Включить генератор СВЧ и индикатор в сеть и дать им прогреться в течение 15 мин. Далее использовать: режим работы генератора – непрерывная генерация, индикатора (вольтметра) – измерение постоянного напряжения.

3. Собрать схему для измерения КСВ и коэффициента передачи СВЧ переключателя (п. 2). Установить на генераторе частоту  $f$ , приведенную в табл. 8.1 или табл. 8.2.

Таблица 8.1

Исходные данные для группы ПС-41

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f$ , МГц	450	500	550	600	650	700	750	800

Таблица 8.2

Исходные данные для группы ПС-42

Номер подгруппы	1				2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$f$ , ГГц	475	525	625	725	575	675	775	825

4. Измерить КСВ первого входа СВЧ переключателя. Для этого:

- подключить первый вход переключателя с помощью коаксиального перехода к выходу измерительной линии; на выход переключателя включить согласованную нагрузку;
- подать на первый управляющий вход переключателя постоянное напряжение +9 В;
- перемещая каретку измерительной линии, измерить минимальное и максимальное значения поля в линии;
- рассчитать КСВ в линии; характеристику детектора измерительной линии считать квадратичной.

5. Измерить КСВ второго входа СВЧ переключателя при открытом втором канале.

6. Измерить ослабление, вносимое каждым каналом переключателя в открытом и закрытом состояниях.

7. Аналогично пп. 8.3, 8.4 измерить КСВ входа регулируемого аттенюатора. На выход аттенюатора включить согласованную нагрузку. Измерения выполнить при токе управления 0 и 10 мА.

8. Изменяя напряжение на выходе источника питания, снять зависимость коэффициента ослабления аттенюатора от тока через диоды (при изменении тока от нуля до 20 мА). Построить полученную зависимость.

#### **8.4.2 Исследование многоразрядного СВЧ фазовращателя**

9. Собрать схему для исследования фазовращателя (рис. 8.14). Включить измерительные приборы в сеть и дать им прогреться в течение 15 мин. Включить блок управления фазовращателем в сеть.

10. Снять частотную зависимость дифференциального фазового сдвига, вносимого первым каскадом фазовращателя (разность фазовых сдвигов при выключенном (индикаторы не светятся) и включенном каскаде). Частоту изменять в пределах 480–600 МГц с шагом 10 МГц.

11. На заданной преподавателем частоте измерить величину дифференциального фазового сдвига, вносимого каждым каскадом фазовращателя.

12. Для заданного преподавателем значения фазового сдвига определить коды управления и измерить реализуемое значение фазового сдвига. Определить погрешность.

### **8.5. Содержание отчета**

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- эскизы исследованных *pin*-диодных устройств;
- определение основных измеряемых параметров;
- блок-схемы установки для измерения характеристик исследованных устройств;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем;
- полученные результаты в виде таблиц и графиков;
- характеристики согласования входов исследованных устройств;
- характеристики потерь и вносимого ослабления исследованных устройств;
- зависимость фазового сдвига, вносимого фазовращателем, от значения управляющего сигнала;
- выводы по работе. В выводах следует оценить качество исследованных устройств с точки зрения электродинамических характеристик и затрат на их управление.

## 8.6 Контрольные вопросы

1. Что такое СВЧ переключатель?
2. Что такое электрически управляемый аттенюатор?
3. Какое устройство называется фазовращателем?
4. Что такое дискретный фазовращатель?
5. Нарисовать эквивалентную схему *pin*-диода.
6. Какими параметрами характеризуется СВЧ переключатель?
7. Как управляют режимом работы СВЧ переключателя?
8. Как связаны режимы работы генератора и вольтметра лабораторной установки?
9. Как правильно включать и выключать измерительные приборы лабораторной установки?
10. Нарисуйте блок-схему измерения КСВ входа электрически управляемого аттенюатора?
11. Как измеряется коэффициент передачи СВЧ переключателя и управляемого аттенюатора?
12. Почему в схемах измерения КСВ входа СВЧ переключателя на выход необходимо включать согласованную нагрузку? Нужно ли это делать при исследовании других устройств?
13. Какие факторы влияют на потери СВЧ переключателя?
14. Как измеряется фазовый сдвиг фазовращателя?
15. Как настраивается измерительная линия?
16. Что такое отражательный фазовращатель?
17. Что такое проходной фазовращатель?
18. Где применяются фазовращатели?
19. Какими параметрами характеризуется электрически управляемый аттенюатор?
20. Как обеспечивается согласование входа и выхода электрически управляемого аттенюатора?
21. Чем определяются минимальное и максимальное ослабления электрически управляемого аттенюатора?
22. Пояснить схему построения и принцип действия многорядного дискретного СВЧ фазовращателя на переключаемых отрезках длинных линий.
23. Чем определяется число каскадов дискретного фазовращателя?

## 8.7. Литература

1. Сазонов, Д. М. Антенны и устройства СВЧ : учеб. для радиотехн. специальностей вузов / Д. М. Сазонов. – М. : Высш. шк., 1988. – 432 с. : ил.
2. Сазонов, Д. М. Устройства СВЧ : учеб. пособие / Д. М. Сазонов, А. Н. Гридин, Б. А. Мишустин ; под ред. Д. М. Сазонова. – М. : Высш. шк., 1981. – 295 с. : ил.
3. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978. – 429 с.
4. Конспекты лекций по дисциплинам «Устройства СВЧ» и «Техническая электродинамика».

## Содержание

<i>Лабораторная работа № 1. Панорамный измеритель КСВ и ослаблений</i> .....	3
<i>Лабораторная работа № 2. Измерение параметров волноводных элементов автоматическим измерителем КСВ и ослаблений</i> .....	10
<i>Лабораторная работа № 3. Исследование волноводного аттенюатора</i> .....	22
<i>Лабораторная работа № 4. Исследование направленных ответвителей</i> .....	30
<i>Лабораторная работа № 5. Исследование ферритового вентиля</i> .....	38
<i>Лабораторная работа № 6. Исследование механического фазовращателя</i> .....	50
<i>Лабораторная работа № 7. Ферритовые волноводные циркуляторы и их применение</i> .....	57
<i>Лабораторная работа № 8. Исследование устройств СВЧ с <i>pin</i>-диодами</i> .....	69

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Вяхирев Николай Иванович**  
**Наурук Алеся Александровна**

## **УСТРОЙСТВА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ**

**Практикум**  
**по одноименной дисциплине для студентов**  
**специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника»**  
**дневной формы обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор  
Компьютерная верстка

*Т. Н. Мисюрова*  
*Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 03.03.16.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 5,11. Уч.-изд. л. 5,50.

Изд. № 143.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение  
Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого.  
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя  
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48