

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ЧЕЧЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

М.-А. В. Зубхаджиев, О. В. Наскалова, Ю. М. Нойкин

ПОЛЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Часть II

Учебное пособие

Грозный – 2016

УДК 621.397.6

ББК 32.849

391

*Печатается по решению Ученого совета
Чеченского государственного университета*

Рецензенты:

профессор кафедры прикладной электродинамики
и компьютерного моделирования ЮФУ,
д. ф.-м. н., А. М. Лерер;
зав. кафедрой общей физики ЧГУ, д. ф.-м. н.,
профессор Р. М. Магомадов

391 Полые резонаторы : учебное пособие / М.-А. В. Зубхаджиев, О. В. Наскалова, Ю. М. Нойкин ; Чеченский государственный университет. – Грозный : Издательство Чеченского государственного университета, 2016. – Ч. II. – 64 с.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 03.03.03 «Радиофизика». В пособии излагаются методы измерения параметров и характеристик полых резонансных систем СВЧ-диапазона и содержатся рекомендации к выполнению лабораторных работ по их экспериментальному изучению.

УДК 621.397.6

ББК 32.849

© Чеченский государственный университет, 2016
© Зубхаджиев М.-А. В., Наскалова О. В.,
Нойкин Ю. М., 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
В1. Общие положения	6
В2. Методы измерения добротности полых резонаторов	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР	
1.1. Метод рефлектометра	10
1.2. Описание лабораторной установки.....	13
1.3. Краткое описание приборов, устройств и компонентов лабораторной установки.....	13
1.3.1. Прямоугольный резонатор.....	13
1.3.2. Измеритель КСВН панорамный Р2-61	17
1.3.3. Волноводные направленные ответвители	18
1.3.4. Амплитудный детектор.....	19
1.3.5. Коаксиально-волноводный переход.....	20
1.3.6. Волноводная согласованная поглощающая нагрузка	21
1.4. Указание мер безопасности.....	22
1.5. Подготовка к измерениям.....	22
1.6. Порядок выполнения работы	23
1.7. Указания к оформлению результатов	23
1.8. Указания к отчёту.....	24
1.9. Контрольные вопросы	24
Литература	25
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР	
2.1. Определение добротностей резонаторов, имеющих один вход, методом измерения коэффициента стоячей волны	26
2.2. Определение добротности резонаторов с одним входом методом измерения полных сопротивлений.....	30
2.3. Описание лабораторной установки.....	33
2.4. Краткое описание приборов, устройств и компонентов лабораторной установки.....	33
2.4.1. Цилиндрический резонатор.....	33
2.4.2. Генератор сигналов высокочастотной Г4-81.....	35
2.4.3. Линия измерительная Р1-18	36
2.4.4. Измеритель отношений напряжений В8-7.....	37
2.4.5. Коаксиальный ферритовый вентель Э8-16	38
2.5. Порядок выполнения работы	39

2.6. Требования к оформлению результатов.....	40
2.7. Указания к отчёту.....	40
2.8. Контрольные вопросы.....	40
Литература.....	41

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. КООКСИАЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР

3.1. Метод рефлектометра.....	43
3.2. Описание лабораторной установки.....	46
3.3. Краткое описание приборов, устройств и компонентов лабораторной установки.....	46
3.3.1. Коаксиальный проходной перестраиваемый резонатор.....	46
3.3.1. Панорамный измеритель КСВН и ослаблений P2-53/2.....	48
3.3.3. Амплитудный детектор.....	49
3.3.4. Коаксиальная поглощающая согласованная нагрузка.....	50
3.4. Указание мер безопасности.....	51
3.5. Подготовка к измерениям.....	51
3.6. Проведение измерений.....	52
3.7. Указания к оформлению результатов.....	53
3.8. Указания к отчёту.....	53
3.9. Контрольные вопросы.....	54
Литература.....	54

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ТОРОИДАЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР

4.1. Метод измерения добротности резонатора по декременту затухания.....	56
4.2. Описание лабораторной установки.....	57
4.3. Краткое описание приборов, устройств и компонентов лабораторной установки.....	57
4.3.1. Эхо-резонатор ТЭБ-50.....	57
4.3.2. Генератор сигналов высокочастотной Г4-31.....	59
4.3.3. Генератор сигналов высокочастотной Г5-15.....	60
4.3.4. Осциллограф импульсный С1-20.....	61
4.4. Указание мер безопасности.....	62
4.5. Подготовка к измерениям.....	62
4.6. Порядок выполнения работы.....	62
4.7. Указания к оформлению результатов.....	63
4.8. Указания к оформлению отчёта.....	63
4.9. Контрольные вопросы.....	63
Литература.....	64

Список сокращений

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
ВЧ – высокочастотный
ГКЧ – генератор качающейся частоты
КСВН – коэффициент стоячей волны напряжения
НО – направленный ответвитель
НЧ – низкочастотный
СВЧ – сверхвысокочастотный
ЭЛТ – электронно-лучевая трубка

ВВЕДЕНИЕ

В1. Общие положения

Роль измерений в современной радиофизике и электронике не только весьма значительна, но и продолжает неуклонно возрастать. Это связано с бурно растущим внедрением аппаратуры СВЧ в военную и космическую технику, физику, астрономию, различные производства и т. д. В соответствии с этим резко возросли требования, предъявляемые к приборам СВЧ, как с точки зрения надёжности и стабильности работы, так и с точки зрения высокой, часто уникальной точности рабочих параметров. Всё это стимулирует совершенствование измерительной техники, а так же значительное увеличение числа сотрудников, занимающихся радиоизмерениями. Одновременно возрастает объём работ, связанных с измерениями при различного рода исследованиях, разработки и проектировании устройств, функциональных узлов, блоков и модулей радиоэлектронной техники. Совершенно очевидно, что при изучении радиофизики нельзя обойтись без практических работ по радиоизмерениям. Кроме того, такие работы закладывают основу для инженерного понимания всей проблемы в целом. Очевидно, что выполнение экспериментальных работ должно быть рекомендовано всему контингенту студентов, изучающих радиофизику.

В2. Методы измерения добротности полых резонаторов

Значения добротности (Q) объёмного резонатора могут быть определены экспериментально различными способами, которые можно разделить на четыре группы:

1. метод передачи;
2. метод измерения полного сопротивления;
3. метод измерения декремента затухания или метод измерения затухания переходного процесса;
4. динамические методы.

Метод передачи

В методе передачи резонатор с входными и выходными зажимами используется как передающее устройство. Зависимость выходного

сигнала от частоты f получается в виде обычной резонансной кривой. По ширине полосы пропускания этой кривой может быть вычислено значение добротности. Метод достаточно прост, но вследствие ряда практических трудностей требует большого внимания к некоторым деталям. Точные результаты могут быть получены только при соблюдении всех условий.

Метод измерения полного сопротивления

Этот метод основан на экспериментальном определении зависимости входного полного сопротивления резонатора от частоты f . Графические изображения зависимости от частоты полного сопротивления резонатора, отнесённого к положениям узла и пучности при расстройке, будут представлять собой соответственно окружность и прямую линию. Получаемые данные могут быть использованы для вычисления значений Q_0 , $Q_{\text{внеш.}}$ и $Q_{\text{нагр.}}$. Окружность может быть определена по трём точкам, поэтому для получения всех сведений о характеристиках резонатора, необходимо сделать только три независимых измерения полного сопротивления. Чтобы повысить точность, используют дополнительные данные, позволяющие оценить систематическую и случайную ошибки.

Данные измерения полного сопротивления могут использоваться следующими способами:

- можно воспользоваться сведениями о коэффициенте стоячей волны напряжения (КСВН) без соответствующих данных о фазе. Кривая зависимости КСВН от частоты будет содержать всю необходимую информацию. Использование этих данных аналогично использованию универсальной резонансной кривой колебательного контура на низких радиочастотах;

- можно использовать данными только о фазе, не имея сведений о КСВН.

Более подробное рассмотрение этих способов показывает, что иногда достаточно выбрать тот из них, который в зависимости от условий эксперимента удобнее. В некоторых случаях правильный выбор способа определения характеристик резонатора приводит к большей точности. Рассмотрим кривые входного полного сопротивления, нанесённые на круговую диаграмму, для трёх степеней связи (рис. 1).

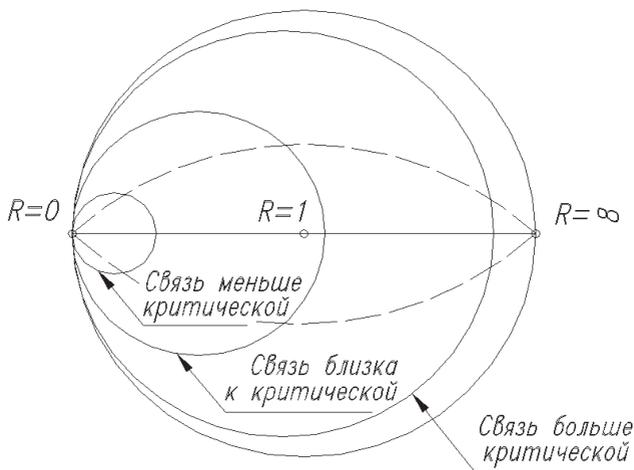


Рис. 1. Входное полное сопротивление объёмного резонатора, пересчитанное в положение узла при расстройке и нанесённое на круговую диаграмму для трёх степеней свободы

При связи резонатора с передающей линией, близкой к критической, окружность пересекает действительную ось вблизи точки $(1,0)$. В этом случае сведения, получаемые из данных о КСВН и фазе, равноценны. Все же большая часть получается, если полное сопротивление при каждом значении частоты измеряется как комплексная величина. При слабой связи ($\beta \ll 1$) геометрическое место точек входного полного сопротивления представляет собой весьма небольшую окружность, точки которой охватывают лишь незначительный интервал изменения фазового угла. Поэтому данные о фазе не могут дать высокой точности. В то же время КСВН, соответствующий точкам этой окружности, сильно меняется при изменении частоты. В этом случае достаточно точные результаты даёт определение интервала частот между точками, соответствующими «половинной мощности».

Если связь значительно больше критической ($\beta \gg 1$), окружность приближается к границе круговой диаграммы. При этом величина КСВН велика и существенно не меняется, в то время как фазовый угол изменяется быстро и даёт необходимые данные.

Метод измерения декремента затухания или метод измерения затухания переходного процесса

Метод измерения декремента затухания применим, в частности, для резонаторов с высокой добротностью. Он основывается на использовании явления затухания собственных колебаний в резонаторе.

Динамические методы

Это группа методов, которые основаны на динамическом наблюдении характеристик резонатора. При этом снижаются требования к стабильности частоты сигнала; значения Q могут быть получены быстрее, иногда непосредственно путём отсчёта по прибору.

Лабораторная работа № 1

ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР

- Цель работы:* изучить физический принцип действия, конструкцию, параметры и характеристики прямоугольного резонатора, а также устройство и принцип действия панорамного измерителя КСВН и ослабления Р2-61
- Самостоятельная работа:* – изучить пособие;
– занести в рабочую тетрадь: название и цель лабораторной работы, основные положения, формулы и рисунки, необходимые при ответе на контрольные вопросы

1.1. Метод рефлектометра

Метод рефлектометра основан на определении падающих и отражённых волн в стандартной линии передачи, подключённой к испытываемому устройству, и вычислении коэффициента отражения в соответствии с определением:

$$\Gamma = E_{\text{отр}} / E_{\text{пад}} \quad (1.1)$$

Первые, работающие по этому методу, средства измерений получили название *рефлектометров*. Основным элементом рефлектометра является устройство для выделения падающих и отражённых волн в линии – направленный ответитель.

Направленный ответитель – это устройство, которое служит для ответвления из основного высокочастотного тракта части мощности одной из двух бегущих волн, распространяющихся по линии передачи в противоположных направлениях: падающей или отражённой волны.

Направленный ответитель состоит из двух, связанных между собой, отрезков линий передач.

Рассмотрим принцип действия направленного ответителя, входящего в состав рефлектометра, на примере волноводного устройства с двумя элементами связи (рис. 1.1).

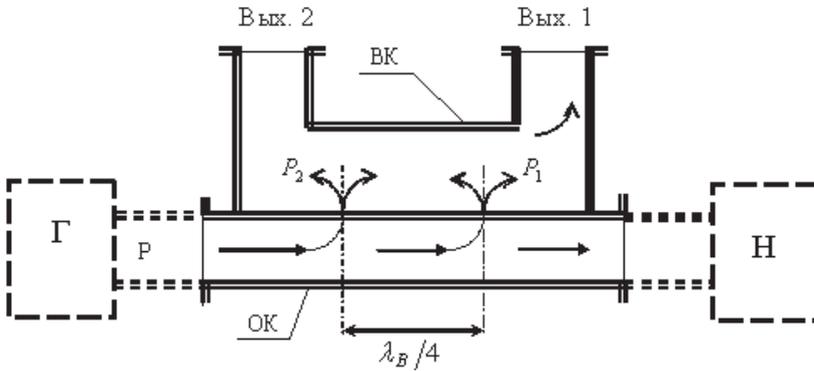


Рис. 1.1. Принцип работы волноводного направленного ответвителя.
Г – генератор, Н – нагрузка, ВК – вторичный канал

Волновод, через который проходит сигнал от генератора Г к нагрузке Н, называют основным каналом направленного ответвителя (ОК). Волновод, который связан с основным, называют вторичным каналом (ВК). Волноводы расположены параллельно друг другу и имеют общую широкую стенку. В общей стенке выполнены два отверстия (либо поперечные щели) на расстоянии четверти длины волны в волноводе одно от другого. Волна P , бегущая в основном канале от генератора к нагрузке, возбуждает во вторичном канале волны, распространяющиеся в обе стороны от каждого из отверстий. При сложении этих волн происходит следующее. Волны, бегущие от отверстий в том же направлении, что и в основном канале, имеют одинаковые фазы, и, складываясь, дают волну мощностью P_1 , бегущую к выходу 1 (Вых. 1). Волны, бегущие от отверстий в противоположном направлении, имеют разность хода $\lambda_{\text{в}}/2$ ($\lambda_{\text{в}}$ – длина волны в волноводе), т. е. находятся в противофазе. Если амплитуды волн от каждого из отверстий равны, то они компенсируют одна другую. Таким образом, если в основном канале существует волна только одного направления, то в этом случае мощность волны P_2 , бегущей к выходу 2 (Вых. 2), будет равна нулю. Точно также волна, бегущая в основном канале от нагрузки к генератору (отражённая волна), образует в канале ВК волну, бегущую лишь к выходу 2.

Лабораторная работа № 1

Таким образом, если к выходам 1 и 2 подключить неотражающие (согласованные) индикаторы мощности, то на выходе 1 будем иметь информацию о мощности волны, падающей к нагрузке, а на выходе 2 – отражённой от нагрузки.

Для получения одновременной информации о падающей и отражённой волнах необходимо два ответвителя. Их соединение показано на рисунке 1.2.

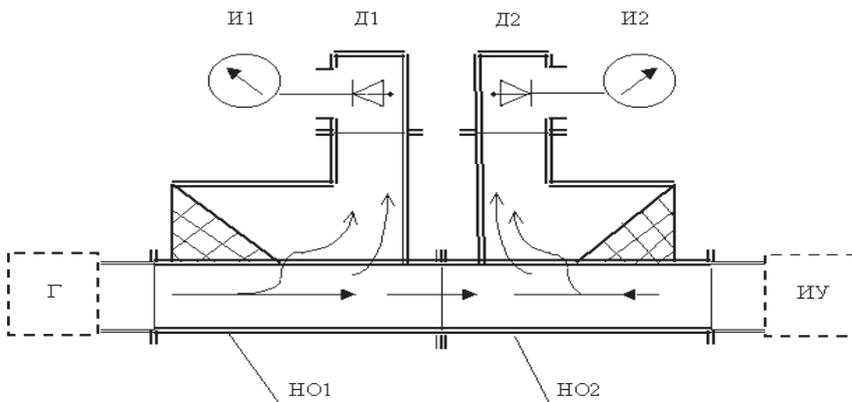


Рис. 1.2. Принцип работы рефлектометра:

Г – генератор, ИУ – испытуемый узел, Д1, 2 – амплитудный детектор, И1,2 – индикатор, НО1,2 – основные каналы ответвителей

При таком соединении сигнал от генератора Г проходит через основные каналы ответвителей НО1 и НО2, попадает на вход испытуемого узла ИУ. Выход вторичного канала ответвителя НО1 нагружен на детекторную секцию Д1 (амплитудный детектор) с индикатором И1, который даёт показания, пропорциональные падающей мощности. Выход вторичного канала ответвителя НО2 нагружен на детекторную секцию Д2 (амплитудный детектор) с индикатором И2. Его показания пропорциональны мощности, отражённой от испытуемого узла ИУ.

Если коэффициенты передачи детекторных секций равны, а переходные ослабления ответвителей одинаковы, то отношение показаний индикаторов И2 и И1 даёт значение квадрата модуля коэффициента отражения:

$$\Gamma^2 = \frac{i_2}{i_1}, \quad (1.2)$$

где i_1 и i_2 – отсчёты по шкалам индикаторов И1 и И2 соответственно.

В настоящее время устройство, показанное на рисунке 1.2, является основным узлом панорамных измерителей КСВН и измерителей комплексных коэффициентов передачи.

Основными источниками погрешностей данного метода являются:

- неидентичность характеристик ответвителей, детекторных секций и индикаторов;
- отклонение ВАХ диодов от квадратичной;
- распределённые потери в основных каналах ответвителей.

1.2. Описание лабораторной установки

На рисунке 1.3 представлена структурная схема калибровки установки для экспериментального изучения физического принципа действия прямоугольного резонатора.

На рисунке 1.4 изображена электрическая структурная схема измерения КСВН резонатора.

На рисунке 1.5 приведена электрическая структурная схема измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

1.3. Краткое описание приборов, устройств и компонентов лабораторной установки

1.3.1. Прямоугольный резонатор

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот.....	8,3–12,05 ГГц
Сечение волноводного тракта (a×b).....	23×10 мм
КСВН	1,05

Описание устройства

Конструкция устройства представлена на рисунке 1.6

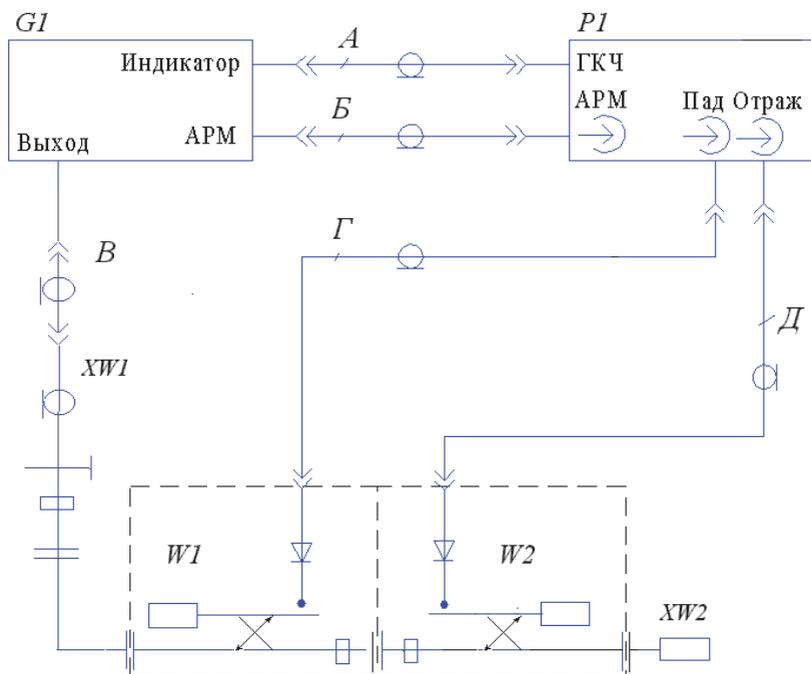


Рис. 1.3. Схема электрическая структурная калибровки прибора P2-61:

G1 – генератор качающейся частоты (ГКЧ) панорамного измерителя КСВН и ослаблений P2-61;

P1 – индикаторный блок Я2Р-61 измерителя КСВН и ослаблений P2-61;

A, Б, В, Г, Д – кабели высокочастотные из комплекта P2-61;

XW1 – коаксиально-волноводный переход (из комплекта P2-61);

XW2 – волноводная согласованная нагрузка (из комплекта P2-61)

W1, W2 – рефлектометры падающей и отражённой волн (из комплекта P2-61);

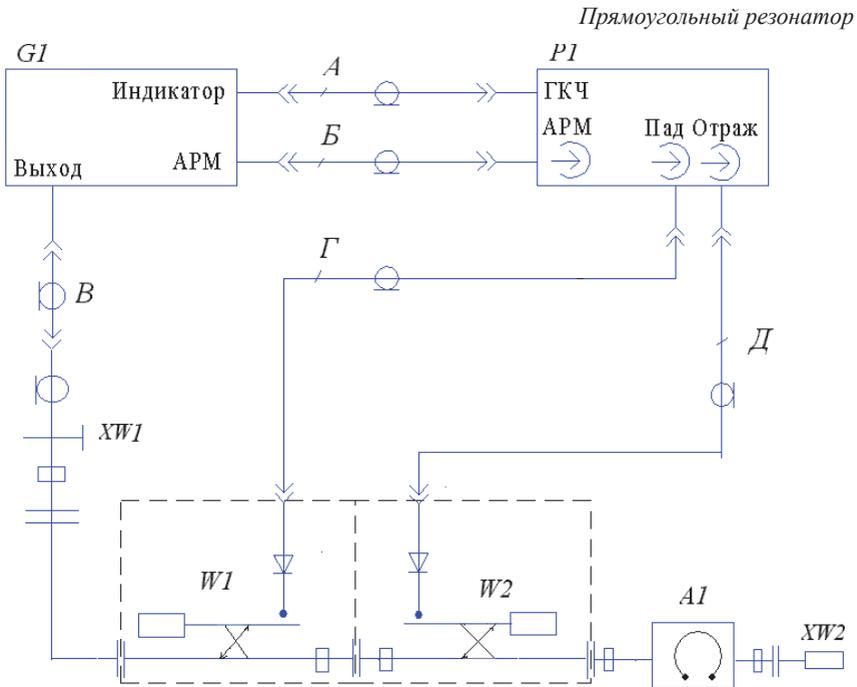


Рис. 1.4. Схема электрическая структурная измерения КСВН прямоугольного резонатора:

- G1 – ГКЧ панорамного измерителя КСВН и ослаблений P2-61;
- A1 – изучаемый прямоугольный резонатор;
- P1 – индикаторный блок Я2Р-61 измерителя КСВН и ослаблений P2-61;
- A, Б, В, Г, Д – кабели высокочастотные (из комплекта P2-61);
- XW1 – коаксиально-волноводный переход (из комплекта P2-61);
- XW2 – волноводная согласованная нагрузка (из комплекта P2-61)
- W1, W2 – рефлектометры падающей и отраженной волн (из комплекта P2-61);

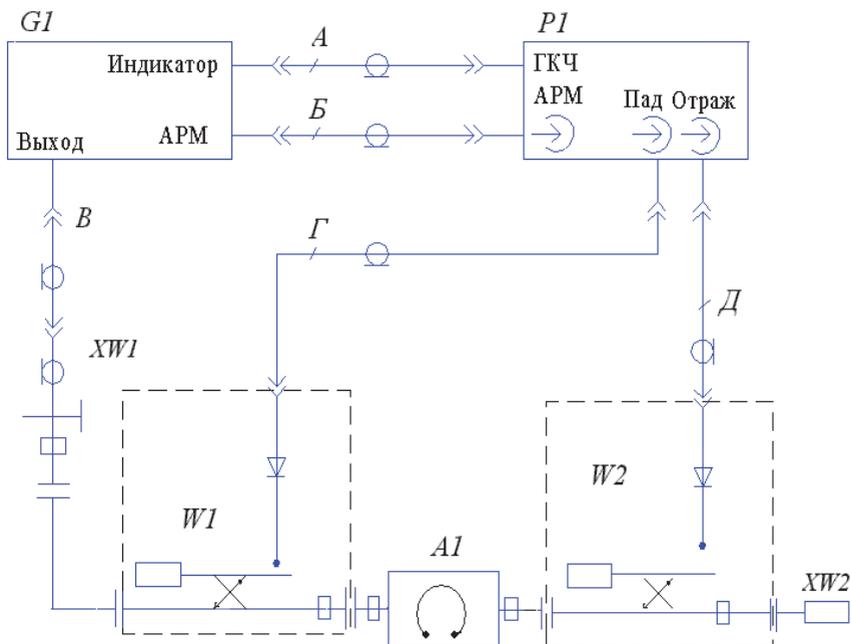


Рис. 1.5. Схема электрическая структурная измерения коэффициента передачи прямоугольного резонатора:

- G1 – ГКЧ панорамного измерителя КСВН и ослаблений P2-61;
- P1 – индикаторный блок Я2Р-61 панорамного измерителя КСВН и ослаблений P2-61;
- A1 – изучаемый прямоугольный резонатор;
- A, Б, В, Г, Д – кабели высокочастотные из комплекта P2-61;
- XW1 – коаксиально-волноводный переход из комплекта P2-61;
- XW2 – волноводная согласованная нагрузка из комплекта P2-61
- W1, W2 – рефлектометры падающей и отражённой волн из комплекта P2-61;

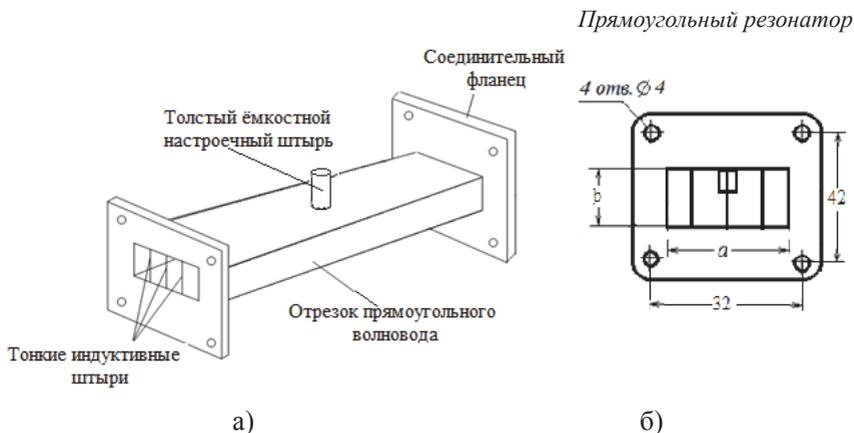


Рис. 1.6. Конструкция изучаемого прямоугольного резонатора:
а) общий внешний вид; б) вид со стороны фланца

Прямоугольный резонатор образован отрезком прямоугольного волновода с двумя фланцами на концах, с индуктивными неоднородностями (тонкими штырями). Резонатор имеет настроечный элемент в виде толстого ёмкостного штыря.

1.3.2. Измеритель КСВН панорамный Р2-61

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот.....	8,24–12,05 ГГц
Пределы измерения КСВН.....	1,05–5,0
Пределы измерения ослабления	–35–0 дБ
Пределы допустимой погрешности измерения:	
– КСВН.....	не более 5%
– ослабления.....	не более 5%
Полоса качания частоты измерителя:	
– максимальная.....	полный диапазон частот
– минимальная.....	не более 120 МГц
Амплитуда частотных меток.....	0–5 мм

Лабораторная работа № 1

Сечение коаксиального выхода.....	7/3 мм
Волновое сопротивление.....	50 Ом
Время самопрогрева.....	15 мин

Описание прибора

Работа измерителя основана на принципе рефлектометра – раздельного выделения сигналов, пропорциональных мощностям падающей от генератора и отражённой от измеряемого объекта (при измерении КСВН) или прошедшей через измеряемый объект (при измерении ослабления) волн.

Сигналы, пропорциональные падающей и отраженной мощности, поступают с детекторных головок, встроенных во вспомогательных трактах, на индикаторный прибор.

1.3.3. Волноводные направленные ответвители

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот.....	8,3–11,55 ГГц
Направленность.....	35 дБ
Переходное ослабление на верхней частоте диапазона	10 ± 1 дБ
Частотная зависимость переходного ослабления.....	± 1 дБ
КСВН основного канала.....	1,05
КСВН вспомогательного канала.....	1,15
Сечение волноводного тракта.....	23×10 мм

Описание устройства

Волноводный направленный ответвитель – интерференционный, со многими одинаковыми элементами связи в виде круглых отверстий в общей широкой стенке. В одном из плеч вспомогательного волновода установлена поглощающая нагрузка (рис. 1.7).

Прямоугольный резонатор

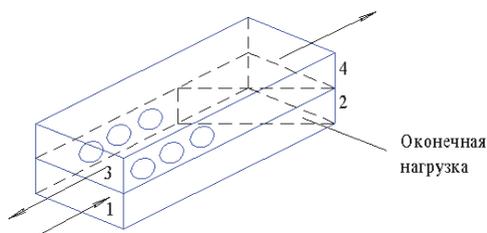


Рис. 1.7. Схематическое изображение направленного ответвителя

Выход вспомогательного волновода направленного ответвителя нагружен на детекторную секцию. Используемый направленный ответвитель относится к типу – волноводный направленный ответвитель с ненаправленными элементами связи. Он состоит из двух отрезков прямоугольного волновода сечением 23×10 мм, которые имеют на некотором участке общую широкую стенку. В стенке имеется система одинаковых круглых отверстий, соединяющих внутренние пространства обоих отрезков волновода. Расстояние между соседними отверстиями равно $\lambda_{\text{в}}/4$. У отрезка основного волновода один конец открыт и имеет фланец, на другом жёстко закреплена внутренняя согласованная с волноводом оконечная нагрузка. Открытые концы вспомогательного волновода обращены в противоположные стороны и имеют фланцы. Электромагнитная энергия попадает в основной волновод. Через отверстия связи энергия частично ответвляется во вспомогательный волновод.

Некоторая доля энергии, оставшаяся во входном отрезке, достигает оконечной нагрузки и рассеивается в ней в виде тепла. Незначительная доля ($< 1\%$) отражается от оконечной нагрузки. Перешедшая во вспомогательный волновод энергия в силу направленного действия системы отверстий распространяется в сторону выхода, меньшая же часть распространяется в противоположную сторону

1.3.4. Амплитудный детектор

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот.....	8,8–12 ГГц
Чувствительность.....	500 мкА/мВт

Лабораторная работа № 1

Сечение коаксиального тракта.....	7/3 мм
Волновое сопротивление.....	50 Ом
КСВН.....	1,5
Тип диода.....	Д403В

Описание устройства

Коаксиальный вариант амплитудного детектора представлен на рисунке 1.8. Диод ввинчивается в держатель 2, заканчивающийся низкочастотным (НЧ) разъемом 3.

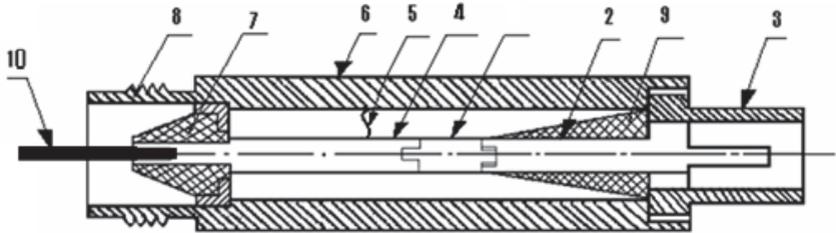


Рис. 1.8. Продольное сечение коаксиального амплитудного детектора

Другим фланцем диод входит в цангу центрального проводника 4 коаксиала, который закорочен провололочкой 5 на корпус секции 6. Таким образом, замыкается цепь диода по постоянному току, для СВЧ же сигнала провололочка 5 представляет собой большое индуктивное сопротивление. Диэлектрическая шайба 7 СВЧ разъёма 8 центрирует проводник 4. Поглощающая диэлектрическая вставка 9 препятствует просачиванию СВЧ мощности на НЧ выход 3. Таким образом, диод является нагрузкой СВЧ тракта и поглощает СВЧ мощность, поступающую со штыря связи 10, преобразуя её в постоянный ток.

1.3.5. Коаксиально-волноводный переход

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот.....	8,3–11,55 ГГц
Волновое сопротивление коаксиального выхода.....	50 Ом

Сечение волноводного тракта.....	23×10 мм
КСВН.....	1,25

Описание устройства

Схема широкополосного коаксиально-волноводного перехода изображена на рисунке 1.9.

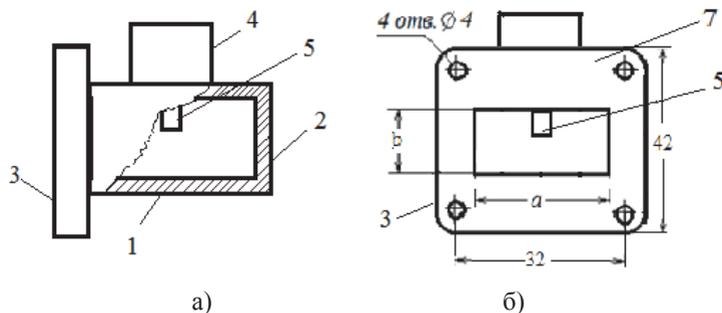


Рис. 1.9. Схематическое устройство коаксиально-волноводного перехода – а) и вид со стороны фланца – б):

1 – волновод; 2 – задняя стенка (линия короткого замыкания); 3 – фланец; 4 – коаксиальный гнездовой разъём; 5 – штырь связи

Коаксиально-волноводный переход выполнен в виде отрезка волновода 1, закороченного с одного конца 2 и снабжённого фланцем 3 на другом конце. К широкой стенке волновода, в середине которого имеется отверстие, припаян штуцер 4, являющийся внешним проводником коаксиальной линии. Внутренний проводник коаксиальной линии входит в волновод в виде штыря связи 5.

1.3.6. Волноводная согласованная поглощающая нагрузка

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот	8,3–11,55 ГГц
КСВН	не более 1,05
Сечение волноводного тракта	23×10 мм
Наибольшая мощность рассеивания	0,5 Вт

Лабораторная работа № 1

Описание устройства

Волноводная согласованная поглощающая нагрузка представляет собой отрезок прямоугольного волновода 1 (рис. 1.10), закороченного с одного конца 2 и снабжённого фланцем 3 на другом конце, в который помещается объёмный поглощающий резистор 4 клиновидной формы.

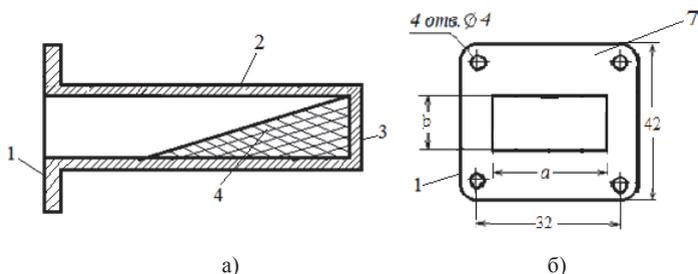


Рис. 1.10. Продольное сечение параллельно узким стенкам волноводной согласованной поглощающей нагрузки – а) и вид со стороны фланца – б): 1 – фланец; 2 – волновод; 3 – задняя стенка (линия короткого замыкания); 4 – поглощающая пластина.

Материалом поглощающего резистора служат полижелезо, феррооксид, керографит и др. Клиновидная форма поглощающего резистора обеспечивает минимальный КСВН в широком диапазоне частот.

1.4. Указание мер безопасности

ВНИМАНИЕ!

Перед тем, как приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо ознакомиться с правилами, изложенными в «Инструкции по технике безопасности для студентов в учебной лаборатории». Изучить раздел «Указание мер безопасности» в «Техническом описании и инструкции по эксплуатации» (ТО и ИЭ) для каждого прибора, входящего в установку. Руководствоваться этими документами при выполнении работы.

1.5. Подготовка к измерениям

Для подготовки к измерениям необходимо выполнить следующее:

- 1) изучить краткие теоретические сведения;

- 2) ознакомиться с каждым прибором по «ТО и ИЭ»;
- 3) собрать рабочее место согласно схеме на рисунке 1.3;
- 4) включить приборы тумблером СЕТЬ и подготовить их к работе;
- 5) провести калибровку прибора;
- 6) выключить генерацию мощности тумблером ГЕН.

1.6. Порядок выполнения работы

1.6.1. Измерение КСВН резонатора

Собрать схему работы в соответствии с рисунком 1.4 и измерить КСВН резонатора.

1.6.2. Измерение резонансной кривой резонатора

1. Собрать схему работы в соответствии с рисунком 1.5.
2. Найти отклик сигнала, прошедшего через резонатор. Зарисовать в тетради наблюдаемую визуально характеристику, отметив особые точки по частоте.
3. Провести измерение параметров резонансной кривой:
 - а) Определить резонансную частоту f_0 .
 - б) Определить потери на резонансной частоте. Для этого ручкой ОТСЧЁТ совместить линию электронного визира с вершиной АЧХ. Записать показания L_0 (дБ) по шкале отсчёта.
 - в) Определить ширину полосы на уровне 3дБ. Для этого:
 - ручкой ОТСЧЁТ опустить линию электронного визира на 3 дБ от предыдущего положения;
 - нажать кнопку M_2 и, перемещая метку с помощью ручки M_2 на точки пересечения АЧХ с линией электронного визира, измерить по цифровому индикатору частоты f_H и f_G .
4. Выключить приборы тумблером СЕТЬ.
5. Собрать схему калибровки в соответствии с рисунком 1.3.

1.7. Указания к оформлению результатов

1. Построить график зависимости затухания от частоты:

$$L, \text{ дБ} = F(f), \text{ ГГц.}$$

2. Вычислить абсолютную ширину полосы пропускания резонатора:

$$\Delta f = f_B - f_H.$$

Лабораторная работа № 1

3. Рассчитать нагруженную добротность прямоугольного резонатора:

$$Q_0 = \frac{f_0}{\Delta f}.$$

4. Рассчитать собственную добротность прямоугольного резонатора

$$Q_0 = \frac{1}{\delta} \frac{a l b (a^2 + l^2)}{a l (a^2 + l^2) + 2b (a^3 + b^3)},$$

где a, b, l – размеры резонатора ($a = 23$ мм, $b = 10$ мм, $l = 55$ мм); δ – глубина проникновения поля в металл в сантиметрах: $\delta = 6,6/\sqrt{f_0}$ для меди; $\delta = 6,4/\sqrt{f_0}$ для серебра.

5. Рассчитать внешнюю добротность прямоугольного резонатора:

$$\frac{1}{Q_{BH}} = \frac{1}{Q_H} + \frac{1}{Q_0}.$$

1.8. Указания к отчёту

Отчёт должен содержать:

- а) все пункты задания;
- б) графики и расчёты, отражающие результаты работы;
- в) выводы по работе и оценку полученных результатов (письменно).

1.9. Контрольные вопросы

1. Дайте определение прямоугольному резонатору?
2. Опишите структуру поля в прямоугольном резонаторе.
3. Что представляет собой объёмный резонатор?
4. Дайте определение собственной, внешней и нагруженной добротности?
5. Какие существуют методы измерения добротности.
6. Дайте определение коэффициенту связи?
7. Что произойдёт в проходном резонаторе при увеличении внешней добротности?
8. Объясните принцип работы рефлектометров.
9. Опишите структурную схему и принцип действия измерительной установки.
10. Поясните полученные результаты.

Литература

1. *Бондаренко, И. К.* Автоматизация измерений параметров СВЧ трактов / В. И. Бондаренко, Г. А. Денег, З. В. Магачёв. – М.: Сов. радио, 1969. – 304 с.
2. *Валитов, Р. А.* Радиоизмерения на сверхвысоких частотах / Р. А. Валитов, В. Н. Сретенский. – М.: Воениздат, 1958. – 438 с.
3. *Вальднер, О. А.* Техника сверхвысоких частот: учебная лаборатория / О. А. Вальднер, О. С. Милованов, Н. П. Сабенин. – М.: Атомиздат, 1974. – 232 с.
4. Вентиль коаксиальный Э8-16: техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М., 1983. – 16 с.
5. Генератор сигналов высокочастотный Г4-81, Г4-83: техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Горький, 1987. – 140 с.
6. *Гинзтон, Э. Л.* Измерения на сантиметровых волнах / Э. Л. Гинстон; под ред. Г. А. Ремеза. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 620 с.
7. Измеритель КСВН панорамный Р2-61: техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1984. – 43 с.
8. Измеритель отношения напряжений В8-7: техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1987. – 112 с.
9. *Лебедев, И. В.* Техника и приборы сверхвысоких частот: в 2-х т. / И. В. Лебедев. Т. 1. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 512 с.
10. Линия измерительная Р1-18: техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1984. – 52 с.
11. *Мардин, В. В.* Справочник по электронно-измерительным приборам / В. В. Мардин, А. И. Кривоносов. – М.: Связь, 1978. – 416 с.
12. *Миклашевская, А. В.* Автоматические измерители в диапазоне СВЧ / А. В. Миклашевская. – М.: Связь, 1972. – 80 с.
13. *Нойкин, Ю. М.* Детекторный СВЧ диод: метод. указания к спец. лаб. практикуму «Твердотельная электроника СВЧ». Ч. II. / Ю. М. Нойкин, Т. К. Нойкина, А. М. Лерер. – Ростов н/Д: УПЛ РГУ, 1995. – 34 с.
14. Спецпрактикум по сверхвысоким частотам; под ред. В. С. Михалевского. – Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 1964. – 84 с.
15. *Тишер, Ф.* Техника измерений на сверхвысоких частотах / Ф. Тишер. – М.: Физматгиз, 1963. – 367 с.

Лабораторная работа № 2

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР

Цель работы: изучить физический принцип действия, конструкцию, параметры и характеристики цилиндрического резонатора и принцип действия приборов, входящих в лабораторную установку.

Самостоятельная работа:

- изучить пособие;
- занести в рабочую тетрадь: название и цель лабораторной работы, основные положения, формулы и рисунки, необходимые при ответе на контрольные вопросы.

2.1. Определение добротностей резонаторов, имеющих один вход, методом измерения коэффициента стоячей волны

Чтобы определить добротность резонатора, включённого как оконечная нагрузка (рис. 2.1), с помощью измерительной линии необходимо найти зависимость полного сопротивления или коэффициента стоячей волны напряжения ρ от частоты и величину коэффициента связи k_c резонатора с внешним трактом.

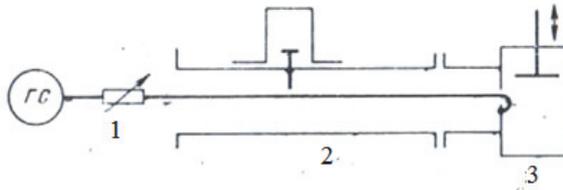


Рис. 2.1. Схема измерения добротности резонатора, включённого в качестве оконечной нагрузки: 1 – аттенюатор; 2 – измерительная линия; 3 – резонатор

Коэффициент связи k_c представляет собой отношение вносимого активного сопротивления внешней цепи к активному сопротивлению резонатора. Если коэффициент связи $k_c = 1$, то связь называют критиче-

ской. В большинстве случаев достаточно только измерения КСВН, что упрощает процесс измерения и даёт для средних и высоких значений добротности приемлемую точность.

Измерять также и фазу на входе исследуемого устройства необходимо с целью увеличения точности измерения при низких значениях нагруженной добротности, т. е. при связи, близкой к критической ($k_c \approx 1$).

Процесс измерения начинается с нахождения и фиксирования положения минимума напряжения в измерительной линии при полной расстройке резонатора. При этом, если нет потерь в цепях связи, линия окажется нагруженной на чисто реактивное сопротивление. Если резонатор не перестраиваемый, то его расстройки от резонансной частоты добиваются перестройкой частоты генератора. Для резонаторов, имеющих средние (сотни и тысячи) и высокие (десятки тысяч и более) значения добротности, потребуется небольшое изменение частоты генератора для отстройки от резонанса, так что положение минимума изменится незначительно и мало повлияет на точность измерения. Если же необходима более высокая точность или добротность измеряемого резонатора ожидается невысокой, то следует измерить частотную зависимость положения минимума в области резонансной частоты резонатора и затем при дальнейших операциях относить измерения к тому положению минимума, которое соответствует данной частоте.

Установив зонд в положение минимума при расстройке, необходимо определить значение коэффициента связи k_c . Для этого, не меняя положения зонда на линии, резонатор настраивают в резонанс, чему должен соответствовать максимум или минимум напряжения стоячей волны на зонде, так как при резонансе сопротивление резонатора становится чисто активным.

Несовпадение положения минимума или максимума напряжения стоячей волны при настройке резонатора в резонанс с положением минимума при расстройке указывает на допущенные ошибки и требует тщательной последовательной проверки всех операций. Во избежание неправильной настройки необходимо обеспечить активный характер импеданса в сторону генератора. Развязывающие аттенюаторы с поглощением на 10–15 дБ и КСВН $\rho \approx 1,1$ –1,2 практически полностью обеспечивают это требование. Если в положении узла при расстройке окажется минимум напряжения стоячей волны при резонансе, то связь

Лабораторная работа № 2

будет меньше критической ($k_c < 1$), если окажется максимум напряжения, то связь – больше критической ($k_c > 1$).

Зная характер связи и измеряя КСВН при резонансе ρ_0 , можно найти коэффициент связи:

$k_c = 1/\rho_0$ – при связи меньше критической;

$k_c = \rho_0$ – при связи больше критической.

Для определения добротности резонатора Q_0 остаётся найти величину КСВН на частотах, соответствующих точкам половинной мощности на резонансной кривой. На этих частотах (f_1, f_2), отстоящих от резонансной частоты f_0 эквивалентного резонатора, значение активной составляющей импеданса резонатора равно значению реактивной составляющей ($R = |X|$). Так как в рассматриваемой методике фазовые углы не измеряются, необходимо пользоваться зависимостью КСВН от k_c в точках половинной мощности. Значения КСВН на частотах, соответствующих точкам половинной мощности, можно определить с помощью следующих выражений:

– для добротности резонатора в ненагруженном состоянии Q_0 на частотах f_1 и f_2

$$\rho_{0(1/2)} = \frac{2 + k_c + \sqrt{4 + k_c^4}}{2k_c}; \quad (2.1)$$

– для добротности резонатора в нагруженном состоянии Q_n на частотах f_3 и f_4

$$\rho_{n(1/2)} = \frac{1 + k_c + k_c^2 + (1 + k_c)\sqrt{1 + k_c^2}}{k_c}. \quad (2.2)$$

И, наконец, величины добротности находятся по значениям частот, при которых будут измеряться эти значения КСВН. Практически добротность находят, измеряя зависимость КСВН от частоты вблизи резонансной частоты f_0 . В результате добротность резонатора в ненагруженном состоянии определяется выражением:

$$Q_0 = f_0(f_2 - f_1), \quad (2.3)$$

где f_2 и f_1 – частоты соответственно выше и ниже резонансной, на которых измеряются значения КСВН $\rho_{0(1/2)}$ и $\rho_{n(1/2)}$.

Добротность можно выразить через величины относительной расстройки частоты на величины δf_2 и δf_1 от резонансной, т. е.

$$Q_0 = \frac{1}{\delta f_2 - \delta f_1}. \quad (2.4)$$

$$\delta f_{1(2)} = \frac{f_{1(2)} - f_0}{f_{1(2)}} = \frac{\Delta f}{f}. \quad (2.5)$$

Аналогично добротность нагруженного резонатора определяется выражением:

$$Q_n = \frac{f_0}{f_4 - f_3} = \frac{1}{\delta f_4 - \delta f_3}. \quad (2.6)$$

Для ряда характерных значений коэффициента связи k_c можно привести зависимости отношений КСВН в точках половинной мощности к значению КСВН при резонансе. При $k_c \ll 1$ (слабая связь; эквивалентная добротность близка к собственной добротности резонатора):

$$\left(\frac{\rho_{1/2}}{\rho_0} \right)_0 = 2; \quad \left(\frac{\rho_{1/2}}{\rho_0} \right)_H = 2. \quad (2.7)$$

При $k_c \gg 1$ (сильная связь):

$$\left(\frac{\rho_{1/2}}{\rho_0} \right)_0 = 1; \quad \left(\frac{\rho_{1/2}}{\rho_0} \right)_H = 2. \quad (2.8)$$

Отсюда видно, что при $k_c \gg 1$ КСВН в точках половинной мощности, как для Q_0 , так и для Q_n , равен удвоенному минимальному значению КСВН, соответствующему резонансной частоте. Следовательно, в этом случае по измерениям величин КСВН легко определить оба значения добротности. При $k_c \gg 1$ также легко находить значения нагруженной добротности, в то время как значение собственной добротности определить непосредственно невозможно, поскольку значение КСВН на частотах, соответствующих точкам половинной мощности, относительно резонансного КСВН изменяться не будет. В этом случае для вычисления собственной добротности резонатора нужно знать величину коэффициента связи k_c . Тогда:

$$Q_0 = Q_n (1 - k_c). \quad (2.9)$$

Зная величину коэффициента связи, можно также найти значение внешней добротности элементов связи:

$$1/Q_n = 1/Q_0 + 1/Q_{вн}, \quad (2.10)$$

где $Q_{вн}/Q_0 k_c$.

2.2. Определение добротности резонаторов с одним входом методом измерения полных сопротивлений

Схема измерения аналогична, представленной на рисунке 2.1. Первый этап методики измерения, как и в п. В2, состоит в нахождении опорной плоскости на линии, т. е. в определении положения минимума напряжения стоячей волны при расстроенном резонаторе.

На следующем этапе находят зависимость входного полного сопротивления (импеданса) резонатора Z от частоты. Для этого, последовательно меняя частоту вблизи резонансной (f_0), измеряют значения полных сопротивлений на каждой частоте, и по этим данным строят график зависимости полного сопротивления от частоты (рис. 2.2).

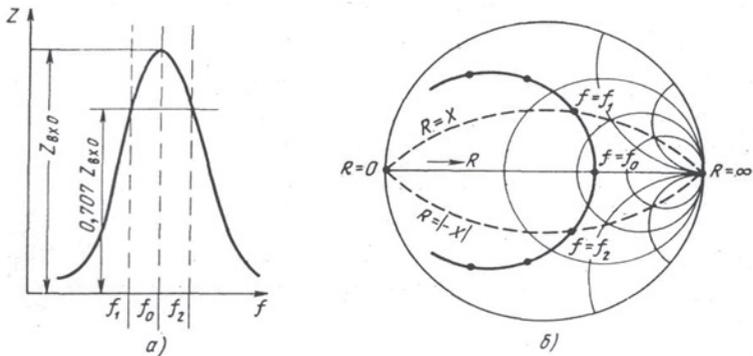


Рис. 2.2. Зависимости входного полного сопротивления резонатора от частоты: *а* – резонансная кривая; *б* – кривая, нанесённая на круговую диаграмму

Максимум полного сопротивления Z соответствует резонансной частоте f_0 резонансного контура, подключённого к линии передачи. Добротность резонатора определится соотношением:

$$Q_0 = f_0(f_2 - f_1), \quad (2.11)$$

где f_2 и f_1 – частоты соответственно выше и ниже резонансной, при которых величина измеряемого полного сопротивления составляет 0,707 от величины импеданса при резонансе.

Вместо построения графика, изображённого на рисунке 2.2а, значения полных сопротивлений, зависящие от частоты, можно нанести непосредственно на круговую диаграмму полных сопротивлений. Во многих случаях это оказывается более предпочтительным, так как даёт более полную информацию о свойствах измеряемого резонатора как оконечного СВЧ устройства.

На круговой диаграмме, приведённой на рисунке 2.2б, нанесена кривая изменения полного сопротивления резонатора при перестройке частоты. Точка, в которой кривая пересекает действительную ось (ось активных сопротивлений), соответствует резонансной частоте f_0 , при которой импеданс резонатора является чисто активным. Частоты f_1 и f_2 , соответствующие точкам половинной мощности, будут определяться по точкам графика полных сопротивлений, в которых активная составляющая полного сопротивления равна реактивной. Геометрическое место точек, соответствующих этому равенству $R = X$ и $R = -X$ представляет собой дуги окружностей, проходящих через крайние точки действительной оси круговой диаграммы (точки $R = 0$ и $R = \infty$). Центры этих окружностей лежат на окружности единичного коэффициента отражения (мнимой оси диаграммы) в точках $X/Z_0 = \pm 1$ (здесь Z_0 – волновое сопротивление линии передачи).

Таким образом, определив частоты f_1 и f_2 и подставив их в формулу (2.11), можно вычислить значение добротности ненагруженного резонатора.

При любых значениях коэффициента связи k_c пересечение кривой изменения входного полного сопротивления от частоты с окружностями $R = \pm X$ будет давать значения частот f_1 и f_2 для вычисления величины добротности ненагруженного резонатора.

Рассмотрим три характерные графика изменения входного полного сопротивления при изменении частоты для трёх различных степеней связи резонатора с линией передачи: связь значительно меньше критической ($k_c < 1$), близка к критической ($k_c \approx 1$), и больше критической ($k_c > 1$) (рис. 2.3).

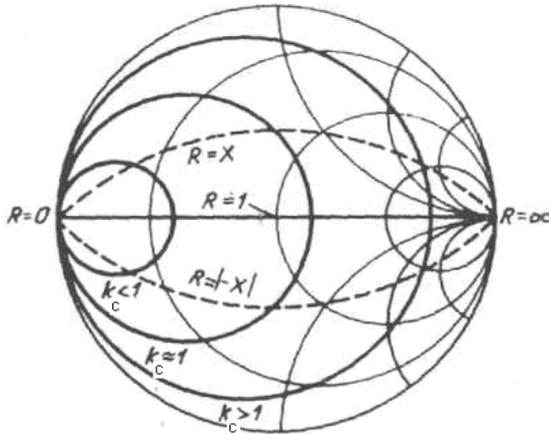


Рис. 2.3. Графики изменения входного полного сопротивления резонатора при различных степенях связи

С помощью этих графиков можно показать, в каких случаях необходимо измерять комплексное значение входного сопротивления (КСВН и фазу) резонатора, а в каких случаях достаточно измерить только значения КСВН.

При связи резонатора с линией передачи, близкой к критической ($k_c \approx 1$), кривая изменения полного сопротивления пересекает действительную ось вблизи центра круговой диаграммы. В этом случае ошибки в определении КСВН и фазы будут равноценны.

При слабой связи ($k_c \ll 1$) кривая изменения входного полного сопротивления от частоты представляет собой небольшую окружность, точки которой охватывают лишь незначительный интервал изменений фазовых углов, или реактивных составляющих. Следовательно, в этом случае лучше определять зависимости КСВН, так как фазовые измерения будут давать большие погрешности.

Цилиндрический резонатор

В случае сильной связи ($k_c \gg 1$) значительно превышающей критическую, окружность изменения входного полного сопротивления приближается к окружности единичного коэффициента отражения, т. е. к граничной окружности круговой диаграммы. В этом случае КСВН имеет большие значения, которые при перестройке будут меняться незначительно, в то время как фазовый угол будет изменяться существенно при самых малых перестройках. Следовательно, для определения добротности в этом случае необходимо измерять зависимость входного полного сопротивления резонатора от частоты.

2.3. Описание лабораторной установки

На рисунке 2.4 представлена структурная схема лабораторной установки.

Сигнал от генератора G1 поступает через ферритовый вентиль W1, который обеспечивает необходимую развязку между СВЧ трактом и генератором, в измерительную линию P2. Измерительная линия используется для измерения КСВН, характеризующего степень согласования цилиндрического резонатора A1 с основным трактом. Так как сигнал, поступающий с зонда измерительной линии, мал, то используется селективный измерительный усилитель P1. Измерения КСВН проводятся в режиме амплитудной модуляции генератора СВЧ. При работе с измерительной линией усилитель должен быть настроен на частоту модуляции СВЧ-сигнала.

2.4. Краткое описание приборов, устройств и компонентов лабораторной установки

2.4.1. Цилиндрический резонатор

Основные физические и технические параметры:

Диапазон собственных частот.....	3950–5500 МГц
Нагруженная добротность.....	5000
Погрешность установки резонансной частоты.....	0,1–0,05 %
КСВН.....	1,15

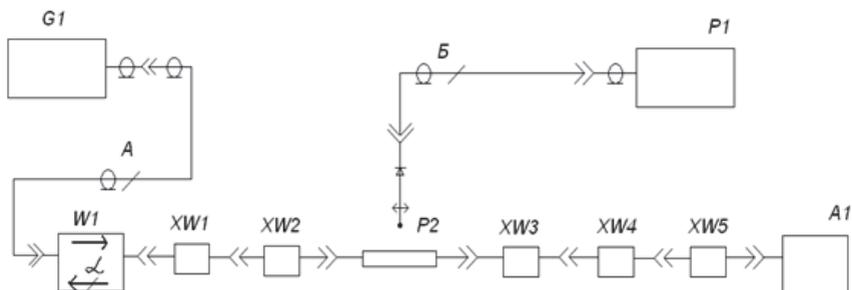


Рис. 2.4. Структурная схема лабораторной установки:

- A1 – изучаемый цилиндрический резонатор;
- G1 – генератор высокочастотный Г4-81;
- P1 – измеритель отношений напряжений В8-7;
- P2 – коаксиальная измерительная линия П1-18;
- W1 – вентиль ферритовый коаксиальный Э8-16;
- W2, W3 – коаксиальные уголкового переходы;
- XW1 – коаксиальный переход типа «штырь–гнездо»;
- XW2 – коаксиальный переход Э2-115/3 типа «штырь–штырь»;
- XW3 – коаксиальный переход типа «гнездо–гнездо»;
- XW4 – коаксиальный переход типа «штырь–гнездо»;
- XW5 – коаксиальный переход типа «штырь–штырь»;
- A – кабель высокочастотный из комплекта Г4-81;
- Б – кабель низкочастотный из комплекта П1-18

Цилиндрический резонатор

Сечение коаксиального тракта..... 10/4,34 мм

Волновое сопротивление..... 50 Ом

Описание устройства

Схематическое устройство цилиндрического резонатора с одним СВЧ входом представлено на рисунке 2.5.

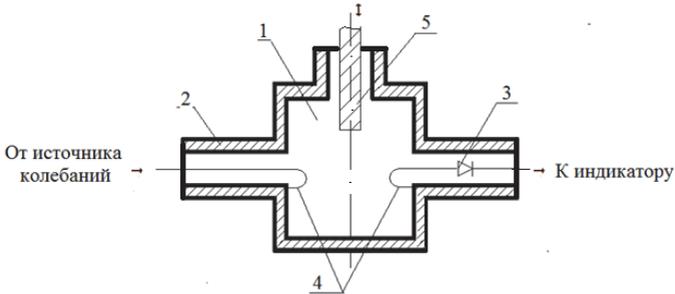


Рис. 2.5. Схематическое устройство цилиндрического резонатора с одним СВЧ входом, перестраиваемого с помощью укорачивающей ёмкости:

1 – цилиндрическая полость; 2 – высокочастотный вход;

3 – амплитудный детектор; 4 – петля связи; 5 – настраиваемый стержень

Устройство состоит из объёмного резонатора 1, возбуждаемого на низшем виде колебаний E_{010} . Связь резонатора с источником колебаний через высокочастотный вход 2 и амплитудным детектором 3, осуществляется двумя петлями связи 4, размещёнными на боковой поверхности цилиндра. Длина резонатора изменяется подвижной укорачивающей ёмкостью 5. Длина выступа, входящего внутрь резонатора, изменяет, таким образом, резонансную частоту.

2.4.2. Генератор сигналов высокочастотной Г4-81

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот..... 4–5,6 ГГц

Нестабильность частоты за 15 мин после самопрогрева в течение 0,5 часа..... $(\pm 2,5 \cdot 10^{-4})$

Лабораторная работа № 2

Регулируемый уровень мощности в пределах.....	10^{-3} – 10^{-15} Вт
Нестабильность опорного значения мощности после самопрогрева	($\pm 0,8$ дБ)
Содержание второй и третьей гармоник по отношению к уровню сигнала несущей частоты.....	минус 30 дБ
КСВН выхода	2,0
Сечение коаксиального тракта	10/4,34 мм
Время самопрогрева.....	30 мин

Описание устройства

Генератор сигналов высокочастотный Г4-81 предназначен для регулировки и проверки радиоэлектронной аппаратуры. Он выполняет функцию источника СВЧ сигнала, калиброванного по частоте, уровню выходной мощности и по параметрам импульсной модуляции. Генератор можно использовать для проверки чувствительности приёмных устройств, измерения параметров четырёхполюсников, измерения динамического диапазона селективности приёмных и анализирующих устройств, проверки полос пропускания трактов и приборов, проверки и отработки аттенуаторов, фильтров и других элементов тракта.

Основные блоки прибора: генератор СВЧ (блок ВЧ), модулятор, индикатор мощности и блок питания.

2.4.3. Линия измерительная Р1-18

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот.....	2,0–12,5 ГГц
Собственный КСВН.....	1,07–1,10
Непостоянство связи зонда с полем линии.....	3 %
Относительная шунтирующая проводимость зонда	0,06
Погрешность индикации положения зонда	0,025 мм
Волновое сопротивление.....	50 Ом

Пределы перемещения зонда вдоль измерительной линии.....	122 мм
Затухание линии не более.....	0,5 дБ
Сечение коаксиального тракта.....	7/3 мм

Описание прибора

Измерительная линия Р1-18 предназначена для измерения параметров стоячих волн в коаксиальных трактах.

Измерительная линия представляет собой отрезок коаксиальной линии, волновое сопротивление которой должно быть, по возможности, близко к номинальному значению 50 Ом. С величиной волнового сопротивления линии сравнивается импеданс (полное сопротивление) измерительных нагрузок. В измерительной линии распространяются падающие и отражённые волны. Отражённая волна возникает в случае неравенства импеданса нагрузки волновому сопротивлению линии. В местах, где фазы падающей и отражённой волн совпадают, образуется пучность или максимум стоячей волны; в местах, где фазы противоположны, образуется узел или минимум стоячей волны. Отношения напряжений в максимуме и минимуме есть КСВН нагрузки на данной частоте. Картина стоячей волны анализируется с помощью зонда. Зонд соединён с резонаторной головкой, выпрямленное детектором напряжение подаётся на индикаторный прибор.

2.4.4. Измеритель отношений напряжений В8-7

Основные физические и технические параметры:

Диапазон измеряемых отношений напряжений.....	1–31 600
Рабочий диапазон входных напряжений.....	0,2–10 000 мкВ
Частота сигналов.....	0,13–20 кГц
Режим работы (по роду усиления).....	узкая полоса; широкая полоса
Режим работы (по роду синхронизации).....	внешняя; внутренняя
Время самопрогрева.....	15 мин

Описание прибора

Измеритель отношения напряжений В8-7 предназначен для измерения отношения напряжений переменного тока, последовательно поступающих на его вход при работе с измерительными линиями: поляризационными измерителями полных сопротивлений и при работах по измерению диаграмм направленности антенн.

Измерения отношения напряжений двух последовательно поступающих на вход прибора сигналов обеспечивается по соответствующим им двум показаниям четырёхразрядного цифрового индикатора с ценой единицы младшего разряда 0,001.

2.4.5. Коаксиальный ферритовый вентель Э8-16

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот.....	4–7 МГц
Потери в прямом направлении не более.....	2,0 дБ
Потери в обратном направлении не менее.....	15 дБ
КСВН входа и выхода не более.....	1,3
Сечение коаксиального тракта.....	10/4,34 мм
Волновое сопротивление.....	50 Ом
Рассеиваемая мощность.....	3 Вт

Описание устройства

По принципу действия прибор является резонансным вентилем. Работа резонансного вентиля основана на взаимодействии циркулярно-поляризованной волны с электронами среды, прецессирующими вокруг направления постоянного намагничивающего поля. При резонансном значении внешнего магнитного поля волна, поляризация которой совпадает с направлением прецессии электронов, испытывает резонансное поглощение, волна противоположной поляризации существенно не ослабляется. Так как в обычной коаксиальной линии не существует циркулярно-поляризованного вектора магнитного поля СВЧ волны, то его создают искусственно, частично заполняя коаксиал диэлектриком с большой диэлектрической постоянной (рисунки 2.6).

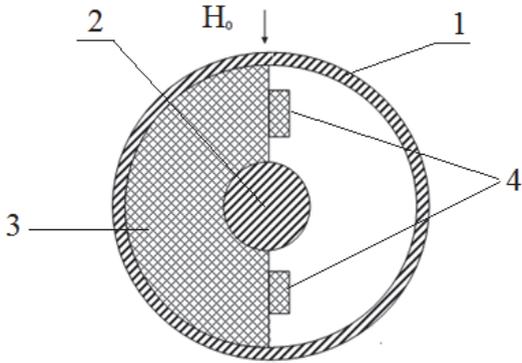


Рис. 2.6. Структура поперечного сечения коаксиального резонансного вентиля

- 1 – внешний проводник; 2 – центральный проводник коаксиальной линии;
 3 – диэлектрическое заполнение из материала ДПС-2 с $\epsilon = 20$;
 4 – ферритовые образцы из сплава АМКО4

При этом для одного направления распространения волны вектор магнитного поля будет положительно поляризован, а для другого – отрицательным. Следовательно при распространении в одном направлении волна будет затухать незначительно, а в другом направлении почти полностью поглотится ферритовыми пластинами. Для получения широкой полосы по обратным потерям применён метод неоднородного магнитного поля. Нужная неоднородность поля достигается шунтированием зазора равномерно намагниченного магнита стальными шунтами. Широкополосное согласование прибора с трактом достигнуто применением диэлектрических ступенчатых (Чебышевских) переходов.

2.5. Указание мер безопасности

ВНИМАНИЕ!

Перед тем, как приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо ознакомиться с правилами, изложенными в «Инструкции по технике безопасности для студентов в учебной лаборатории». Изучить раздел «Указание мер безопасности» в «Техническом описании и ин-

струкции по эксплуатации» (ТО и ИЭ) для каждого прибора, входящего в установку. Руководствоваться этими документами при выполнении работы.

2.6. Порядок выполнения работы

1. Определить положение опорной плоскости (узла при расстройке) при расстроенном резонаторе. Во избежание ошибок эту операцию проделать несколько раз, используя методом «вилки».

2. Настроив резонатор в резонансе, измерить при помощи измерительной линии КСВН при резонансе, определить характер связи и величину коэффициента связи k_c .

3. Для нескольких значений частоты по обе стороны от резонанса в пределах полосы пропускания определить КСВН и смещение минимума напряжения в линии относительно опорной плоскости (чтобы избежать влияния люфта, перестройку резонатора по частоте проводить в одном направлении).

4. Измерить зависимость КСВН от частоты.

2.7. Требования к оформлению результатов

1. Построить зависимость КСВН от частоты: $\rho = F(f)$.

2. Определить значения КСВН по частоте, соответствующей точкам половинной мощности $\rho_{0(1/2)}$.

3. Рассчитать Q_0 , Q_n , $Q_{вн}$ по формулам:

$$Q_0 = \frac{1}{\mathcal{F}_2 - \mathcal{F}_1}; \quad Q_n = \frac{1}{\mathcal{F}_4 - \mathcal{F}_3}; \quad Q_{вн} = \frac{Q_0}{1 + \rho_{0(1/2)}}.$$

2.8. Указания к отчёту

Отчёт должен содержать:

а) все пункты задания;

б) графики и расчёты, отражающие результаты работы;

в) выводы по работе и оценку полученных результатов (письменно).

2.9. Контрольные вопросы

1. Дать определение резонатора. На какие группы можно разделить современные типы полых резонаторов?
2. Чем характеризуются резонаторы?
3. Какой резонатор называется объёмным и где он применяется?
4. Для чего вводят эквивалентные параметры при рассмотрении процессов на СВЧ?
5. Нарисуйте схемы включения резонаторов в высокочастотный тракт.
6. Собственная и нагруженная добротности. В чём их различия?
7. Как определить добротность резонатора, включённого как оконечная нагрузка, с помощью измерительной линии?
8. С помощью, каких выражений можно определить значения КСВН на частотах, соответствующих точкам половинной мощности?
9. Назвать три характерные кривые изменения входного полного сопротивления при изменении частоты для трёх различных степеней связи резонатора с линией? Что можно показать с помощью этих кривых?
10. Как определить коэффициент полезного действия резонатора?

Литература

1. *Брызгалo, С. Л.* Цилиндрический резонатор: учеб. метод. пособие / С. Л. Брызгалo, А. М. Лерер, Ю. М. Нойкин, В. Н. Шевченко. – Ростов н/Д, 2008. – 34 с.
2. *Валитов, Р. А.* Радиоизмерения на сверхвысоких частотах / Р. А. Валитов, В. Н. Сретенский. – М.: Воениздат, 1958. – 438 с.
3. *Вальднер, О. А.* Техника сверхвысоких частот: учебная лаборатория / О. А. Вальднер, О. С. Милованов, Н. П. Сабенин. – М.: Атомиздат, 1974. – 232 с.
4. Вентиль коаксиальный Э8-16: техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М., 1983. – 16 с.
5. Генераторы сигналов высокочастотный Г4-81, Г4-83: техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Горький, 1983. – 198 с.

Лабораторная работа № 2

6. *Гинзтон, Э. Л.* Измерения на сантиметровых волнах / Э. Л. Гинзтон; под ред. Г. А. Ремеза. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 620 с.

7. Измеритель КСВН панорамный Р2-61: техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1984. – 43 с.

8. Измеритель отношения напряжений В8-7: техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1977. – 119 с.

9. *Лебедев, И. В.* Техника и приборы сверхвысоких частот: в 2-х т. / И. В. Лебедев. Т. 1. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 512 с.

10. Линия измерительная Р1-18: техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1983. – 58 с.

11. Спецпрактикум по сверхвысоким частотам; под ред. В. С. Михалевского. – Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 1964. – 84 с.

12. *Тишер, Ф.* Техника измерений на сверхвысоких частотах / Ф. Тишер. – М.: Физматгиз, 1963. – 367 с.

Лабораторная работа № 3

КОАКСИАЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР

Цель работы: изучить физический принцип действия, конструкцию, параметры и характеристики коаксиального резонатора, а также методику измерения добротности.

Самостоятельная работа: – изучить пособие;
– занести в рабочую тетрадь: название и цель лабораторной работы, основные положения, формулы и рисунки, необходимые при ответе на контрольные вопросы.

3.1. Метод рефлектометра

Метод рефлектометра основан на определении падающих и отражённых волн в стандартной линии передачи, которая подключена к испытываемому устройству, и вычислении коэффициента отражения в соответствии с определением:

$$\Gamma = E_{\text{отр}}/E_{\text{пад}}. \quad (3.1)$$

Первые средства измерений, работающие по этому методу, получили название *рефлектометров*. Основным элементом рефлектометра является устройство для выделения падающих и отражённых волн в линии – направленный ответвитель.

Направленный ответвитель – устройство, служащее для ответвления из основного высокочастотного тракта части мощности одной из двух бегущих волн, распространяющихся по линии передачи в противоположных направлениях: падающей или отражённой волны.

Направленный ответвитель состоит из двух отрезков линий передач, связанных между собой.

Рассмотрим принцип действия направленного ответвителя, входящего в состав рефлектометра, на примере волноводного устройства с двумя элементами связи (рис. 3.1).

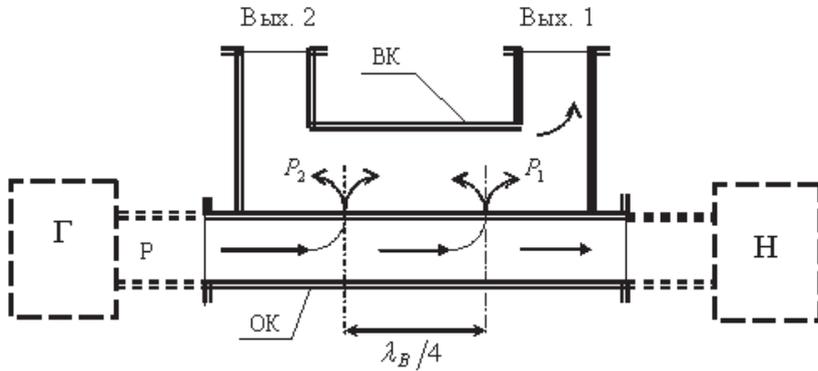


Рис. 3.1. Принцип работы волноводного направленного ответвителя:
Г – генератор, Н – нагрузка, ВК – вторичный канал

Волновод, через который проходит сигнал от генератора Г к нагрузке Н, называют основным каналом направленного ответвителя (ОК). Волновод, связанный с основным, называют вторичным каналом (ВК). Волноводы расположены параллельно друг другу и имеют общую широкую стенку. В общей стенке выполнены два отверстия (либо поперечные щели), находящиеся на расстоянии четверти длины волны в волноводе одно от другого. Волна P , бегущая в основном канале от генератора к нагрузке, возбуждает во вторичном канале волны, распространяющиеся в обе стороны от каждого из отверстий. Рассмотрим, что происходит при сложении этих волн. Волны, бегущие от отверстий в том же направлении, что и в ОК, имеют одинаковые фазы, и складываясь, дают волну с мощностью P_1 , бегущую к выходу 1 (Вых. 1). Волны, бегущие от отверстий в противоположном направлении, имеют разность хода $\lambda_{\text{в}}/2$ ($\lambda_{\text{в}}$ – длина волны в волноводе), т. е. оказываются в противофазе. Если амплитуды волн от каждой из отверстий равны, то они компенсируют одна другую. Следовательно, если в ОК существует волна только одного направления, то в этом случае мощность волны P_2 , бегущей к выходу 2 (Вых. 2), будет равна нулю. Точно также волна, бегущая в основном канале от нагрузки Н к генератору Г (отражённая волна), образует во вторичном канале волну, бегущую лишь к выходу 2 (Вых. 2).

Таким образом, подключая к выходам 1 и 2 неотражающие (согласованные) индикаторы мощности, то на выходе 1 будем иметь информацию о мощности волны, падающей к нагрузке, а на выходе 2 – отражённой от нагрузки.

Для получения одновременной информации о падающей и отражённой волнах необходимо два ответвителя. Их соединение показано на рисунке 3.2.

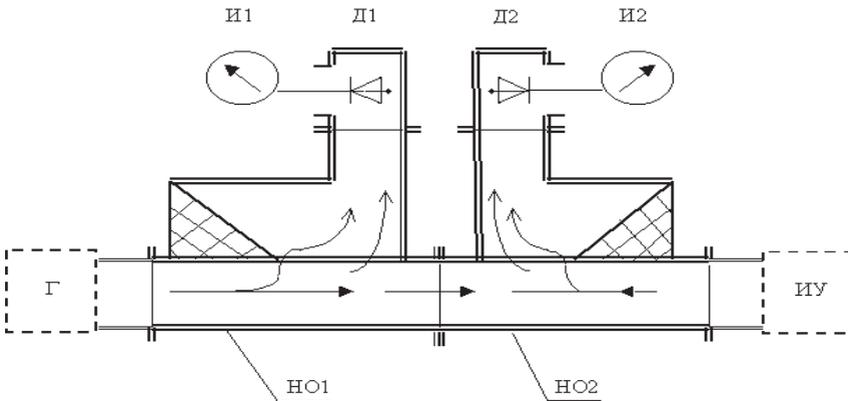


Рис. 3.2. Принцип работы рефлектометра:

Г – генератор, ИУ – испытуемый узел, Д1, 2 – амплитудный детектор, И 1,2 – индикатор, НО1,2 – основные каналы ответвителей

Сигнал от генератора Г проходит через основные каналы ответвителей НО1 и НО2 и попадает на вход испытуемого узла ИУ. Выход вторичного канала ответвителя НО1 нагружен на детекторную секцию Д1 (амплитудный детектор) с индикатором И1, который даёт показания, пропорциональные падающей мощности P . Выход вторичного канала ответвителя НО2 нагружен на детекторную секцию Д2 (амплитудный детектор) с индикатором И2. Его показания пропорциональны мощности, отражённой от испытуемого узла.

Если коэффициенты передачи детекторных секций равны, а переходные ослабления ответвителей одинаковы, то отношение показаний индикаторов И2 и И1 даёт значение квадрата модуля коэффициента отражения:

$$\Gamma^2 = \frac{i_2}{i_1}, \quad (3.2)$$

где i_1 и i_2 – отсчёты по шкалам индикаторов И1 и И2 соответственно.

Устройство, изображенное на рисунке 3.2, является основным узлом панорамных измерителей КСВН и измерителей комплексных коэффициентов передачи.

Основными источниками погрешностей данного метода являются:

- отклонение ВАХ диодов от квадратичной;
- различие характеристик ответвителей, детекторных секций и индикаторов;
- распределённые потери в основных каналах ответвителей.

3.2. Описание лабораторной установки

На рисунке 3.3 представлена структурная схема установки, позволяющей экспериментально изучить физический принцип действия коаксиального резонатора, а также его характеристики.

3.3. Краткое описание приборов, устройств и компонентов лабораторной установки

3.3.1. Коаксиальный проходной перестраиваемый резонатор

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот.....	500–3200 МГц
Нагруженная добротность.....	5000
Точность установки резонансной частоты.....	0,05–0,1 %
КСВН входа и выхода.....	1,3
Сечение коаксиального тракта.....	16/7 мм
Волновое сопротивление.....	50 Ом

Описание устройства

Схематическое устройство коаксиального перестраиваемого резонатора типа коаксиальной линии, нагруженной на ёмкость, представлено на рисунке 3.4.

Устройство образовано наружным проводником 1 и внутренним проводником 2 коаксиальной линии, закороченной пластиной 3. Величина области сосредоточенной ёмкости 4 регулируется передвижным внутренним проводником 2. Колебания от источника поступают на входную петлю связи 5, которая возбуждает колебания в резонаторе. Выходной сигнал снимается петлёй связи 6. Обе петли связи расположены на боковой поверхности резонатора.

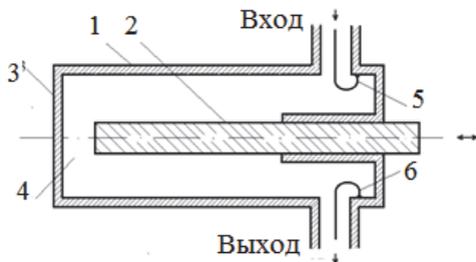


Рис. 3.4. Схематическое устройство коаксиального четвертьволнового проходного перестраиваемого резонатора типа коаксиальной линии, нагруженной на ёмкость: 1 – наружный проводник, 2 – передвижной внутренний проводник, 3 – короткозамыкающая пластина, 4 – область сосредоточенной ёмкости, 5 – входная петля связи, 6 – выходная петля связи.

3.3.2. Панорамный измеритель КСВН и ослаблений Р2-53/2

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот.....	2–4 ГГц
Пределы измерения КСВН.....	1,07–5
Пределы измерения ослаблений.....	минус 30–0 дБ
Пределы допустимой погрешности измерения	
– КСВН.....	не более 5 %
– ослаблений.....	не более 5 %

Полоса качания частоты измерителя:	полный диапазон
– максимальная.....	частот
– минимальная.....	не более 120 МГц
Амплитуда частотных меток.....	0–5 мм
Сечение коаксиального тракта.....	16/7 мм
Волновое сопротивление	50 Ом
Время самопрогрева.....	15 мин

Описание прибора

Панорамный измеритель КСВН и ослаблений – это прибор широкого применения. Измеряет КСВН и ослабления четырёхполюсников в коаксиальных трактах с воспроизведением частотных характеристик на экране ЭЛТ. В состав прибора входят: генератор качающей частоты (ГКЧ), индикатор КСВН и ослабления, комплект измерительных СВЧ узлов.

Работа прибора основана на принципе рефлектометра – раздельное выделение сигналов, пропорциональных мощности волн: падающих от генератора, отражённых от нагрузки или прошедших через измеряемый четырёхполюсник.

В качестве генератора СВЧ сигнала используется электрический перестраиваемый твердотельный ГКЧ, который состоит из блока управления и сменных СВЧ блоков. Индикатор осуществляет преобразование сигналов, содержащих информацию о параметрах измеряемых объектов, с целью обеспечения возможности наблюдения частотных характеристик объектов на экране ЭЛТ, а так же для непосредственного отсчёта КСВН и ослабления по шкалам. Измерение КСВН или ослабления может производиться в автоматическом или ручном режимах перестройки частоты.

3.3.3. Амплитудный детектор

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот.....	2–4 ГГц
Чувствительность.....	500 мкА/мВт

Лабораторная работа № 3

Сечение коаксиального тракта.....	16/7 мм
Волновое сопротивление.....	50 Ом
КСВН.....	1,5
Тип диода.....	Д 403 В

Описание устройства

На рисунке 3.5 представлен коаксиальный вариант амплитудного детектора. Диод ввинчивается в держатель 2, заканчивающийся НЧ разъемом 3.

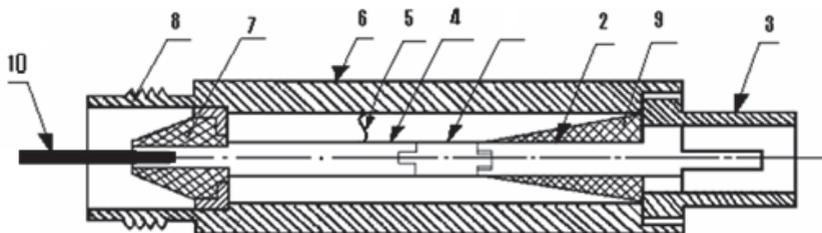


Рис. 3.5. Продольное сечение коаксиального амплитудного детектора

Другим фланцем диод входит в цангу центрального проводника 4 коаксиала, который закорочен провололочкой 5 на корпус секции 6. Таким образом, замыкается цепь диода по постоянному току, для СВЧ же сигнала провололочка 5 представляет собой большое индуктивное сопротивление. Диэлектрическая шайба 7 СВЧ разъёма 8 центрирует проводник 4. Поглощающая диэлектрическая вставка 9 препятствует просачиванию СВЧ мощности на НЧ выход 3. Таким образом, диод является нагрузкой СВЧ тракта и поглощает СВЧ мощность, поступающую со штыря связи 10, преобразуя её в постоянный ток.

3.3.4. Коаксиальная поглощающая согласованная нагрузка

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот.....	2–5 ГГц
КСВН не более.....	1,05

Волновое сопротивление ВЧ-тракта	50 Ом
Сечение коаксиального тракта.....	16/7 мм

Описание устройства

Коаксиальная поглощающая согласованная нагрузка (рис. 3.6) состоит из короткозамкнутого отрезка коаксиальной линии, внутри которого установлен объёмный поглощающий резистор из полижелеза в форме скошенного конуса с отверстием на оси, равным диаметру внутреннего проводника линии. Резистор располагается вершиной конуса в сторону ВЧ-соединения, что обеспечивает наилучшее согласование.

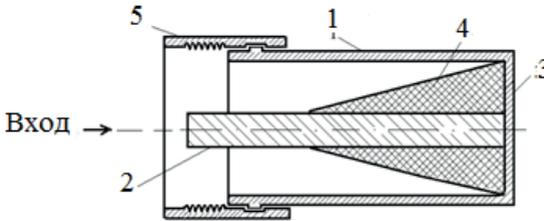


Рис. 3.6. Продольное сечение коаксиальной поглощающей согласованной нагрузки^ 1 – наружный проводник; 2 – внутренний проводник; 3 – задняя стенка; 4 – поглотитель

3.4. Указание мер безопасности

ВНИМАНИЕ!

Перед тем, как приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо ознакомиться с правилами, изложенными в «Инструкции по технике безопасности для студентов в учебной лаборатории». Изучить раздел «Указание мер безопасности» в «Техническом описании и инструкции по эксплуатации» (ТО и ИЭ) для каждого прибора, входящего в установку. Руководствоваться этими документами при выполнении работы.

3.5. Подготовка к измерениям

На изучаемом коаксиальном резонаторе повернуть влево до упора ручку ЧАСТОТА МГц.

Лабораторная работа № 3

Ознакомиться с инструкциями к каждому прибору («ТО и ИЭ»).

На блоке генератора ГКЧ:

- 1) повернуть вправо до упора ручки АМПЛИТУДА M_1, M_2 ;
- 2) поставить в нижнее положение тумблер СВЧ;
- 3) в нажатом положении должны находиться кнопки ВНУТР, 008, $F_1 F_2, F_1, AM$;
- 4) ручки $F_1 F_0, F_1 \Delta F$, УРОВЕНЬ поставить против рисок.

На индикаторном блоке:

- 1) поставить в положение 15 переключатель пределы;
- 2) кнопка М должна быть в нажатом положении;
- 3) ручки ПАД, КАЛИБР поставить против рисок;
- 4) установить ручкой ОТСЧЁТ на шкале dВ показание 0.

Включить оба блока, нажав тумблера СЕТЬ. Загорятся индикаторы.

На ЭЛТ экране должны появиться светящиеся линии. На цифровом табло должна высветиться цифра, означающая нижнюю границу частотного диапазона ГКЧ в ГГц.

Нажать кнопку F_2 . На цифровом табло должна загореться цифра, означающая верхнюю границу частотного диапазона ГКЧ в ГГц.

Установить максимальный частотный диапазон ГКЧ.

3.6. Проведение измерений

1. Включить тумблером СВЧ генерацию мощности.
2. Поставить в среднее положение ручку $F_2 \Delta F$.
3. Наблюдать на ЭЛТ экране отклик сигнала в виде АЧХ резонатора.
4. Совместить максимум АЧХ с линией визира с помощью ручки КАЛИБРОВКА.
5. Провести измерение ширины полосы резонатора на уровне 3 дБ, т. е. на уровне половинной мощности. Этапы работы:
 - Ручкой ОТСЧЁТ установить визирную линию на 3 дБ ниже, т. е. по верхней шкале dВ установить показания минус 3.0.
 - Зарисовать АЧХ вместе с визирной линией.
 - Нажать кнопку M_1 и ручкой M_1 установить частотную метку на точку пересечения левого склона АЧХ с визирной линией, считать с цифрового табло значение нижней частоты f_n и записать его.

- Нажать кнопку M_2 и ручкой M_2 установить частотную метку на точку пересечения правого склона АЧХ с визирной линией, считать с цифрового табло значение верхней частоты f_B и записать его.
 - Нанести на рисунок значения частот f_H и f_B .
 - Повторить аналогичные измерения в нескольких точках частотного диапазона ГКЧ.
6. После окончания измерений поставить тумблер СВЧ на блоке ГКЧ в нижнее положение.
7. Выключить тумблерами СЕТЬ все приборы.

3.7. Указания к оформлению результатов

При оформлении результатов необходимо выполнить следующее:

а) Построить амплитудно-частотную характеристику резонатора:

$$L(\text{дБ}) = F(f)(\text{МГц}).$$

б) Рассчитать абсолютную ширину полосы резонансной кривой на уровне 3 дБ:

$$\Delta f = f_B - f_H.$$

в) Построить график зависимости абсолютной ширины полосы от частоты:

$$\Delta f(\text{МГц}) = F(f)(\text{МГц}).$$

г) Определить относительную ширину полосы резонансной кривой на уровне 3дБ:

$$\delta f = (\Delta f / f_0) \cdot 100 \text{ \%}.$$

д) Вычислить добротность резонатора на разных частотах диапазона:

$$Q_0 = f_0 / \Delta f.$$

е) Построить график зависимости

$$Q_0 = F(f)(\text{МГц}).$$

3.8. Указания к отчёту

Отчёт должен содержать:

а) все пункты задания;

- б) графики и расчёты, отражающие результаты работы;
- в) выводы и оценку полученных результатов (письменно).

3.9. Контрольные вопросы

1. Дать определение резонатора. Типы, конструкции, основные характеристики резонаторов.
2. Вынужденные колебания в резонаторе.
3. Дайте определение добротности и перечислите её виды.
4. Что такое ненагруженная добротность резонатора?
5. Связь ширины полосы пропускания и ненагруженной добротности.
6. Выразите ненагруженную добротность через постоянную времени?
7. Схема, используемая для определения внешней добротности.
8. Что такое внешняя добротность?
9. Определение и физический смысл нагруженной добротности.
10. Изобразите эквивалентную схему для определения нагруженной добротности.
11. Покажите соотношения между добротностями.
12. Полуволновый коаксиальный резонатор. Структура поля.
13. Четвертьволновый коаксиальный резонатор. Метода расчёта.
14. Изобразить для определения резонансных частот графическое решение.
15. Перечислите способы перестройки резонатора.
16. Применение коаксиальных резонаторов.
17. Изобразите структурную схему резонатора.

Литература

1. *Бондаренко, И. К.* Автоматизация измерений параметров СВЧ трактов / В И. Бондаренко, Г. А. Денега, З. В. Маграчёв. – М.: Сов. радио, 1969. – 304 с.
2. *Валитов, Р. А.* Радиоизмерения на сверхвысоких частотах / Р. А. Валитов, В. Н. Сретенский. – М.: Воениздат, 1958. – 438 с.
3. *Вальднер, О. А.* Техника сверхвысоких частот: учебная лаборатор-

рия / О. А. Вальднер, О. С. Милованов, Н. П. Сабенин. – М.: Атомиздат, 1974. – 232 с.

4. *Гинзтон, Э. Л.* Измерения на сантиметровых волнах / Э. Л. Гинстон; под ред. Г. А. Ремеза. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 620 с.

5. *Лебедев, И. В.* Техника и приборы сверхвысоких частот: в 2-х т. / И. В. Лебедев. Т. 1. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 512 с.

6. *Мардин, В. В.* Справочник по электронно-измерительным приборам / В. В. Мардин, А. И. Кривоносов. – М.: Связь, 1978. – 416 с.

7. *Миклашевская, А. В.* Автоматические измерители в диапазоне СВЧ / А. В. Миклашевская. – М.: Связь, 1972. – 80 с.

8. *Нойкин, Ю. М.* Детекторный СВЧ диод: метод. указания к спец. лаб. практикуму «Твердотельная электроника СВЧ». Ч. II. / Ю. М. Нойкин, Т. К. Нойкина, А. М. Лерер. – Ростов н/Д: УПЛ РГУ, 1995. – 34 с.

9. *Нойкин, Ю. М.* Коаксиальный резонатор: учеб.-метод. пособие к спец. лаб. практикуму «Измерения на СВЧ». Ч. V. / Ю. М. Нойкин. – Ростов н/Д, 2008. – 39 с.

10. Панарамный измеритель КСВН и ослаблений P2-53/2: техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М.: Внешторгиздат, 1972. – 34 с.

11. Спецпрактикум по сверхвысоким частотам; под ред. В. С. Михалевского. – Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 1964. – 84 с.

12. *Тишер, Ф.* Техника измерений на сверхвысоких частотах / Ф. Тишер. – М.: Физматгиз, 1963. – 367 с.

Лабораторная работа № 4

ТОРОИДАЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР

- Цель работы:* изучить тороидальный резонатор, его резонансные свойства, параметры и характеристики, а также методику измерения добротности.
- Самостоятельная работа:*
- изучить пособие;
 - занести в рабочую тетрадь: название и цель лабораторной работы, основные положения, формулы и рисунки, необходимые при ответе на контрольные вопросы.

4.1. Метод измерения добротности резонатора по декременту затухания

Резонатор возбуждается сигналом от генератора, работающего в импульсном режиме, через входное устройство связи и с выходного устройства связи сигнал через амплитудный детектор подаётся на вход осциллографа, работающего в режиме ждущей развёртки. При квадратичном детекторе отклонение луча осциллографа по вертикали пропорционально энергии в резонаторе. На экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) осциллографа возникает отклик импульса (рис. 4.1), крутизна фронта которого определяется временем затухания в резонаторе.

Поскольку развёртка осциллографа калибрована во времени τ_p , за которое энергия в резонаторе уменьшится в e раз, зная резонансную частоту f_0 , можно рассчитать добротность. Очевидно, что поскольку изучаются нагруженные устройства связи с генератором и системой индикации резонатора, рассчитанное значение будет соответствовать нагруженной добротности.

Важным достоинством этого метода, особенно существенным при определении добротности резонаторов с высокой добротностью, является то, что время измерений мало (измерения проводятся сравнительно быстро), и уход частоты генератора от резонансной частоты резонатора не сказывается на результатах измерений.

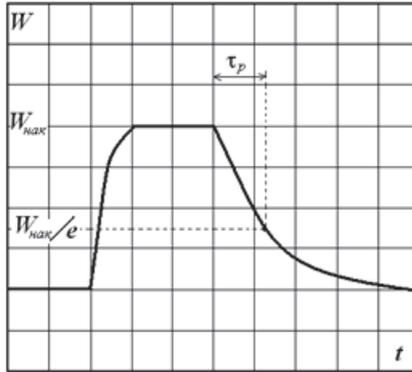


Рис. 4.1. Отклик электрического импульса на экране ЭЛТ осциллографа, показывающий зависимость энергии электромагнитных колебаний в резонаторе от времени

4.2. Описание лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки для определения добротности методом измерения декремента затухания представлена на рисунке 4.2

4.3. Краткое описание приборов, устройств и компонентов лабораторной установки

4.3.1. Эхо-резонатор ТЭБ-50

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот.....	600 ± 30 МГц
Погрешность измерения частоты.....	±15 МГц
Добротность.....	7000
Дальность звучания при мощности передатчика 100 кВт в импульсе.....	не менее 5 км

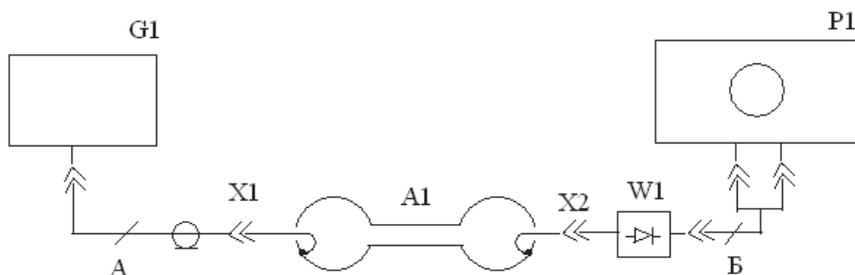


Рис. 4.2. Структурная схема лабораторной установки:

- A1 – изучаемый тороидальный резонатор ТЭБ-50;
- G1 – генератор сигналов высокочастотный Г4-31;
- P1 – осциллограф С1-20;
- W1 – амплитудный детектор;
- A – кабель высокочастотный из комплекта Г4-31;
- Б – провод экранированный;
- X1, X2 – входное и выходное устройство связи резонатора

Индикаторное устройство.....	микроамперметр с полупроводниковым детектором
Сечение коаксиального тракта.....	16/4,6 мм
Волновое сопротивление.....	75 Ом

Описание устройства

Эхо-резонатор ТЭБ-50 представляет собой тороидальный объёмный резонатор с малыми потерями. Он состоит из объёмного резонатора с органами настройки, элемента связи с проверяемой станцией и индикаторной цепи (рис. 4.3).

Объёмный резонатор 1 представляет собой тороид из красной меди с внутренней щелью, закрытой двумя дисками 2 и 3. Для уменьшения потерь внутренняя поверхность резонатора покрыта слоем серебра. Настройка резонатора по частоте производится регулировкой его ёмкости, осуществляемой изменением расстояния между дисками 2 и 3 с помо-

Тороидальный резонатор

шью винта 4, вращаемого ручкой настройки 5. Лимб ручки настройки 5 разделён на 100 делений. Отсчёт производится с помощью указателя 6, установленного на верхней поверхности кожуха.

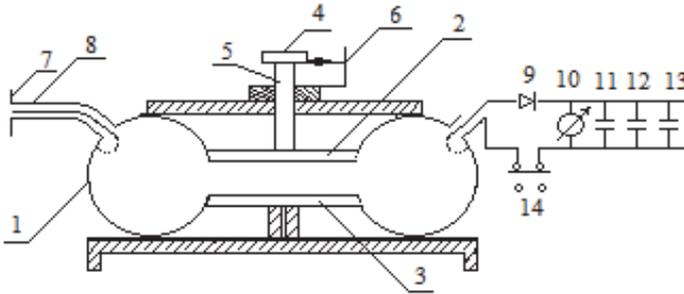


Рис. 4.3. Упрощённая схема эхо-резонатора ТЭБ-50

Для связи эхо-резонатора с проверяемой станцией служит полуволновая дипольная антенна 7 и коаксиальный кабель 8 длиной 10 метров. Антенна и индикаторная цепь подключаются к резонатору с помощью соединителей, установленных на верхней половине тороида с противоположных сторон.

Индикаторная цепь состоит из вилки с петлёй связи амплитудного детектора 9, микроамперметра М49 на 50 мкА (10), блокировочных конденсаторов общей ёмкостью 6 мкФ (11, 12 и 13) и выключателя 14.

После настройки эхо-резонатора на частоту передатчика индикаторная цепь с помощью выключателя 14 разрывается, вследствие чего уменьшаются потери в резонаторе и, следовательно, увеличивается дальность звучания.

В качестве индикатора может использоваться электронный осциллограф.

4.3.2. Генератор сигналов высокочастотной Г4-31

Основные физические и технические параметры:

Диапазон частот..... 150–1000 МГц
Погрешность установки частоты... $\pm 1,5\%$

Лабораторная работа № 4

Уход частоты после прогрева.....	не более 0,05 %
Выходная мощность.....	0,1 мВт–1 Вт
Выходное напряжение.....	1 мкВ–0,1 В
Сечение коаксиального тракта.....	16/4,6 мм
Волновое сопротивление выхода....	75 Ом
Виды работы:.....	непрерывная генерация; внешняя амплитудная модуляция; внутренняя амплитудная модуляция
Время самопрогрева.....	30 мин

Описание устройства

Генератор сигналов высокочастотный Г4-31 предназначен для испытания приёмников, а также для питания высокочастотным напряжением измерительных линий, антенн и других радиотехнических устройств.

Прибор рассчитан для применения в условиях лабораторий, радио-мастерских и цехов заводов.

Основными элементами прибора являются: генератор высокой частоты, аттенуатор установки выходного напряжения, аттенуатор установки выходной мощности, переключатель выхода (ватты-микроватты), пиковый вольтметр, модулятор, импульсный блок, внутренний синхронизатор и блок питания.

4.3.3. Генератор сигналов высокочастотной Г5-15

Основные физические и технические параметры:

Форма импульсов.....	прямоугольный
Длительность импульса.....	0,1–10 мкс
Погрешность установки импульса.....	0,3 мкс
Фронт и спад.....	0,075 мкс и 0,15 мкс
Амплитуда.....	10–100 В
Нагрузка.....	1000 Ом; 50 пФ

Тороидальный резонатор

Частота следования.....	0,04–10 кГц
Временной сдвиг.....	0–1000 мкс (от синхроимпульса)
Время самопрогрева.....	30 мин

Описание устройства

Генератор импульсных сигналов Г5-15 применяется для настройки и испытания различной радиоизмерительной и радиоэлектронной аппаратуры. Широко используется в цифровых и счётных схемах, при измерении разрешающей способности счётчиков, пересчётных устройств, схем совпадения, для импульсной кодовой модуляции

4.3.4. Осциллограф импульсный С1-20

Основные физические и технические параметры:

Частота синусоидальных сигналов:	
– при узкой полосе.....	10 Гц–20 МГц
– при широкой полосе.....	15 Гц–2 МГц
Длительность импульсных сигналов.....	0,05 мкс–5 мс
Диапазон частот следования импульса.....	200 Гц–500 кГц
Напряжение:	
– при широкой полосе.....	0,1 В–500 В
– при узкой полосе.....	0,01 В–50 В
Чувствительность:	
– при широкой полосе.....	0,1 мм/В
– при узкой полосе.....	1 мм/В
Погрешность измерения.....	5 %
Время самопрогрева.....	15 мин

Описание прибора

Одноручевой импульсный осциллограф общего применения С1-20 предназначен для исследования импульсных и периодических напряжений в лабораторных, производственных, полевых и высотных (до 5 км) условиях.

Прибор обеспечивает исследование непрерывных и импульсных электрических колебаний.

4.4. Указание мер безопасности

ВНИМАНИЕ!

Перед тем, как приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо ознакомиться с правилами, изложенными в «Инструкции по технике безопасности для студентов в учебной лаборатории». Изучить раздел «Указание мер безопасности» в «Техническом описании и инструкции по эксплуатации» (ТО и ИЭ) для каждого прибора, входящего в установку. Руководствоваться этими документами при выполнении работы.

4.5. Подготовка к измерениям

1. Ознакомится с каждым прибором по «ТО и ИЭ».
2. Проверить соответствие рабочего места схеме рисунка.
3. Включить приборы тумблером СЕТЬ и подготовить их к работе в соответствии с «ТО и ИЭ».

4.6. Порядок выполнения работы

1. Установить на генераторе переключатель РОД РАБОТЫ в положение ВНУТР.

2. Установить на генераторе переключатель .
3. Изменяя частоту генератора (вблизи 600 МГц) и длительность развёртки осциллографа, добиться на экране ЭЛТ устойчивого отклика, отображающего процесс импульсного возбуждения колебаний и последующего их затухания в резонаторе.
4. Измерить время, за которое энергия, запасённая в резонаторе, уменьшится в e раз, и частоту (по шкале генератора), соответствующую резонансу.
5. Отобразить в тетради визуально наблюдаемый на экране ЭЛТ отклик сигнала.
6. По окончании работы выключить приборы тумблером СЕТЬ.

4.7. Указания к оформлению результатов

1. Показать на рисунке, изображающем отклик сигнала, как производится отсчёт времени τ_p .
2. Рассчитать нагруженную добротность резонатора по формуле:

$$Q_n = 2\pi \frac{\tau_p}{t} = 2\pi f_0 \tau_p = \omega_0 \tau_p.$$

4.8. Указания к оформлению отчёта

Отчёт должен содержать:

- а) все пункты задания;
- б) графики и расчёты, отражающие результаты работы;
- в) выводы и оценку полученных результатов (письменно).

4.9. Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «объёмным резонатором»?
2. Где применяются объёмные резонаторы?
3. Какие основные параметры резонатора?
4. Понятие об открытых и закрытых объёмных резонаторах.
5. Какие режимы колебаний существуют в резонаторах?
6. Какие существуют способы возбуждения резонаторов?
7. Какие предъявляются требования к резонаторам?
8. Нарисуйте эквивалентные схемы резонаторов.
9. Нарисуйте схемы включения резонаторов в высокочастотный тракт.
10. Дайте определение собственной, внешней и нагруженной добротности.
11. Нарисуйте эквивалентную схему для определения внешней добротности.
12. Нарисуйте эквивалентную схему для определения нагруженной добротности.
13. Напишите соотношение между добротностями.
14. Что представляет собой тороидальный резонатор?

15. Изобразите картину силовых линий электрического и магнитного полей в тороидальном резонаторе.
16. Как производится перестройка частотного резонатора?
17. Что такое коэффициент полезного действия резонатора?
18. Что такое эхо-резонаторе.
19. Опишите методику измерений.
20. Принцип действия приборов, входящих в установку.

Литература

1. *Валитов, Р. А.* Радиотехнические измерения / Р. А. Валитов, В. Н. Сретенский. – М.: Советское радио, 1970. – 448 с.
2. *Вальднер, О. А.* Техника сверхвысоких частот: учебная лаборатория / О. А. Вальднер, О. С. Милованов, Н. П. Сабенин. – М.: Атомиздат, 1974. – 232 с.
3. Генератор сигналов высокочастотный Г4-3: техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 32 с.
4. Генератор сигналов высокочастотный Г5-15: техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 27 с.
5. *Гинзтон, Э. Л.* Измерения на сантиметровых волнах / Э. Л. Гинстон; под ред. Г. А. Ремеза. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 620 с.
6. *Лебедев, И. В.* Техника и приборы сверхвысоких частот: в 2-х т. / И. В. Лебедев. Т. 1. – М; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 512 с.
7. *Нойкин, Ю. М.* Тороидальный резонатор: учеб.-метод. пособие / Ю. М. Нойкин, Г. П. Синявский, С. И. Толстолуцкий, Г. Д. Чеботарёв. – Ростов н/Д, 2009. – 35 с.
8. *Осипов, К. Д.* Справочник по радиоэлектронным приборам; под ред. Г. А. Ремеза / К. Д. Осипов, В. В. Пасынков. Ч. IV. – М.: Сов. радио, 1959. – 154 с.
9. Спецпрактикум по сверхвысоким частотам; под ред. В. С. Михалевского. – Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1964. – 84 с.
10. Осциллограф импульсный С1-20: техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Вильнюс, 1970. – 96 с.
11. *Тишер, Ф.* Техника измерений на сверхвысоких частотах / Ф. Тишер. – М.: Физматгиз, 1963. – 367 с.