

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

---

**А. А. Харитонов**

**МИКРОВОЛНОВЫЕ УСТРОЙСТВА  
В СИСТЕМАХ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ**

Учебно-методическое пособие

Санкт-Петербург  
2007

УДК 621.396.2

ББК 32.884.1

X20

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор Северо-Западного заочного государственного технического университета *Г. И. Худяков*;

доктор технических наук, профессор СПб ГУАП *В. С. Калашников*

Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебно-методического пособия

**Харитонов А. А.**

**X20** Микроволновые устройства в системах подвижной радиосвязи: учеб.-метод. пособие / А. А. Харитонов; ГУАП. – СПб., 2007. – 60 с.

Пособие содержит сведения о микроволновых устройствах в полосковом исполнении, широко применяемых в системах подвижной радиосвязи. Рассматриваются физические и теоретические основы их работы, конструктивные особенности и методы контроля параметров. Изложенный материал является основой для выполнения четырех лабораторных работ. Приводится порядок и методика их выполнения, требования к отчету, контрольные вопросы и списки рекомендованной литературы.

Предназначено для студентов, изучающих «Микроволновые устройства в системах подвижной радиосвязи» по специальности 210102 «Средства связи с подвижными объектами». Могут быть использованы для обучения студентов других радиотехнических специальностей, связанных с изучением микроволновой техники.

УДК 621.396.2

ББК 32.884.1

Учебно-методическое пособие

А. А. Харитонов

**МИКРОВОЛНОВЫЕ УСТРОЙСТВА  
В СИСТЕМАХ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ**

Редактор *А. В. Подчепалева*  
Верстальщик *С. В. Барашкова*

---

Сдано в набор 29.01.07. Подписано в печать 02.03.07. Формат 60 × 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,75. Уч.-изд. л. 3,5.

Тираж 100 экз. Заказ №

---

Редакционно-издательский центр ГУАП  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67

© ГУАП, 2007

© А. А. Харитонов, 2007

## ВВЕДЕНИЕ

Важную роль в технике подвижной радиосвязи играет использование радиочастотного спектра в диапазоне от 300 мГц до 300 ГГц. Частоты этого диапазона называют сверхвысокими (СВЧ), им соответствуют дециметровые, сантиметровые и миллиметровые длины волн. Как известно, достоинства диапазона СВЧ заключаются в его широкополосности, а следовательно, в большой информативной емкости, в возможности организации большого количества каналов связи. Связь на СВЧ может осуществляться с помощью направленных антенн, что позволяет снизить уровни мощности передающих устройств, увеличить дальность связи и повысить помехозащищенность приемников. Аппаратура диапазона СВЧ обладает хорошими массогабаритными показателями, что существенно для систем подвижной радиосвязи (СПРС).

В настоящее время на СВЧ работают многие СПРС, например космическая, спутниковая, сотовая связь, навигационные системы морских, воздушных и наземных подвижных объектов и др.

Таким образом, общая подготовка специалистов по средствам связи с подвижными объектами должна включать изучение основ техники СВЧ, свойств и возможностей применения конкретных микроволновых устройств в СПРС.

Учебно-методическое пособие, включающее цикл лабораторных работ по дисциплине «Микроволновые устройства в системах подвижной радиосвязи», предусматривает изучение и исследование некоторых микроволновых устройств, в частности устройств в микрополосковом исполнении, а также знакомство с измерительной аппаратурой и методами измерения параметров микроволновых устройств.

## ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

При подготовке к работе студентам следует:

по конспектам лекций и рекомендованной литературе изучить материал, относящийся к лабораторной работе;

ознакомиться с описанием работы, продумать ответы на контрольные вопросы.

### Порядок работы в лаборатории

Лабораторные работы выполняются бригадами из двух-трех человек. Лабораторная работа № 1 посвящена изучению достаточно сложного микроволнового измерительного прибора (тип Р2-106) и методики работы с ним. Все последующие работы (№ 2, 3, 4) проводятся с применением этого прибора. Каждая лабораторная работа рассчитана на самостоятельную внеаудиторную подготовку и два аудиторных занятия (четыре часа). Первое занятие – практическое выполнение работы, второе – защита отчета и контрольное собеседование. Практическая часть работы для успевающих студентов может быть индивидуально расширена.

Включать приборы и начинать выполнение работы следует только с разрешения преподавателя после проверки подготовленной схемы и ответа на контрольные вопросы. Во время проведения работы должен вестись технический протокол, который может быть общим на бригаду. В начале протокола указывается номер и название лабораторной работы, фамилии исполнителей, номер учебной группы и дата выполнения работы.

В протокол заносятся все результаты работы и данные необходимые при составлении отчета.

Студент допускается к зачету или экзамену по данной дисциплине только при условии успешной индивидуальной защиты отчетов по всем выполненным лабораторным работам, предусмотренным программой.

### Требования безопасности при работе в лаборатории

Перед началом работы в лаборатории каждый студент должен ознакомиться с требованиями безопасности и пройти инструктаж, который проводится преподавателем и подтверждается личной подписью студента в специальном журнале.

Электропитание лабораторных приборов осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц, поэтому существует потенциальная опасность поражения электрическим током и возникновения пожара. Работающим в лаборатории следует обращать внимание на состояние внешней электрической проводки, а также на электрические разъемы, выключатели, контактные соединения. Оголение проводов, плохое качество контактов может привести к перегреву и возгоранию проводки, к непосредственному контакту оператора с токопроводящими элементами, к поражению током. За состоянием проводки ведется постоянный надзор, однако если подобные неисправности все же обнаруживаются, то студент, выполняющий работу, должен немедленно отключить приборы лабораторной установки соответствующими выключателями и сообщить о неисправностях преподавателю. Студентам категорически запрещается самостоятельно проводить ремонтные работы как с электропроводкой, так и с приборами.

Внутри приборов существуют устройства с более высоким питающим напряжением. Например, на аноды индикаторных электронно-лучевых трубок подаются постоянные напряжения более 1000 В. Однако защитная изоляция приборов и заземление их корпусов гарантирует электробезопасность.

В состав лабораторных установок входят приборы и устройства, работающие в дециметровом диапазоне сверхвысоких частот. Известно, что длительное и систематическое воздействие на человека СВЧ-излучений может нанести вред здоровью. Потенциально вредными считаются излучения с потоком мощности более 10 мкВт/см<sup>2</sup>. По этому показателю выполняемые лабораторные работы безопасны. Лабораторные СВЧ-генераторы имеют малую выходную мощность (менее 10 мВт). Линии передачи энергии являются либо полностью экранированными (например, коаксиальные линии), либо хорошо экранированными (например, микрополосковые линии). То же следует сказать об изучаемых микроволновых узлах. Таким образом, воздействие СВЧ-излучений в лаборатории практически устранено и они не являются фактором опасности.

Итак, в целях безопасности работы студентам следует:

- пройти инструктаж по технике безопасности;
- знать существующие факторы опасности;
- знать правила поведения и работы в лаборатории;
- быть внимательными при выполнении работ;
- не загромождать рабочие места посторонними предметами (сумки, одежда, телефоны и т. п.);

не включать самостоятельно контакторы сети питания;  
включать аппаратуру только после ее изучения по методическим указаниям и с разрешения преподавателя;  
не оставлять без наблюдения включенную аппаратуру;  
сообщать преподавателю о неисправностях аппаратуры или электропроводки;  
не устранять неисправности самостоятельно.

# Лабораторная работа № 1

## ИЗМЕРИТЕЛЬ КСВ ПАНОРАМНЫЙ ТИПА P2-106

*Цель работы:* изучение принципа действия панорамного измерителя КСВ типа P2-106, а также овладение методикой работы с этим прибором для проведения последующих исследований характеристик микроволновых устройств.

### 1. Общие сведения о панорамном измерителе КСВ типа P2-106

#### 1.1. Основные технические данные прибора типа P2-106

Прибор предназначен для отображения на экране индикатора и измерения частотных характеристик коэффициента стоячей волны (КСВ) и ослабления пассивных микроволновых устройств коаксиального тракта. Радиочастотные разъемы прибора коаксиального типа с диаметрами проводников 3,5/1,52 мм имеют волновое сопротивление  $Z = 50$  Ом. К прибору через переходы могут присоединяться устройства с другими размерами разъемов (например, 7/3,04 или 16/6,95).

Рабочий диапазон частот широк и равен 0,01...2,14 ГГц (10...2140 МГц), что соответствует длинам электромагнитных волн от 30 м до 14 см. Как известно, радиочастоты, превышающие 300 МГц ( $\lambda = 1$  м), используются в технике сверхвысоких частот. Таким образом, прибор типа P2-106 позволяет проводить измерения не только на «низких частотах», но и на СВЧ в диапазоне дециметровых волн.

Основным режимом работы прибора является режим автоматической периодической перестройки (качания) частоты по линейному («пилообразному») закону с периодом качания 0,08 с. Возможна также работа с периодом качания 1 с, 10 с и ручная перестройка частоты генератора (ГКЧ).

Максимальная полоса качания соответствует полосе рабочих частот прибора. Пределы полосы качания могут плавно регулироваться, при этом минимальная полоса качания не должна превышать 0,5% от верхней частоты установленной полосы.

Диапазон измерения КСВ составляет 1,05...5. Погрешность измерения КСВ составляет  $(\pm 5K_{\text{св}})\%$  при  $K_{\text{св}} \leq 2,0$  (где  $K_{\text{св}}$  – измеренное значение КСВ).

Диапазон измерения ослабления 0...40 дБ. Погрешность измерения ослабления  $\pm(0,04A + 0,3)$  дБ при КСВ входов исследуемого четырехполюсника не более 1,2 (где  $A$  – измеренное значение ослабления в децибелах).

## 1.2. Принцип действия

Основным параметром узлов СВЧ является коэффициент отражения  $\Gamma$ , а для «проходных» узлов еще и коэффициент передачи  $K_{\Pi}$ . Оба коэффициента являются комплексными и учитывают не только изменение амплитуд отраженной и прошедшей волны относительно волны падающей, но и фазовые изменения этих волн. На практике часто ограничиваются измерением только числовых значений (модулей) этих коэффициентов ( $|\Gamma|$  и  $|K_{\Pi}|$ ) или связанных с ними величин: коэффициента стоячей волны ( $K_{св}$ ) и ослабления  $A$ .

$$K_{св} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_{отр}}{P_{пад}}}}{1 - \sqrt{\frac{P_{отр}}{P_{пад}}}} = \frac{\sqrt{P_{пад}} + \sqrt{P_{отр}}}{\sqrt{P_{пад}} - \sqrt{P_{отр}}}, \quad (1)$$

$$A = -20 \lg |K_{\Pi}| = -10 \lg \left( \frac{P_{вых}}{P_{пад}} \right), \quad (2)$$

где  $P_{пад}$ ,  $P_{отр}$ ,  $P_{вых}$  – мощности падающего (входного), отраженного и выходного (прошедшего) СВЧ-сигналов.

Метод измерения КСВ и ослабления основан на использовании соотношений (1) и (2). Для выделения сигналов, пропорциональных величинам  $P_{пад}$ ,  $P_{отр}$ ,  $P_{вых}$  в заданной полосе частот, применены СВЧ-детекторы, работающие при малых уровнях подаваемых на них сигналов. В этом случае вольт-амперная детекторная характеристика квадратична и выходной сигнал (выпрямленный ток в нагрузке детектора) пропорционален мощности СВЧ-сигнала на входе детектора.

Квадратичность детекторной характеристики обеспечивается при выходном напряжении детектора не более 2 мВ, что соответствует отсчету по индикатору минус 17 дБ.

Сигнал, пропорциональный  $P_{вых}$  (необходимый для расчета ослабления  $A$ ), снимается с детекторной головки, подключаемой в качестве оконечной нагрузки к выходу исследуемого узла. Сигнал, пропорциональный  $P_{отр}$  (необходимый для расчета КСВ), снимается с детектора направленного моста (датчик КСВ), включаемого между СВЧ-генератором и исследуемым узлом и реагирующего на отраженную мощность.

Направленный мост, кроме указанной функции, выполняет также роль развязки, ослабляющей проходящие сигналы на 6 дБ, что существенно уменьшает погрешность измерения КСВ из-за наличия в измерительном тракте волн, отраженных от входа исследуемого узла и выхода СВЧ-генератора.

На экране индикатора в процессе измерений наблюдается линия, отображающая в выбранной полосе частот напряжение с выхода детектора отраженной волны, либо напряжение с выхода детектора прошедшей – выходной волны. Для обеспечения возможности *количественной оценки* КСВ или ослабления по характеру наблюдаемых линий необходима привязка указанных напряжений к уровню падающей волны. С этой целью перед проведением измерений производится *калибровка прибора*, методика которой приведена ниже. Процессу калибровки сопутствует процесс *нормализации*, который позволяет внести в память прибора и автоматически учесть неидентичность (неодинаковость) определения отношения сигналов во всех точках наблюдаемых частотных характеристик. В частности, нормализация исключает необходимость в подборе детекторов с идентичными частотными характеристиками. При нормализации в режиме калибровки происходит запоминание уровня падающей мощности, которая остается в процессе измерений практически неизменной, благодаря системе автоматического регулирования мощности (АРМ). Запоминание исключает необходимость в постоянной подаче сигнала падающей мощности на вычислительное устройство индикатора (вход «R» – отключен).

Частотная зависимость КСВ или ослабления отражается на экране индикатора. Отсчет измеряемых значений производится на выбранной частоте по цифровым табло индикатора. Величины, характеризующие измеряемые отражения, отсчитываются в единицах КСВ или в децибелах «обратных потерь»; величина измеряемого ослабления в децибелах.

Конструктивно «Измеритель КСВН панорамный» типа P2-106 оформлен в виде двух отдельных блоков: генератора качающейся частоты (ГКЧ) типа Я2Р-74 и унифицированного индикаторного блока Я2Р-70. В комплект прибора входят также выносные СВЧ-узлы, а именно: головка детекторная для измерения ослабления, мост направленный (датчик КСВ), нагрузка согласованная, нагрузки с  $K_{\text{св}} = 1,4$  и  $2,0$ , короткозамыкатель, переход коаксиальный, аттенюаторы с ослаблением 10 и 40 дБ, кабели соединительные.

### **1.3. Генератор качающейся частоты**

Основные параметры генератора Я2Р-74 следующие:

диапазон частот 0,01...2,14 ГГц;

выходная мощность 10 мВт;

погрешность установки частоты  $\pm 3$  МГц при частоте до 0,6 ГГц,  
 $\pm 0,5$  % при частоте выше 0,6 ГГц.

Генератор является широкодиапазонным. Выходные частоты получаются при смешении частот перестраиваемого СВЧ-генератора ( $f_{\text{ген}} = 4,5 \dots 6,64$  ГГц) и частоты СВЧ-гетеродина ( $f_{\text{ген}} = 4,5$  ГГц = const).

Выходной СВЧ-сигнал ( $f = 0,01 \dots 2,14$  ГГц) может импульсно модулироваться сигналом типа «меандр» с частотой  $F = 100$  кГц, которая получается путем деления частоты высокостабильного кварцевого генератора.

Перестройка частоты СВЧ-генератора, а значит, и частоты выходного сигнала  $f$ , осуществляется посредством управляющего тока. Величина тока и его изменения подчиняются управляющему коду, вводимому оператором при установке предельных значений качающейся частоты, которые высвечиваются на табло лицевой панели прибора.

Схема усиления выходного СВЧ-сигнала содержит систему автоматического регулирования мощности, которая, используя сигнал ошибки с датчика АРМ, удерживает мощность выходного СВЧ-сигнала на установленном уровне с достаточной степенью точности во всем диапазоне частот.


В блоке ГКЧ формируется также сигнал, управляющий горизонтальной частотной разверткой ЭЛТ индикатора. Отсчет частоты в любой точке развертки осуществляется с помощью передвижной частотной метки и показаний цифрового табло.

Основные органы оперативной регулировки и настройки ГКЧ выведены на его переднюю панель и снабжены соответствующими надписями и символами (табл. 1).



**Таблица 1. Органы регулировки и надписи на панели ГКЧ**

№ позиции	Маркировка на приборе	Назначение	Исходное положение
1	СЕТЬ	Тумблер для включения и выключения сети питания	«Выкл» – нижнее положение
2	$F_0$ , РПЧ, $\Delta F_{\text{max}}$ , $F_1 - F_2$	Кнопочный переключатель режимов перестройки частоты служит для установки режимов работы ГКЧ	Исходное положение безразлично
3	0,1, ... 9; #, X	Кнопки наборного поля «УСТАНОВКА ЧАСТОТЫ» служат для установки числовых значений начальной и конечной частоты качания в режиме « $F_1 \dots F_2$ » и частоты генерации в режиме « $F_0$ ». Кнопка «#» – ввод и запоминание числового значения установленной частоты. Кнопка «X» – осуществление повторной установки частоты	Исходное положение безразлично

Продолжение табл. 1

№ позиции	Маркировка на приборе	Назначение	Исходное положение
4	СТАРТ СТОП	Перевод ГКЧ в заданный режим перестройки частоты. Остановка работы	Исходное положение безразлично
5	0,08; 1; 10; ПУСК	Кнопки «ПЕРЕСТРОЙКА S» служит для установки периода автоматического качания частоты. Кнопка «ПУСК» – однократная автоматическая перестройка с периодом 10 с	Исходное положение безразлично
6	$F_1, F_0$	Кнопки « $F_1$ » и « $F_2$ » служат для отображения на индикаторе частоты $F_1$ в режиме « $F_1...F_2$ » и частоты $F_0$ в режиме « $F_0$ »	Исходное положение безразлично
7	$F_2$	Кнопка для отображения на индикаторе частоты $F_2$ в режиме « $F_1...F_2$ »	Исходное положение безразлично
8	М, РПЧ, РКЧ $F_1, F_2$	Ручка установки частоты метки в различных режимах работы ГКЧ	Исходное положение безразлично
9	М, РКЧ	Кнопка «М» переводит функции ручки «М» в режим перестройки частоты, а индикатора – в режим отсчета частоты метки. Кнопка «РКЧ» переводит функции ручки «М» в режим ручного качания частоты, а индикатора – в режим отсчета частоты ручного качания	Исходное положение безразлично
10	СВЧ	Кнопка включения СВЧ-мощности	Исходное положение безразлично
11		Выходной разъем для подачи СВЧ-мощности во внешний тракт	
12	УРОВЕНЬ	Ручка и индикатор для установки уровня СВЧ-мощности на выходе ГКЧ и ее индикации	Влево до упора
13	АМ, АРМ	Индикаторы положения тумблеров «АМ» и «АРМ», расположенных на задней панели ГКЧ	Исходное положение безразлично
14	ИНДИКАТОР	Разъем подключения индикатора при работе прибора в составе спец. комплекса	
15	АМ – НГ	Тумблер перевода ГКЧ из режима амплитудной модуляции меандром с частотой 100 кГц в режим непрерывной генерации СВЧ-сигнала	НГ – нижнее положение

Окончание табл. 1

№ позиции	Маркировка на приборе	Назначение	Исходное положение
16	 НД	Выход напряжения НД	
17	 АРМ	Вход для подключения внешнего датчика АРМ	
18	220V, 50Hz, 160 vA	Разъем подключения сетевого кабеля питания	

Кнопки управления на передней панели ГКЧ образуют четыре группы:

- 1)  $F_0$ , РПЧ,  $\Delta F_{\max}$ ,  $F_1 - F_2$ ;
- 2)  $F_2$ ,  $F_1$ ,  $F_0$ , МРКЧ, #, X;
- 3) СТАРТ, СТОП;
- 4) 0,08; 1; 10.

Кнопки каждой группы взаимосвязаны, т. е. при нажатии любой из кнопок остальные кнопки выключаются. При включении кнопок без световой индикации («#» и «X») исчезает световая индикация ранее включаемых кнопок « $F_1$ ,  $F_0$ » или « $F_2$ » соответственно.

#### 1.4. Блок индикаторный

Блок индикаторный типа Я2Р-70 является многофункциональным, унифицированным и используется в составе панорамных измерителей КСВ и ослабления коаксиальных и волноводных устройств различных частотных диапазонов. Блок позволяет наблюдать на экране электронно-лучевой трубки частотные характеристики КСВ и ослабления в выбранной полосе частот, а также производить отсчет измеряемых величин по цифровым табло в режимах автоматической и ручной перестройки частоты ГКЧ.

Информационные импульсные сигналы, поступающие на входы индикатора с выходов СВЧ-детекторов, имеют форму «меандра» с частотой 100 кГц, которая является частотой амплитудной модуляции СВЧ-сигналов.

- Индикаторный блок имеет три основных сигнальных входа:
- вход «А» для сигнала отраженной волны (канал 1);
  - вход «В» для сигнала прошедшей волны (канал 2);
  - вход «R» для опорного сигнала падающей волны.

Максимальное напряжение сигналов, поступающих на сигнальные входы, составляет 100 мВ и может изменяться до минус 50 дБ для входов «А» и «В» и до минус 35 дБ для входа «R».

Выбор режима работы прибора по каналу 1 осуществляется независимыми кнопками А и А/В, а по каналу 2 – зависимыми кнопками В, В/В, R, «-».

Режимы «А», «В», «R» обеспечивают непосредственный анализ сигналов, поступающих на соответствующие входы, т. е. их панорамную индикацию, измерение относительных изменений, а также измерение абсолютных значений сигналов.

Режимы «А/В» и «В/В» обеспечивают анализ отношений сигналов, поступающих на входы «А», «В», «R» в единицах КСВ (от 1 до ∞) и единицах ослабления дБ.

Индикация отношений производится с переключением масштаба: 10; 5; 1; 0,25 дБ на одно большое деление шкалы панорамного индикатора.

В режимах «А» и «А/В» на экране индикатора можно высветить вспомогательную горизонтальную визирную линию, перемещаемую по вертикали для анализа сигналов.

Перед проведением измерений на СВЧ, прибор калибруется по среднему значению отраженного сигнала при коротком замыкании (КЗ) и холостом ходе (ХХ) СВЧ-тракта. Как известно, в этих режимах амплитуда отраженной волны равна амплитуде падающей, т. е.  $|\Gamma| = 1$ , а  $K_{св} = \infty$ . Усредненная частотная характеристика при холостом ходе и коротком замыкании СВЧ-тракта, полученная в процессе нормализации и калибровки прибора, вводится в запоминающее устройство (кнопка «#») и автоматически учитывается в результатах последующих измерений.

СВЧ-детекторы работают на начальном – квадратичном участке детекторной характеристики, поэтому сигналы, поступающие на входы «А», «В» и «R» пропорциональны мощности СВЧ-сигналов на входе детекторов, при этом логарифмическое отношение сравниваемых сигналов  $\alpha_A$ ,  $\alpha_B$  и  $\alpha_R$  рассчитывается из соотношения


$$A = 10 \lg \frac{\alpha_{A(B)}}{\alpha_R}, \text{ дБ.}$$

Квадратичный участок детекторной характеристики ограничен и позволяет пользоваться приведенным соотношением при изменениях ослабления А в пределах 0...25 дБ. Для расширения динамического диапазона измерения логарифмических отношений в приборе предусмотрена коррекция неквадратичности характеристик детекторов





путем искусственной деформации логарифмических характеристик преобразователей сигналов (шлицы у входов «А», «В», «R»). Выделение информации о модуле коэффициента отражения  $|\Gamma| = \sqrt{P_{отр}/P_{пад}}$  и ослаблении  $A = -10\lg\left(\frac{P_{вых}}{P_{пад}}\right)$  производится в вычислительном устройстве индикатора с использованием логарифмических преобразователей, при которых сигналы А, В, R преобразуется к виду  $\lg A$ ,  $\lg B$ ,  $\lg R$ ,  $-\lg R$ . При подаче команд «А/R» и «В/R» осуществляется соответствующее вычитание преобразованных сигналов: « $\lg A - \lg R$ » и « $\lg B - \lg R$ », т. е вычисление  $\lg A/R$  и  $\lg B/R$ . При отсутствии указанных команд сигналы А и В проходят на выход арифметического устройства непосредственно без обработки.

На лицевую панель индикатора выведены органы управления и регулировки, указанные в табл. 2.

**Таблица 2. Органы управления, надписи, символы на панели индикатора**

№ позиции	Маркировка на приборе	Назначение
1		Регулировка яркости
2		Регулировка фокуса
3	ВКЛ. СЕТЬ	Тумблер включения и выключения сети питания
4	► 0 ◄	Установка нуля
5	A	Включение режима измерения сигнала А
6	B	Включение режима измерения сигнала В
7	R	Включение режима измерения сигнала R
8	A/R	Включение режима измерения отношения сигналов А/R
9	B/R	Включение режима измерения отношения сигналов В/R
10	Кнопка без обозначения	Переключение единиц измерения на световом табло dB, SWR (дБ, КСВ)
11	▼1	Включение первой калибровки канала 1
12	▼2	Включение второй калибровки канала 1
13	▼	Включение калибровки канала 2

Окончание табл. 2

№ позиции	Маркировка на приборе	Назначение
14		Команда на запоминание характеристик
15		Режим работы с визирной линией
16		Вывод информации на самописец
17	10; 5; 1; 0,25	Выбор масштаба изображения на панорамном индикаторе
18		Смещение изображения по вертикали грубо и плавно
19	«Под шлиц» без обозначения	Коррекция неквадратичности детекторных головок

### 1.5. Комплект СВЧ-узлов

В состав комплекта входят узлы, включаемые во внешний СВЧ-тракт и обеспечивающие измерение КСВ и ослабления. Комплект состоит из датчика КСВ (направленного моста), головки детекторной, нагрузки согласованной, короткозамыкателя, коаксиальных нагрузок с  $K_{св} = 1,4$  и 2, аттенюаторов с ослаблением 10 и 40 дБ, вспомогательных коаксиальных переходов и соединительных кабелей.

*Датчик КСВ* служит для выделения и подачи на индикатор сигнала, пропорционального коэффициенту отражения исследуемого СВЧ-узла. Датчик КСВ – направленный мост представляет собой шестидецибельный резистивный делитель, образованный тремя СВЧ-резисторами, сопротивление которых равно волновому сопротивлению подсоединяемой СВЧ-линии передачи ( $Z_0 = 50$  Ом). Резисторы соединены в треугольник, к вершинам которого присоединены три коаксиальные линии. Одна линия подключена к генератору СВЧ, вторая нагружена на согласованную нагрузку, а третья – оканчивается ВЧ-разъемом, к которому подключается калибровочное или измеряемое СВЧ-устройство. При наличии отраженного СВЧ-сигнала в мосте между второй и третьей линией возникает напряжение разбаланса, которое снимается с помощью симметрирующей цепи со встроенным детекторным диодом и передается кабелем на выходной НЧ-разъем моста. Величина этого напряжения пропорциональна модулю коэффициента отражения ( $|\Gamma|$ ) исследуемого СВЧ-устройства.

Основными характеристиками направленного моста являются направленность ( $D \cong 37$  дБ) и КСВ СВЧ-входов ( $K_{\text{св}} \cong 1,2$ ). Мосты по принципу своего действия являются устройствами более широкополосными, чем направленные ответвители, выполняемые на отрезках линии передачи. Однако они применяются только в нижней части диапазона СВЧ из-за трудности сохранения величины сопротивления резисторов, образующих мосты, что приводит к рассогласованию устройства и увеличению погрешности измерений.

*Головка детекторная* является датчиком уровня мощности, прошедшей исследуемое устройство. С выхода головки на индикатор подается НЧ-сигнал, пропорциональный коэффициенту ослабления. Качество согласования детекторной головки во всем СВЧ-диапазоне прибора определяет погрешность измерения ослабления. КСВ головки до частоты в 2 ГГц составляет не более 1,2.

*Согласованная нагрузка* выполнена на СВЧ-резисторе, имеет  $K_{\text{св}} < 1,2$  и используется как оконечное устройство СВЧ-тракта, работающего в режиме наименьших отражений (в режиме «бегущих волн»).

*Короткозамыкатель* служит для полного отражения волн, т. е. для создания режима короткого замыкания (режима «стоячих волн»), при калибровке прибора. Короткозамыкатель – широкополосное устройство, имеющее на всех частотах рабочего диапазона  $|\Gamma| = 1$  ( $K_{\text{св}} = \infty$ ).

*Коаксиальные нагрузки* с определенными значениями КСВ (1,4 и 2) являются оконечными устройствами (имеют только «вход»), выполнены на основе тонкопленочных СВЧ-резисторов с использованием специальных конструктивных неоднородностей, создающих отражения, соответствующие указанным КСВ. Нагрузки используются для проведения контрольных измерений КСВ в качестве образцовых мер отражения.

*Коаксиальные аттенюаторы* являются проходными устройствами, также выполнены на основе тонкопленочных резисторов. Они предназначены для ослабления (частичного поглощения) проходящих сигналов. В данном приборе используются при проведении контрольных измерений в качестве мер ослабления ( $A = 10$  и  $40$  дБ).

Соединительные кабели и переходы представляют собой отрезки коаксиальной линии передачи с присоединительными разъемами и служат для передачи сигналов к устройствам измерительной установки. Волновое сопротивление кабелей и переходов  $Z_0 = 50$  Ом. При передаче СВЧ-сигнала кабели работают на поперечной электромагнитной волне (Т-волне). Присоединительные разъемы достаточно миниатюрны и требуют аккуратного обращения в процессе монтажа тракта.

## 2. Порядок проведения работы

### 2.1. Подготовка к измерениям

**ВНИМАНИЕ!** Производить соединение элементов, узлов и включение блоков в сеть разрешается только после внимательного ознакомления с принципом действия прибора, назначением органов регулировки и управления; усвоения требований техники безопасности.

Подготовка к измерениям проводится в следующей последовательности.

1. Соедините блоки прибора и СВЧ-узлы по структурной схеме (рис. 1, 2), соответствующей предстоящим измерениям. Операция соединения требует аккуратности, внимания, в противном случае могут быть повреждены соединительные коаксиальные разъемы кабелей и СВЧ-устройств.

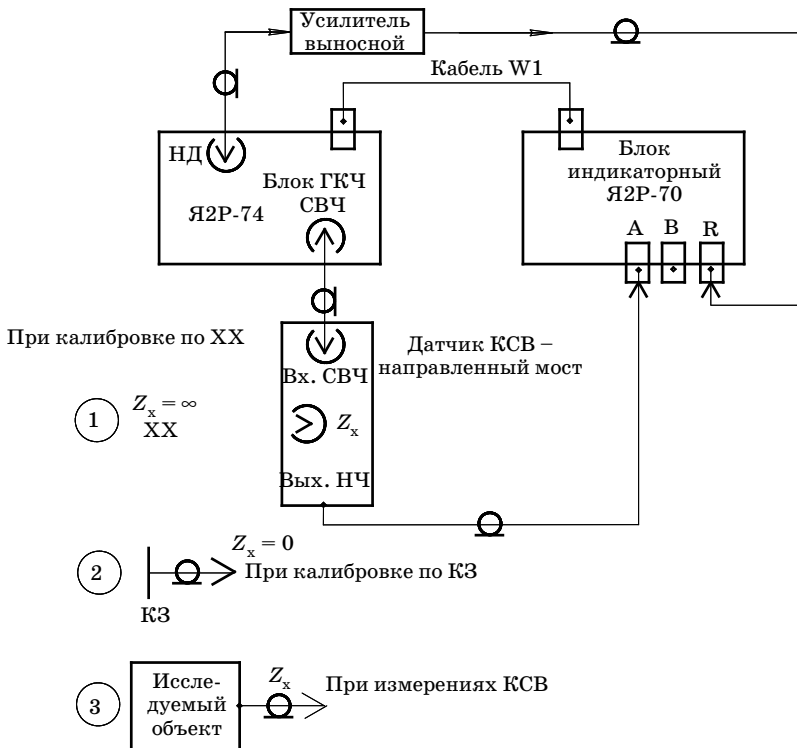
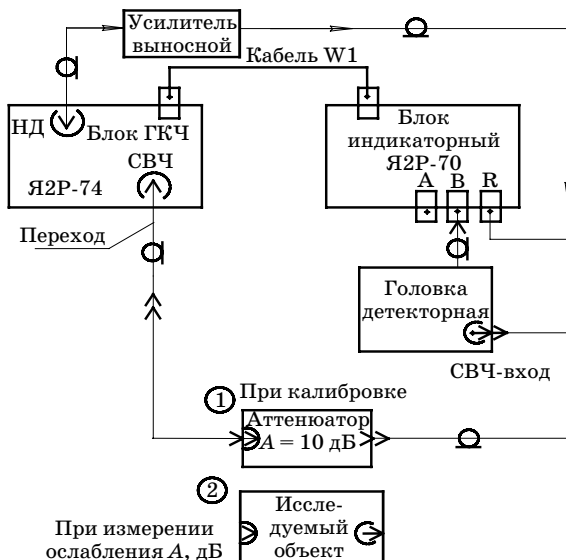


Рис. 1. Структурная схема измерителя P2-106 при калибровке и измерениях КСВ



*Рис. 2. Структурная схема измерителя P2-106 при калибровке и измерениях ослабления*

2. Включите тумблер «СЕТЬ» индикатора и ГКЧ. На включенном ГКЧ должна появиться световая индикация кнопок « $\Delta F_{\max}$ », «СТОП», «М», «0,08» и загореться табло «М».



3. Приведите во включенное положение следующие кнопки индикатора:




канал 1: «10», «А»;


канал 2: «10», «R».


Остальные кнопки выключить.

4. Тумблер «AM» на задней панели блока ГКЧ должен быть установлен во включенное – верхнее – положение (установлен заранее – индикатор «AM» горит).

5. Включите кнопки «СВЧ» и «СТАРТ». Ручками  и  выберите место изображения на экране индикатора. Плавно вращая ручку «М», убедитесь, что показания табло «М» устанавливаются на крайние значения диапазона частот прибора (0,01...2,14 ГГц). При вращении ручки «М» вдоль линии частотной развертки должна перемещаться «частотная метка».

6. Установите заданные крайние частоты диапазона ГКЧ, в котором будут производиться измерения характеристик узлов. Перед установкой частот, убедитесь что кнопки индикатора ,  и  выключены, иначе они будут блокировать органы перестройки частоты ГКЧ.

Установка частоты ГКЧ производится в следующем порядке:  
последовательно включите кнопки «СТОП», « $F_1 - F_2$ », « $F_1 F_0$ »;  
кнопками наборного поля наберите численное значение *нижней частоты* диапазона и введите его в память прибора нажатием кнопки «» (кнопка « $F_1 F_0$ » при этом выключится). Набранный частота в ГГц высвечивается на табло, при этом все табло должно быть заполнено цифрами. Незначащие разряды табло следует заполнить нулями. Первый разряд табло соответствует десяткам ГГц, второй – единицам ГГц и т. д.;  
включите кнопку « $F_2$ »;

наберите численное значение *верхней частоты* рабочего диапазона и введите его в память прибора кнопкой «» (« $F_2$ » выключится).

*Примечание:* если в процессе набора необходимо повторить набор верхней или нижней частоты, то следует нажать кнопку «X» (кнопка « $F_1 F_0$ » или « $F_2$ » выключится), включить кнопку « $F_1 F_0$ » или « $F_2$ » и повторить набор с введением в память набранного значения.

Включите кнопки «СТАРТ», «M».

Плавно вращая ручку «M», убедитесь в том, что крайние показания светового табло соответствуют набранным частотам.

7. Проверьте качество стабилизации и пределы выходного уровня мощности генератора при работе системы АРМ. Для этого подключите к выходному измерительному СВЧ-разъему ГКЧ согласованную нагрузку. Вращая ручку «УРОВЕНЬ», наблюдайте частотную характеристику на экране ЭЛТ. Проверка может проходить по входам «А», «В» и «R». При включении масштабного предела 5дБ/div должна наблюдаться линия с частотной неравномерностью порядка  $\pm 0,6$  дБ при изменениях выходной мощности ГКЧ (ручкой «УРОВЕНЬ») не меньше чем на 10 дБ.

При наблюдении качества стабилизации мощности по входам «А» и «В» неравномерность наблюдаемой линии может быть вызвана не только изменениями мощности при работающей системе АРМ, но и неидентичностью частотных характеристик СВЧ-узлов, включаемых в каналы А и В.

## 2.2. Проведение измерений

Основным режимом работы прибора при панорамном измерении КСВ и ослабления является режим автоматической перестройки частоты ГКЧ с периодом качания 0,08 с.


Возможны другие режимы работы ГКЧ: качание с другим периодом, ручное качание частоты, измерение на фиксированных частотах.


## Панорамное измерение КСВ в режиме автоматической перестройки частоты



Последовательность измерений следующая.

Соедините блоки и узлы установки в соответствии со структурной схемой рис. 1.

Проведите подготовку к измерениям в соответствии с п. 2.1.

Ручкой «УРОВЕНЬ» установите показания табло канала 1 (кнопка «А» – включена, кнопка  в положении «dB») в пределах от минус 7 до минус 10 дБ на частоте, где сигнал максимален.

При разомкнутом измерительном разъеме ( $|\Gamma| = 1$ ) включите кнопку  1 (проведя первую калибровку канала 1), в режиме холостого хода. Цифровое табло канала 1 должно показывать 0 дБ.


Если имеет место другой отсчет, то шлицом  0 , установите показания табло 0 дБ.

Включите линию электронного визира кнопкой «-».

Совместите линию электронного визира с первой калибровочной линией, вращая ручки  и  канала 2.

Перестраивая частоту метки ручкой «М», убедитесь, что величина 0 дБ сохраняется во всем установленном диапазоне частот с отклонением не более  $\pm 0,2$  дБ.

Подключите к измерительному разъему короткозамыкатель ( $|\Gamma| = 1$ ).


Включите кнопку  2 (команда на вторую калибровку канала 1), тем самым проведя калибровку по короткому замыканию и усреднение результатов по первой и второй калибровке. Линия, которая будет наблюдаться на экране, соответствует усредненному результату калибровки при  $|\Gamma| = 1$  в режимах ХХ и КЗ. Усреднение уменьшает погрешность калибровки, так как в двух опытах коэффициенты отражения равны по модулю, но противоположны по фазе.

Подключите к измерительному разъему исследуемый СВЧ-узел.

Выберите нужный масштаб индикации кривой на экране ЭЛТ кнопками «10»; «5»; «1»; «0,25», что соответствует масштабам в дБ/см.

Пользуясь ручкой «М», установите частотную метку на интересующую точку кривой частотной зависимости КСВ.

Отсчитайте значение КСВ (или обратных потерь) по табло канала 1, а также частоту, на которой произведен отсчет, по табло «М» в характерных точках кривой.

*Примечание:* переключение отсчета «КСВ» – «обратные потери дБ» производится нажатием кнопки  и индицируется световыми надписями «SWR» – «dB».

Ориентировочный отсчет обратных потерь в дБ можно производить по табло канала 2 после совмещения линии электронного визира с выбранными точками частотной характеристики на экране.

### *Панорамное измерение ослабления в режиме автоматической перестройки частоты*

После подготовки измерителя к проведению измерений (п. 2.1) соедините блоки и узлы установки в соответствии со структурной схемой рис. 2. Измерение ослабления производится по каналу 1, так как в этом случае в канале 2 можно сформировать линию электронного визира, используемого для ориентировочного отсчета затухания в различных точках кривой и задания граничных значений измеряемых величин на экране индикатора.

Включите кнопку «В». Вместо измеряемого объекта включите аттенюатор 10 дБ и ручкой «УРОВЕНЬ» установите показания табло канала 2 в пределах от минус 19 до минус 17 дБ (при измерениях ослаблений до 35 дБ) или от минус 10 до минус 9 (при измерениях ослаблений до 40 дБ).

Проведите калибровку и нормализацию прибора, включением кнопки ▼. При этом цифровое табло канала 2 должно показывать 0 дБ. Если имеет место другое показание, то, вращая шлиц ► 0 ◀, установите табло на 0 дБ.

Перестраивая частоту метки ручкой «М», убедитесь, что величина 0 дБ сохраняется в диапазоне установленных частот с отклонением не более  $\pm 0,2$  дБ.

Вместо аттенюатора подсоедините исследуемый объект.

Выберите удобный масштаб индикации кривой ослабления кнопками «10»; «5»; «1», «0,25» (дБ/см).

Ручкой «М» установите частотную метку на интересующей точке кривой ослабления.

Отсчитайте значение ослабления и частоту измерения по цифровым табло в характерных точках кривой.

Зарисуйте кривую ослабления.

### **3. Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

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;

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.

Отчет может содержать краткие письменные ответы на контрольные вопросы.

#### **4. Контрольные вопросы**

1. Что такое КСВ и ослабление, какими методами они могут измеряться? Какая связь между КСВ и обратным ослаблением?

2. Какие частоты (длины волн) образуют диапазон СВЧ?

3. Каковы основные технические данные прибора типа Р2-106?

4. Что такое панорамные измерения и как они осуществляются?

5. Почему внешний СВЧ-тракт измерителя выполняется на основе коаксиальных линий передачи; каковы рабочие параметры этих линий?

6. Покажите, что волновое сопротивление коаксиальной линии с указанными в методических указаниях поперечными размерами действительно составляет 50 Ом.

7. Чем отличаются режимы работы прибора, как физически можно обеспечить эти режимы?

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

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

10. В чем суть калибровки прибора, с помощью чего и как она осуществляется?

11. Почему в приборе применена система АРМ, каков принцип ее работы?

12. Почему в качестве датчика КСВ используется резистивный направленный мост, каково его устройство и основные параметры?

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

14. Каким образом достигается широкодиапазонность ГКЧ, как осуществляется его перестройка?
15. Почему СВЧ-сигнал генератора модулируется НЧ-сигналом типа «меандр»? Изобразите графически СВЧ-сигнал до модуляции, после модуляции и сигнал после детектирования.
16. Как конструктивно выполнен измеритель типа Р2-106?
17. Каковы органы регулировки и управления блока ГКЧ и индикатора, их расположение, назначение?
18. Изобразите структурную схему измерительной установки при калибровке и измерениях КСВ. То же самое при измерении затухания.
19. В чем состоит подготовка прибора к работе? Каковы ваши действия в отношении ГКЧ и индикатора?
20. Каково назначение и использование входов «А», «В» и «R»?
21. Каким образом в приборе учитывается влияние неидентичности частотных характеристик устройств СВЧ-тракта на результаты измерений?
22. Почему калибровка прибора перед измерением КСВ проводится дважды – в режиме ХХ и КЗ?
23. Каким образом может формироваться частотная метка? Предложите структурную схему.
24. В чем состоит процедура измерений КСВ и ослабления на подготовленном приборе?

### Литература

1. *Негурей А. В.* Контроль параметров линейных СВЧ-узлов: учеб. пособие/ЛИАП, Л., 1988. С. 3–9, 27–43.
2. *Харитонов А. А.* Конструирование устройств СВЧ: метод. указания к практическим занятиям/ЛИАП, Л., 1989. С. 3–10.

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОСКОВОГО НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ

*Цель работы:* изучение принципа действия, конструкции, параметров и частотных характеристик направленного ответвителя (НО), выполненного в виде отдельного функционального узла на основе СПЛ – связанных полосковых линий передачи (измерения проводятся в дециметровом диапазоне волн с помощью панорамного измерителя КСВ и ослабления типа Р2-106).

#### 1. Общие сведения о направленных ответвителях

Направленным ответвителем (НО) называется четырехплечее устройство, состоящее из двух отрезков линии передачи, между которыми с помощью элементов связи или области связи осуществляется направленная передача электромагнитной энергии. Линия, из которой исходит энергия, называется основной или первичной; линия в которую поступает энергия – дополнительной или вторичной. Термин «направленная передача энергии» означает, что если в основной линии передачи распространяется бегущая волна определенного направления, то во вторичной линии будет возбуждаться тоже бегущая волна, распространяющаяся от области связи только в одном определенном направлении. В идеальном случае, в противоположном направлении от области связи во вторичной линии волна вообще не распространяется. Если в основной линии передачи изменить направление движения бегущей волны, то во вторичной линии направление движения ответвленной волны также изменится на обратное. Таким образом, НО является *взаимным* устройством (рис. 1, 2).

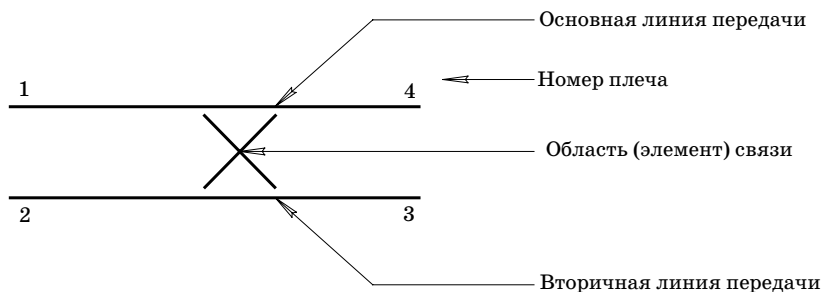
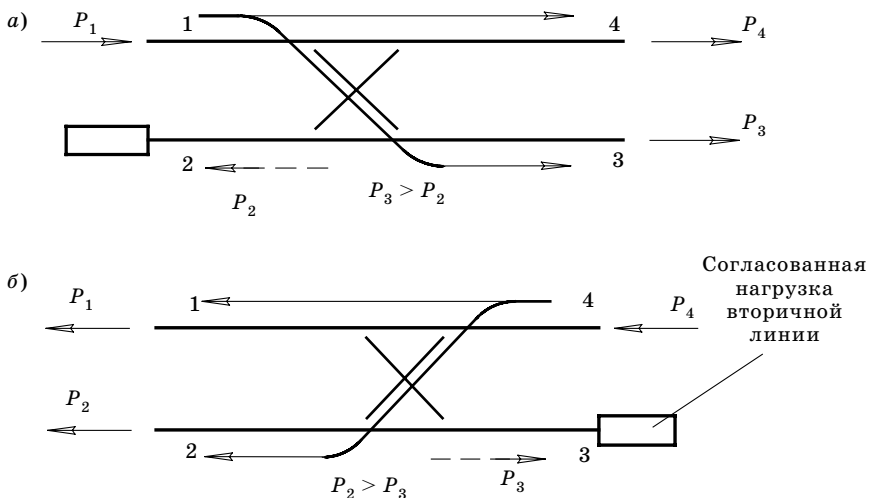


Рис. 1. Изображение НО на принципиальных электрических схемах



**Рис. 2.** Направление распространения волн в НО: а – вход со стороны плеча 1; б – вход со стороны плеча 4

Обычно один из выходов (2 или 3) вторичной ЛП, в который не должна ответвляться энергия из основной ЛП, нагружается на хорошо согласованную поглощающую нагрузку (см. рис. 2, а, б), которая конструктивно объединяется с НО или подключается к нему. Эта нагрузка предназначена для поглощения энергии, передаваемой во вторичную ЛП, если в основной ЛП кроме падающей существует отраженная волна – волна обратного направления. Эта же нагрузка должна поглощать энергию, проникающую в сторону, противоположную выходу вторичной ЛП. Если основной выход вторичной ЛП соединен с устройством, отражающим волны ( $K_{\text{св}} > 1$ ), то согласованная нагрузка НО будет поглощать и эти отражения.

Направленные ответвители могут быть выполнены на отрезках различных ЛП (полосковой, коаксиальной, волноводной и др.) и находят широкое применение в микроволновой технике. Они используются, например, в качестве делителей мощности с различными коэффициентами деления, для измерения большого уровня мощности по малому ответвленному, для индикации и измерения уровня падающей и отраженной волны в основном СВЧ-тракте, для сравнения этих уровней, т. е. для измерения КСВ и модуля коэффициента отражения ( $|\Gamma|$ ), для устранения взаимного влияния (развязки) приемного и передающего устройства в СВЧ-тракте и т. д. На основе НО выполняются другие функциональные узлы, например рефлектометры, фазовращатели.

Основными параметрами НО являются *направленность*  $D$  и *переходное ослабление*  $C$ . Широкополосность ответвителя определяется рабочим диапазоном частот  $\Delta f = f_2 - f_1$ , в пределах которого параметры НО не выходят за допустимые значения.

*Направленностью* называется логарифмическая мера отношения мощностей, выходящих из плеч вторичной ЛП (3 и 2, рис. 2, а), при условии, что основная ЛП (плечо 4) нагружена на согласованную нагрузку и в ней существует бегущая волна. Таким образом

$$D = 10 \lg \left( \frac{P_3}{P_2} \right), \text{ где } P_3 > P_2.$$

*Переходным ослаблением* называется логарифмическая мера отношения мощности бегущей (падающей) волны на входе основной ЛП ( $P_1$ ) к ответвленной мощности на выходе вторичной ЛП ( $P_3$ ) при условии, что остальные плечи НО (2 и 4) нагружены на согласованные нагрузки.

$$C = 10 \lg \left( \frac{P_1}{P_3} \right), \text{ где } P_3 < P_1.$$

Направленность и переходное ослабление исчисляются в децибелах.

Если во входное плечо НО поступает падающая волна, а все остальные плечи нагружены на согласованные нагрузки, то можно измерить КСВ НО со стороны входа. Теоретически входной КСВ однозначно связан с направлением НО: идеальной направленности ( $D = \infty$ ) соответствует  $K_{\text{св}} = 1$ . Практически входной КСВ близок к единице во всем рабочем диапазоне частот.

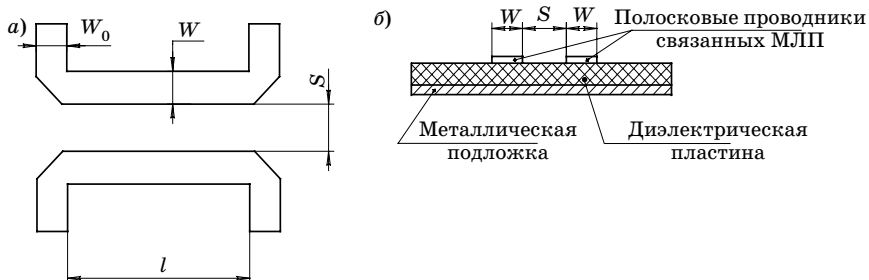
Из определения направленности и переходного ослабления следует связь этих параметров с параметрами рассеяния НО, рассматриваемого как восьмиполосник:

$$D = 10 \lg \left( \frac{|S_{31}|^2}{|S_{21}|^2} \right) = -20 \lg \left( \frac{|S_{21}|}{|S_{31}|} \right),$$

$$C = 10 \lg \left( \frac{1}{|S_{31}|^2} \right) = -20 \lg |S_{31}|.$$

На рис. 3 изображен НО, выполненный на связанных несимметричных МПЛ. Подобный ответвитель исследуется в данной работе.

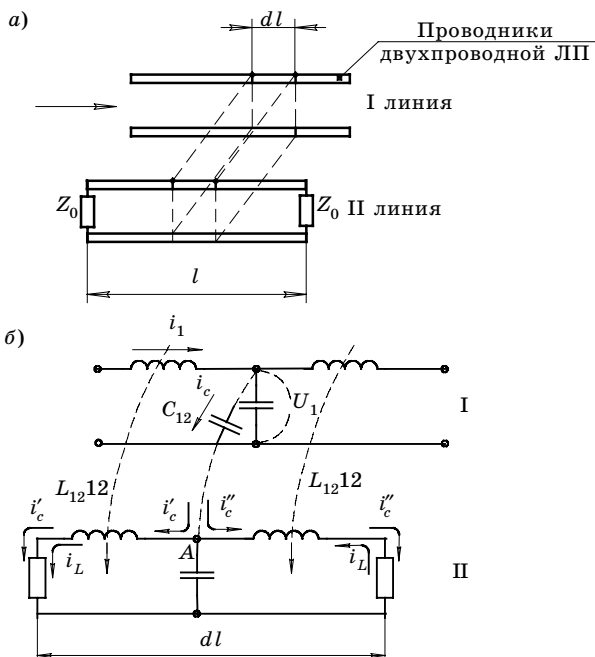
Несимметричная ПЛ по сути является двухпроводной, в связи с этим принцип действия НО на связанных МПЛ удобно рассмотреть



**Рис. 3.** Направленный ответвитель на связанных полосковых линиях: а – полосковые проводники НО (топология); б – направленный ответвитель (поперечное сечение)

на модели, состоящей из двух параллельно расположенных отрезков обычной симметричной двухпроводной линии (рис. 4, а).

Между линиями передачи I и II (рис. 4, б), расположенными параллельно друг другу, существует связь как через электрическое, так



**Рис. 4.** Пояснение принципа работы направленного ответвителя на связанных линиях: а – две симметричные двухпроводные линии с электромагнитной связью; б – эквивалентная схема отрезков связанных линий длиной  $dl$

и через магнитное поле, поэтому в каждом элементе вторичной линии протекают емкостные токи, наведенные токами смещения (переменным электрическим полем), и возникает ЭДС индукции, вызывающая магнитные токи. Будем считать, что выделенный элементарный участок вторичной линии нагружен с обеих сторон на сопротивления, равные волновому сопротивлению ЛП, т. е. на  $Z_0$ .

Под действием электрического поля первичной линии через емкость связи  $C_{12}$  течет ток

$$i_c = \frac{\partial(C_{12}U_1)}{\partial t} \partial l.$$

Этот ток в точке  $A$  вторичной линии разветвляется на два тока  $i'_c$  и  $i''_c$ , текущих в противоположных направлениях. Величины этих токов зависят от  $Z_0$ .

Под действием магнитного поля в электромагнитном замкнутом контуре второй линии (как в петле связи) наводится ЭДС, определяемая величиной взаимной индукции  $L_{12}$  и током первой линии  $i_1$

$$i_L = \frac{\partial(L_{12}i_1)}{\partial t} \partial l.$$

Под действием ЭДС индукции в замкнутом контуре течет круговой ток  $i_L$ , направление которого (см. рис. 4, б) находится исходя из направления силовых линий возбуждающего магнитного поля, а величина зависит от  $Z_0$ .

Как видно, справа от точки  $A$  токи  $i'_c$  и  $i_L$  вычитаются, а слева — складываются. Если связь между линиями подобрать так, чтобы токи  $i'_c$  и  $i_L$ , протекающие в правой части контура через  $Z_0$ , были равны по величине, то суммарный ток будет равен нулю и *электромагнитная энергия во второй ЛП не будет распространяться вправо*.

Наоборот, через левое сопротивление  $Z_0$  протекает суммарный ток  $i'_c + i_L$ , создающий на  $Z_0$  соответствующее напряжение. В результате во второй линии возбуждается электромагнитная волна, распространяющаяся влево относительно точки  $A$ , т. е. в обратном направлении по отношению к направлению волны, распространяющейся в первой линии.

Таким образом, при заданном расстоянии между связанными линиями можно так подобрать поперечные размеры проводников ЛП, что необходимое соотношение между токами будет достигнуто, вся энергия во второй линии будет распространяться влево и теоретически такой «противонаправленный» ответвитель будет обладать *бесконечной направленностью*.

Анализ показывает, что направленность такого идеального НО *не зависит от длины области связи  $l$  и полосы частот*, так как величины емкости и индуктивности связи являются независимыми от частоты.

Величина энергии, распространяющейся во второй ЛП в обратном направлении, связана с длиной области связи  $l$ , максимальна при  $l = \lambda_B/4$  и равна нулю при  $l = \lambda_B/2$ . Отсюда следует, что *переходное ослабление такого ответвителя зависит от частоты колебаний и расстояния между связанными линиями*.

Ответвители с распределенной связью могут быть реализованы на любой из линий передачи, работающей на Т-волне (двухпроводной, коаксиальной, полосковой). НО на полосковых и микрополосковых линиях наиболее распространены.

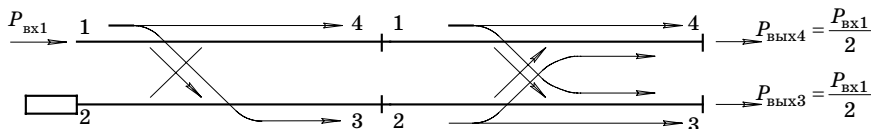
Направленность НО на микрополосковых линиях все же зависит от частоты. Это объясняется частотной зависимостью фазовой скорости волны, распространяющейся в слоистой диэлектрической среде (воздух  $\epsilon = 1$  и твердый диэлектрик  $\epsilon > 1$ ), при этом соотношение емкостной и индуктивной связи между линиями меняется.

Частотная зависимость переходного ослабления НО с распределенной связью определяется выражением

$$C(\lambda) = -10 \lg \frac{K_0^2 \cdot \sin^2 \Theta}{1 - K_0^2 \cdot \cos^2 \Theta},$$

где  $\Theta = \frac{2\pi}{\lambda_B} l$  – электрическая длина области связи;  $K_0 = 10^{\frac{C_0}{20}}$  – коэффициент связи по напряжению на центральной частоте при этом  $\Theta = \frac{\pi}{2}$ , а  $l = \frac{\lambda_B}{4}$ ;  $C_0$  – переходное ослабление на центральной частоте диапазона.

При большом переходном ослаблении ( $C_0 > 10$  дБ,  $K_0 \ll 1$ ) электрическая и магнитная связь оказываются сбалансированными (направленность наибольшая), если ширина проводников в области связи  $W$  равна ширине несвязанных проводников  $W_0$  (см. рис. 3). Для уменьшения переходного ослабления следует уменьшать расстояние между связанными проводниками  $S$ . Однако при этом значительно увеличивается емкость связи и утрачивается баланс электрической и магнитной связи, что ведет к падению направленности. Для сохранения баланса связи увеличивают индуктивную связь путем увеличения индуктивности ленточных проводников, что достигается уменьшением их ширины  $W$ . Таким образом, для уменьшения пере-



**Рис. 5.** Схема последовательного включения двух направленных ответвителей

ходного ослабления следует уменьшать зазор между связанными проводниками  $S$  и одновременно уменьшать их ширину  $W$ .

Среди НО с сильной связью ( $C < 10$  дБ), наибольшее распространение имеют ответвители с переходным ослаблением  $C = 3$  дБ, у которых выходные сигналы равны по мощности и составляют половину от мощности на входе ( $P_3 = P_4 = P_1/2$ ).

Практически реализовать такой микрополосковый НО по простой схеме (см. рис. 3) технологически крайне сложно, так как для увеличения и уравнивания электрической и магнитной связи зазор между проводниками  $S$  должен быть уменьшен до нескольких микрометров, а ширина связанных проводников  $W$  – до сотых долей миллиметра.

Вариантом конструктивной реализации НО с переходным ослаблением  $C = 3$  дБ может быть последовательное включение двух НО с более слабой связью (рис. 5).

Анализ показывает, что устройство, состоящее из двух одинаковых последовательно включенных НО, действительно разделит входной сигнал ( $P_{вх1}$ ) на два сигнала половинной мощности, если величина  $K_0^2 = 0,1464$ , при этом переходное ослабление каждого ответвителя

$$C_0 = -10 \lg K_0^2 = 8,345 \text{ дБ.}$$

НО с таким ослаблением вполне выполним технологически, однако возникают другие трудности, связанные с топологией последовательного соединения двух противоположных ответвителей, усложняющей конструкцию устройства.

## 2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка предназначена для исследования частотных характеристик КСВ и затухания исследуемых узлов в диапазоне частот 0,01...2,14 ГГц .

Основой установки является «Измеритель КСВ панорамный» типа Р2-106, в состав которого входят: генератор качающейся частоты, блок индикаторный и комплект СВЧ-узлов, содержащий: датчик КСВ (направленный мост), детекторную головку, коаксиальные нагрузки, коаксиальные аттенюаторы, короткозамыкатель, переходники, соединительные кабели.

Необходимые сведения о приборе Р2-106, в том числе сведения о подготовке прибора к работе и методике измерений, содержатся в лабораторной работе № 1, выполнение которой должно предшествовать настоящей лабораторной работе.

### 3. Проведение работы

#### 3.1. Исследуемый направленный ответвитель и измеряемые характеристики

Исследуемый полосковый НО (рис. 6) образован отрезками несимметричных ПЛ и выполнен на металлизированной диэлектрической пластине (материал ФАФ-4), находится в металлическом корпусе и имеет три присоединительных коаксиальных разъема штыревого типа. Одна из связанных несимметричных полосковых линий (выход 2) нагружена на встроенную согласованную нагрузку, образованную пленочными резисторами ( $R$ ).

Основные геометрические и электрические параметры НО:  
 ширина полоскового проводника в области связи  $W = 5$  мм;  
 длина области связи  $l = 35$  мм;

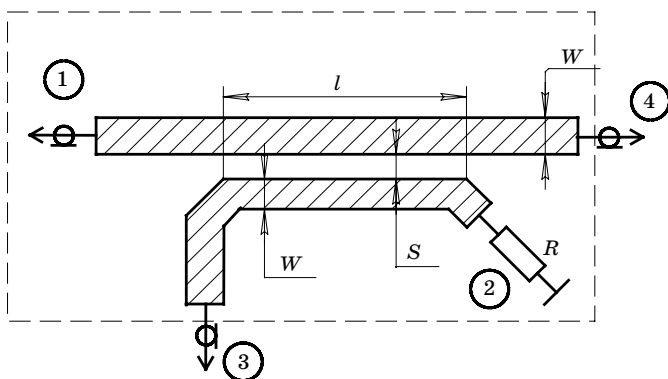


Рис. 6. Исследуемый полосковый направленный ответвитель

расстояние между связанными проводниками  $S = 2$  мм;  
толщина диэлектрической подложки  $h = 2$  мм;  
диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon = 2,6 \pm 0,2$ ;  
тангенс угла диэлектрических потерь материала подложки  $\operatorname{tg}\delta = 0,001$ ;  
волновое сопротивление присоединительных разъемов  $Z_0 = 50$  Ом.

### 3.2. Основные радиотехнические параметры НО

*Входной КСВ* – коэффициент стоячей волны одного из входов НО, измеренный при условии, что все остальные входы нагружены на согласованные нагрузки.

*Переходное ослабление* – логарифмическая мера отношения мощности, подаваемой на вход основной линии НО ( $P_1$ ), к мощности, выходящей из рабочего плеча вторичной линии ( $P_3$ ):

$$C = C_{13} = 10 \lg \frac{P_1}{P_3}, \text{ дБ.}$$

При измерении ослабления свободные плечи НО должны быть также нагружены на согласованные нагрузки.

*Рабочее затухание* – логарифмическая мера отношения мощности, подаваемой на вход основной линии ( $P_1$ ), к мощности, выходящей из этой же линии ( $P_4$ ) и поступающей в согласованную нагрузку:

$$C_{14} = 10 \lg \frac{P_1}{P_4}, \text{ дБ.}$$

При измерении  $C_{14}$  оба выхода вторичной линии нагружаются на согласованные нагрузки.

*Направленность* – логарифмическая мера отношения мощности, выходящей из рабочего плеча вторичной линии ( $P_3$ ), к мощности, выходящей из противоположного – холостого плеча той же линии ( $P_2$ ):

$$D = 10 \lg \frac{P_3}{P_2} = C_{12} - C_{13} = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} - 10 \lg \frac{P_1}{P_3}, \text{ дБ,}$$

где  $C_{12} = 10 \lg \frac{P_1}{P_2}$  – логарифмическая мера отношения мощности, поступающей в основную линию ( $P_1$ ), к мощности, поступающей в согласованную нагрузку холостого плеча вторичной линии ( $P_2$ ).

В процессе измерений следует измерить КСВ двух входов НО (1 и 3), переходное ослабление ( $C_{13}$ ), обратное переходное ослабление ( $C_{43}$ ), а также вычислить направленность как разность  $D = C_{43} - C_{13}$  [дБ].

Измерения проводятся в диапазоне частот 0,7...1,5 ГГц. Направленность вычисляется на крайних и средней частоте диапазона (1,1 ГГц). Частотные зависимости параметров НО называются частотными характеристиками.

### *3.3. Измерение характеристик НО*

**ВНИМАНИЕ!** Коаксиальные СВЧ-разъемы измерительной установки имеют одинаковое волновое сопротивление  $Z_0 = 50$  Ом. Однако они различны по конструкции и диаметрам сопрягаемых проводников. *Соединять можно только сопрягаемые разъемы*, один из которых должен быть гнездового, а другой штыревого типа. При необходимости следует применять «переходы». Во избежание поломок соединять разъемы аккуратно. При монтаже схемы и работе с установкой не допускать крутых изгибов соединительных кабелей.

#### *Измерение входного КСВ*

Измерения проводятся в следующем порядке.

Подготовить прибор Р2-106 к измерениям (см. п. 2.1 лабораторной работы № 1), установив значение нижней частоты диапазона  $f_1 = 0,7$  ГГц, а верхней частоты  $f_2 = 1,5$  ГГц.

Измерения проводить в режиме автоматической перестройки частоты ГЧЧ с периодом качания 0,08 с.

Провести калибровку прибора в режиме холостого хода и короткого замыкания нагрузки.

Измерения КСВ произвести со стороны входов 1 и 3 (нумерация входов на рис. 5 и макете НО совпадают), остальные входы должны быть нагружены на согласованные нагрузки.

Отсчитать и записать значения КСВ (обратных потерь) по табло канала 1 на трех характерных частотах. Частоты отсчитываются по табло «М».

Снять осциллограммы частотной зависимости КСВ по обоим входам, нанести на них координатные оси, координаты точек измерения, а также выбранный масштаб.

## *Измерение ослабления и вычисление направленности*

После подготовки измерителя к работе (п. 2.1, лабораторной работы № 1) провести калибровку прибора, включив вместо измеряемого объекта коаксиальный аттенюатор с затуханием 10 дБ.

Вместо аттенюатора подключить исследуемый НО и провести измерения.

Переходное ослабление  $S$  ( $S_{13}$ ) измеряется при подключении плеча 1 к ГКЧ, а плеча 3 – к детекторной головке. Плечо 4 нагружается на согласованную нагрузку.

Для вычисления направленности измеряется обратное переходное ослабление (обратное затухание)  $S_{43}$ , при этом плечо 4 подключается к ГКЧ, к плечу 3 – детекторная головка, а плечо 1 нагружается на согласованную нагрузку.

Все измерения затуханий производить в той же полосе и на тех же частотах, что и измерение КСВ.

Значения затуханий и частот в характерных точках снять и записать.

Снять осциллограммы частотных зависимостей  $S$ ,  $S_{14}$ ,  $S_{43}$ , отобразив на них координатные оси частот и затуханий, измеренные точки с координатами, выбранный масштаб по оси затуханий [дБ/см].

## **4. Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

цель работы;

эскиз направленного ответвителя;

определение основных измеряемых параметров;

осциллограммы измеренных частотных характеристик с указанием координатных осей, масштаба, значений измеренных величин в характерных точках;

анализ результатов измерений (анализ хода характеристик, заключение о рабочем диапазоне частот, сравнение полученных характеристик с ожидаемыми – теоретическими, возможные причины их расхождения и др.);

выводы по работе.

## **5. Контрольные вопросы**

1. Основные конструктивные и электрические параметры одиночных и связанных микрополосковых линий.

2. Устройство и принцип действия направленного ответвителя на линиях с Т-волной и распределенной связью.

3. Особенности конструкции и действия НО с сильной связью.
4. Основные параметры НО, их определения и методы измерения.
5. Частотные характеристики НО, возможные причины расхождения измеренных и теоретических характеристик.
6. Структурная схема измерителя при измерении КСВ и ослабления.

### **Литература**

1. *Негурей А. В., Харитонов А. А.* Конструкции и техника СВЧ: метод. указания к выполнению лабораторий работ/ЛИАП. Л., 1983. С. 8–12; 27–34.
2. *Калашиников В. С., Негурей А. В.* Миниатюризация устройств СВЧ: метод. указания к курсовому проектированию/ЛИАП. Л., 1986. С. 1–9.

## Лабораторная работа № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОСКОВЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

*Цель работы:* изучение принципа действия, конструкции, параметров и частотных характеристик делителей мощности (ДМ) и сумматоров мощности (СМ), выполненных в виде отдельных функциональных узлов на основе несимметричных полосковых линий (ПЛ) передачи (исследования проводятся в дециметровом диапазоне волн с помощью панорамного измерителя КСВ и ослабления типа Р2-106).

#### 1. Общие сведения о делителях и сумматорах мощности

*Делители мощности* предназначены для разделения мощности, поступающей на их входы между выходными каналами в заданном соотношении. Выходных каналов может быть два и более.

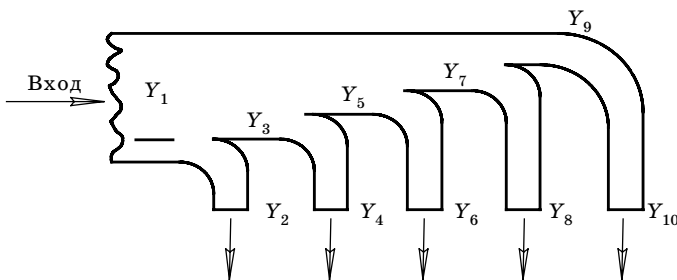
*Сумматоры мощности* решают обратную задачу: сложение мощностей входящих СВЧ-сигналов и канализация сигнала суммарной мощности в общую нагрузку. Как правило, ДМ могут работать и в качестве СМ, и наоборот, т. е. рассматриваемые устройства являются *взаимными*.

#### Основные параметры ДМ (СМ)

*Коэффициент деления мощности* для каждого выходного канала  $K_{pi} = \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых } i}}$ , где  $P_{\text{вх}}$  – мощность поступающая на согласованный вход ДМ, а  $P_{\text{вых } i}$  – выходная мощность  $i$ -го выходного канала при условии, что все остальные выходные каналы нагружены на согласованные нагрузки. Коэффициент деления может быть выражен в логарифмических единицах, т. е. в децибелах:  $L = 10 \lg K_{pi}$ , дБ. Если выходных каналов два и входная мощность делится поровну, то  $K_{pi} = 2$ , а  $L = 3$  дБ, при этом делитель называется «трехдецибельным».

*Коэффициент стоячей волны (КСВ)* со стороны каждого канала ДМ(СМ) измеряется при условии, что все остальные каналы нагружены на согласованные нагрузки.

*Развязка между входными каналами*, измеряемая только для сумматора мощности,  $A = 10 \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых } i}}$ , где  $P_{\text{вх}}$  – мощность, поступающая на один из входных каналов сумматора, а  $P_{\text{вых } i}$  – часть мощнос-



**Рис. 1.** Топология полоскового делителя последовательного типа

ти  $P_{вх}$ , проникающая в другой  $i$ -й входной канал СМ, для которого определяется развязка. Как и ранее, это определение справедливо, если все остальные каналы СМ нагружены на согласованные нагрузки.

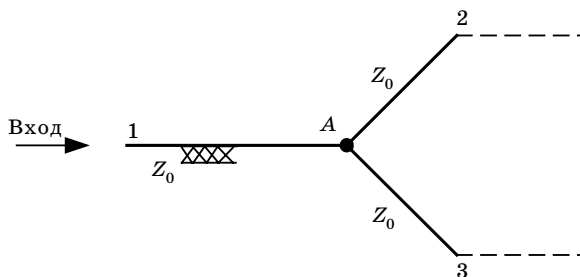
*Полоса рабочих частот* подразумевает такую полосу, в пределах которой параметры устройства (ДМ, СМ) не выходят за заданные предельные величины.

В качестве делителей (сумматоров) мощности используются мосты, направленные ответвители и собственно делители мощности, выполняемые на ЛП различных типов. Далее будут рассмотрены ДМ на основе полосковых ЛП.

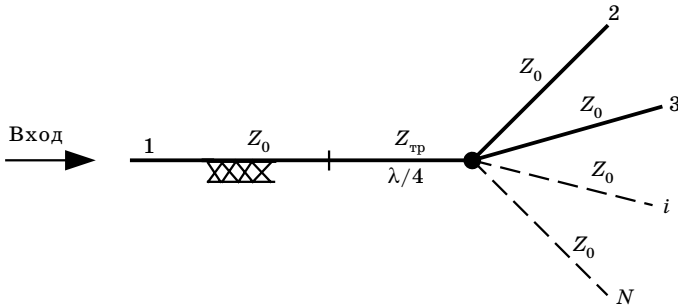
На рис. 1 в качестве примера изображена топология полоскового ДМ последовательного типа, на котором через  $Y_1 \dots Y_{10}$  обозначены проводимости соответствующих участков ЛП.

Условие согласования в любом разветвлении ЛП такого ДМ состоит в равенстве:  $Y_i = Y_{i+1} + Y_{i+2}$  (например,  $Y_1 = Y_2 + Y_3$ ; ...  $Y_7 = Y_8 + Y_9$ ). Равному делению мощности ( $K_{pi} = 5$ ) соответствует равенство  $Y_2 = Y_4 = Y_6 = Y_8 = Y_{10}$ .

Схема простейшего трехканального ( $N = 3$ ) ДМ параллельного типа с равными волновыми сопротивлениями всех линий передачи ( $Z_0$ ) изображена на рис. 2.



**Рис. 2.** Делитель с параллельным разветвлением входной линии передачи



**Рис. 3.** *N*-канальный делитель мощности параллельного типа с согласующим трансформатором

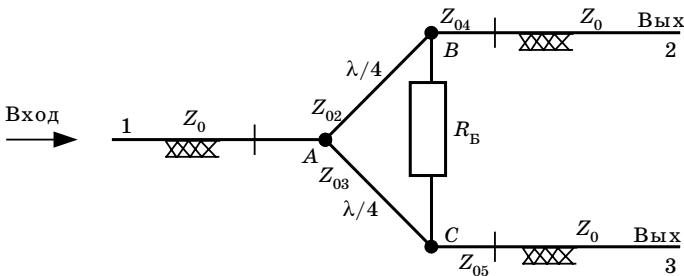
Такой делитель прост по схеме и конструкции, однако он не согласован со стороны любого плеча и входные плечи в режиме суммирования (например, 2 и 3) не развязаны между собой.

Делитель параллельного типа с *N*-каналами и согласующим четвертьволновым трансформатором (рис. 3) имеет лучшее согласование по входу.

Здесь входная линия с волновым сопротивлением  $Z_0$  нагружена на входное сопротивление  $N-1$  параллельно соединенных линий, т. е. на  $Z_{\text{вх}} = Z_0 / (N-1)$ .

Для согласования входной линии с разветвлением из *N* линий применен четвертьволновой трансформатор сопротивлений с волновым сопротивлением  $Z_{\text{тр}} = \sqrt{Z_0 Z_{\text{вх}}} = Z_0 / \sqrt{N-1}$ . Изменяя волновые сопротивления выходных каналов, можно регулировать коэффициенты деления для каждого канала.

Лучшими параметрами (величиной КСВ и развязки) обладают кольцевые делители, схема которых изображена на рис. 4. Название «кольцевой» связано с топологией участка схемы ВАС.



**Рис. 4.** Кольцевой делитель мощности с балластным резистором  $R_B$

Изображенный делитель обладает геометрической и электрической симметрией, поэтому входная мощность канала 1 делится между каналами 2 и 3 поровну ( $K_p = 2$ ). Согласование входов и выходов достигается с помощью двух четвертьволновых трансформаторов ( $AB$  и  $AC$ ) с волновыми сопротивлениями  $Z_{2,3} = Z_0 \sqrt{2}$ . При возбуждении делителя со входа 1 точки  $B$  и  $C$  оказываются эквипотенциальными, ток через резистор  $R_B$  не течет и потерь мощности нет. Если сигнал (например, отраженный от нагрузки) появляется со стороны выходного плеча 2, то точки  $B$  и  $C$  становятся противофазными, так как расстояние до точки  $C$  по пути  $BAC$  равно  $\lambda/2$ . В этом случае через резистор  $R_B$  протекает ток и сигнал плеча 2 поглощается, плечо 3 оказывается развязанным, а ко входу 1 ответвляется меньшая часть мощности. На средней расчетной частоте такой делитель имеет геометрически «идеальное согласование» и «бесконечную развязку» выходных плеч 2 и 3.

Если в плечи 2 и 3 одновременно направить два синфазных сигнала равной мощности, то они будут складываться в точке  $A$  и суммарный сигнал поступит в плечо 1. Через резистор  $R_B$  токи при этом не протекают.

Если через эти же плечи 2 и 3 направить два равных, но противофазных сигнала, то резистор  $R_B$  будет поглощать поступающую мощность и плечо 1 будет развязано относительно входных плеч, т. е. СМ не будет суммировать.

На рис. 5 изображена схема делителя с неравным делением мощности. Необходимое соотношение мощностей на выходе делителя ( $P_3/P_2$ ) обеспечивается выбором волновых сопротивлений четвертьволновых трансформаторов ( $Z_{02} \neq Z_{03}$ ). Такой делитель является согласованным со стороны любого плеча, а его выходные плечи 2 и 3 взаимно развязаны.

Рассмотренные одноступенчатые ДМ (см. рис. 4, 5) имеют хорошее согласование и развязку в узкой полосе частот. Для расширения

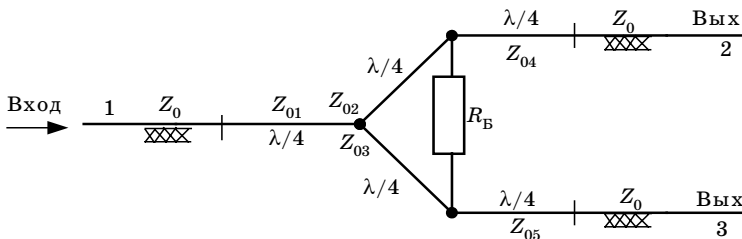


Рис. 5. Одноступенчатый кольцевой делитель с неравным делением мощности ( $Z_{02} \neq Z_{03}$ )

рабочей полосы частот при допустимом ухудшении основных параметров применяют двух- (рис. 6) и многоступенчатые ДМ.

Трехплечие делители мощности ( $N = 3$ , рис. 2, 4, 5, 6) в соответствии с терминологией теории цепей являются СВЧ-шестиполюсниками, свойства которых описываются системой  $N$  алгебраических линейных уравнений:

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + S_{13}a_3, \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + S_{23}a_3, \\ b_3 = S_{31}a_1 + S_{32}a_2 + S_{33}a_3. \end{cases} \quad (1)$$

В этой системе  $b_i$  – нормированные амплитуды волн, выходящих из соответствующих плеч;  $a_i$  – волн, входящих в каждое из плеч шестиполюсника. Степень влияния входящих волн на амплитуду любой выходящей волны учитывается коэффициентами  $S_{mn}$ .

Анализ СВЧ- $N$ -полюсников проводится с помощью матриц рассеяния, которые отображают систему линейных уравнений через коэффициенты влияния  $S_{mn}$ :

$$S = \begin{cases} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} & m = 1 \\ & m = 2 \\ & m = 3 \end{cases} \quad (2)$$

$n = 1, n = 2, n = 3.$

В данном случае  $S_{mn}$  являются элементами матрицы рассеяния  $S$ .

Напомним, что элементы матрицы  $S_{mn}$  индексируются в соответствии с номером строки  $m$  и номером столбца  $n$ . Физически элементы диагонали матрицы рассеяния ( $S_{11}, S_{22}, S_{33}$ ) имеют смысл коэффициентов отражения от соответствующих плеч 1, 2, 3, а остальные – коэффициентов передачи в плечо  $m$  из плеча  $n$  при условии, что все остальные плечи нагружены на согласованные нагрузки.

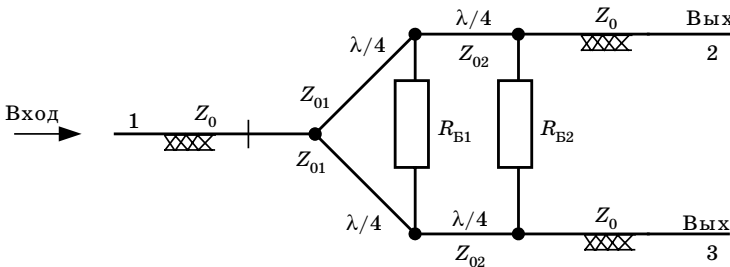


Рис. 6. Двухступенчатый делитель с равным делением мощности

В общем случае величины  $S_{mn}$  являются комплексными, учитывающими потери энергии и изменение фазы волн, проходящих через  $2N$ -полюсник или отраженных от его входов. Если потери малы, а изменение фазы не представляет интереса, то элементы матрицы вещественны и равны модулям коэффициента передачи в плечо  $m$  из плеча  $n$  или коэффициента отражения ( $m = n$ ).

В уравнениях (1)  $a_i$  и  $b_i$  – амплитуды входящих и выходящих волн – нормированы. Нормировка проведена в предположении, что волновые сопротивления линий передачи, образующих плечи  $2N$ -полюсника, безразмерны и равны единице ( $Z_0 = 1$ ). При этом нормированные амплитуды волн выражаются через их мощности:

$$|a| = \sqrt{2P_{\text{пад}}}, \quad |b| = \sqrt{2P_{\text{отр}}}$$

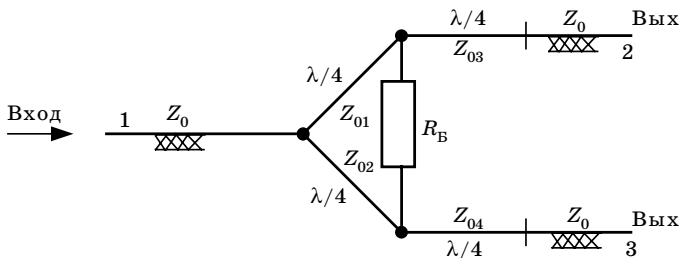
и имеют размерность  $\left[ \text{Вт}^{1/2} \right]$ . Поскольку амплитуды нормированных волн определены только через их мощности, а не через токи и напряжения в линиях передачи, то эти понятия являются универсальными, т. е. применимыми для линий передачи любого типа – для линий, работающих не только на волне типа Т, но и на Н, Е-волнах (например, для волноводов).

Согласование делителя со стороны входа, т. е. отсутствие отражений, соответствует требованию  $S_{11} = 0$ . Распределение единичной входной мощности по выходам делителя определяется заданием величин коэффициентов передачи по мощности  $|S_{21}|^2$  и  $|S_{31}|^2$ , при этом в отсутствие потерь  $|S_{21}|^2 + |S_{31}|^2 = 1$ . В режиме суммирования мощности к делителю предъявляются дополнительные требования: согласование (отсутствие отражений) со стороны подводящих плеч 2 и 3 ( $S_{22} = S_{33} = 0$ ) и развязка между этими плечами ( $S_{32} = S_{23} = 0$ ).

Анализ показывает [2], что простой шестиполюсный делитель мощности, каждое плечо которого образовано четвертьволновыми трансформаторами с волновыми сопротивлениями  $Z_{01}, Z_{02}, Z_{03}$ , позволяет получить практически любые коэффициенты передачи  $|S_{21}|^2$  и  $|S_{31}|^2$ , т. е. осуществить неравное деление мощности, но при этом согласование возможно только со стороны одного плеча – со стороны входа ( $S_{11} = 0$ ).

Чтобы согласовать шестиполюсник со стороны всех плеч ( $S_{11} = S_{22} = S_{33} = 0$ ), а также обеспечить развязку ( $S_{32} = S_{23} = 0$ ), в делитель вводятся поглощающие элементы – резисторы ( $R_{B1,2}$  на рис. 6).

Широкое применение при неравном делении мощности находят одноступенчатые делители, схема которых изображена на



**Рис. 7.** *Согласованный шестиполюсный делитель с неравным делением мощности*

рис. 7. Подобная схема использована в делителях лабораторной работы.

Делитель имеет параллельное разветвление входа 1 и четыре согласующих четвертьволновых трансформатора с волновыми сопротивлениями  $Z_{01}$ ,  $Z_{02}$ ,  $Z_{03}$ ,  $Z_{04}$ , а также поглотитель в виде балластного резистора  $R_B$ .

Идеальная матрица рассеяния такого делителя на центральной частоте диапазона должна иметь вид

$$S = - \begin{vmatrix} 0 & t & \sqrt{1-t^2} \\ t & 0 & 0 \\ \sqrt{1-t^2} & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (3)$$

Здесь согласование по всем входам задается диагональю  $S_{11} = S_{22} = S_{33} = 0$ ; передача единичной мощности на выходы 2 и 3:  $|S_{21}|^2 + |S_{31}|^2 = 1$ ; развязка между плечами 2 и 3:  $S_{32} = S_{23} = 0$ ; коэффициент передачи по напряжению между плечами 1 и 2:  $t = S_{12} = S_{21}$  ( $0 < t < 1$ ), а между плечами 1 и 3:  $S_{13} = S_{31} = \sqrt{1-t^2}$ .

Знак «минус» перед матрицей учитывает изменение фазы сигнала, проходящего через два четвертьволновых трансформатора, на  $\pi$ .

## 2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка предназначена для исследования частотных характеристик КСВ и затухания устройств в диапазоне частот 0,01...2,14 ГГц.

Основой установки является «Измеритель КСВ панорамный» типа Р2-106, в состав которого входят: генератор качающейся частоты,

блок индикаторный и комплект СВЧ-узлов, содержащий датчик КСВ (направленный мост), детекторную головку и др.

Необходимые сведения о приборе Р2-106, в том числе сведения о подготовке прибора к работе и методике измерений, содержатся в лабораторной работе № 1.

### 3. Проведение работы

#### 3.1. Исследуемые делители мощности и измеряемые характеристики

Исследуемые полосковые ДМ (они же сумматоры) образованы отрезками несимметричных ЛП, выполненных на основе металлизированных диэлектрических пластинок, расположены в металлических корпусах и имеют по три пронумерованных коаксиальных присоединительных разъема. Для примера топология одного из ДМ изображена на рис. 8.

Как видно, вход и выходы изображенного ДМ образованы отрезками ПЛ с одинаковым волновым сопротивлением ( $Z_0 = 50$  Ом). Выходные плечи ДМ содержат по два четвертьволновых трансформатора ( $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ ). Между выходными плечами включен резистор  $R_B$ , который служит для согласования и развязки плеч 2 и 3. Делитель имеет неравные коэффициенты деления, о чем говорит неравенство волновых сопротивлений трансформаторов  $Z_1$  и  $Z_2$ , величины которых зависят от ширины полосок образующих ПЛ.

В процессе проведения работы измеряются следующие параметры ДМ (СМ) и их частотные зависимости.

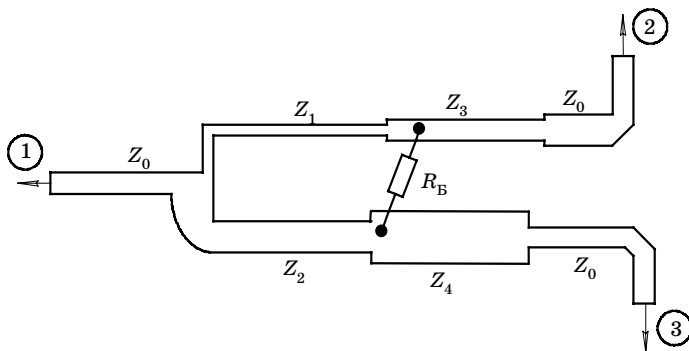


Рис. 8. Топология исследуемого делителя мощности

Коэффициенты деления мощности  $K_{P_i}$  для выходных каналов в децибелах:

$$L_2 = 10 \lg \left( \frac{P_1}{P_2} \right), \text{ дБ} \quad \text{и} \quad L_3 = 10 \lg \left( \frac{P_1}{P_3} \right), \text{ дБ}.$$

При измерении  $L_2$  или  $L_3$  свободное выходное плечо 3 или 2 должно быть нагружено на согласованную нагрузку.

*Развязка между каналами 2 и 3 в режиме суммирования:*

$$A_{23} = 10 \lg \left( \frac{P_3}{P_2} \right), \text{ дБ} \quad \text{или} \quad A_{32} = 10 \lg \left( \frac{P_2}{P_3} \right), \text{ дБ}.$$

При измерении развязки канал 1 нагружается на согласованную нагрузку.

*КСВ со стороны каждого плеча (1, 2, 3).*

По определению

$$K_{\text{св}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{пад}}}}}{1 - \sqrt{\frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{пад}}}}},$$

где  $|\Gamma|$  – модуль коэффициента отражения;  $P_{\text{пад}}$  – мощность СВЧ-сигнала, поступающего на вход любого плеча;  $P_{\text{отр}}$  – мощность СВЧ-сигнала, отраженного от соответствующего плеча.

При измерении КСВ со стороны каждого плеча ( $K_{\text{св}1, 2, 3}$ ) два других свободных плеча нагружаются на согласованные нагрузки.

### 3.2. Измерение характеристик ДМ

**ВНИМАНИЕ!** Коаксиальные СВЧ-разъемы измерительной установки и исследуемых узлов имеют одинаковое волновое сопротивление  $Z_0 = 50$  Ом, однако различны по конструкции и диаметрам сопрягаемых проводников. *Соединять можно только конструктивно сопрягаемые разъемы*, один из которых должен быть гнездового, а другой – штыревого типа. Для несопрягаемых разъемов следует применять «переходы». Во избежание поломок соединять разъемы следует аккуратно. При монтаже и работе с установкой недопустимы крутые изгибы соединительных кабелей.

Перед проведением измерений прибор Р2-106 следует подготовить к работе (см. п. 2.1 лабораторной работы № 1).

Значение нижней частоты рабочего диапазона следует установить  $f_1 = 0,7$  ГГц, а верхней частоты  $f_2 = 1,5$  ГГц. В процессе исследований рабочий диапазон может быть изменен.

Измерение  $K_{CB}$  проводится после предварительной калибровки прибора в режиме холостого хода и короткого замыкания (см. структурную схему на рис. 1 лабораторной работы № 1). В процессе измерений каждое плечо делителя подключается к разъему « $Z_X$ » датчика КСВ (направленного моста), низкочастотный выход которого соединяется коаксиальным кабелем со входом А блока индикатора. В каждом опыте к двум свободным плечам ДМ подключаются согласованные нагрузки с  $K_{CB} \leq 1,2$ .

Значение КСВ (обратных потерь) следует отсчитать по табло канала 1 индикатора минимум в трех характерных точках, соответствующие частоты отсчитываются по табло «М».

В процессе измерений следует снять осциллограммы частотной зависимости КСВ со стороны каждого плеча ДМ, нанести на них координатные оси, координаты точек измерения, указать выбранный масштаб.

Измерение коэффициента деления ДМ и развязки выходных плеч проводится в соответствии со структурной схемой рис. 2 (лабораторная работа № 1).

После подготовки к работе измеритель калибруется по включенному в схему аттенюатору с известным ослаблением ( $A = 10$  дБ).

При измерениях характеристик ДМ вместо аттенюатора между СВЧ-выходом ГКЧ и входом детекторной головки, соединенной со входом В индикатора, включается ДМ.

При измерениях коэффициентов деления плечо 1 ДМ подключается через переходы к выходу СВЧ-генератора, а плечо 2 (3) – к детекторной головке. Свободное плечо 3 (2) нагружается при этом согласованной нагрузкой  $K_{CB} \leq 1,2$ .

При измерении развязки плечо 2 (или 3) подключается к выходу СВЧ-генератора, а плечо 3 (или 2) к детекторной головке. Свободное плечо ДМ (1) нагружается согласованной нагрузкой ( $K_{CB} \leq 1,2$ ).

Значения коэффициентов деления и развязки в децибелах измеряются в характерных точках на трех частотах диапазона.

В процессе измерений следует снять осциллограммы частотных зависимостей измеряемых величин, нанести на них координатные оси, координаты точек измерения, указать выбранный масштаб.

В процессе работы следует зарисовать топологию исследуемых делителей мощности с указанием примерных размеров.

#### 4. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

цель работы;

эскизы топологий исследованных узлов;

краткое описание устройства (схемы) исследуемых узлов в соответствии с эскизами топологии;

определение основных измеряемых параметров;

осциллограммы измеренных частотных характеристик с указанием координатных осей, масштаба, значений измеренных величин в характерных точках;

анализ результатов измерений (анализ хода характеристик, заключение о рабочем диапазоне частот, сравнение полученных характеристик с ожидаемыми – теоретическими, возможные причины их расхождения и др.);

выводы по работе.

#### 5. Контрольные вопросы

1. Делители и сумматоры мощности, их назначение, примеры схем и топологии устройств в микрополосковом исполнении.

2. Устройство и принцип действия ДМ параллельного типа с равным и неравным делением мощности.

3. Устройство и принцип действия кольцевых одноступенчатых и двухступенчатых ДМ, сравнение их характеристик.

4. Основные параметры и характеристики ДМ.

5. Способы достижения необходимого согласования и развязки плеч ДМ.

6. Топология и принцип действия исследованных ДМ.

7. Анализ реальных измеренных характеристик ДМ, их сравнение с теоретическими.

8. Структурная схема измерителя при измерении КСВ и ослабления.

#### Литература

1. *Веселов Г. Н., Егоров Е. Н.* и др. Микроэлектронные устройства СВЧ: учеб. пособие/Под ред. Г. Н. Веселова. М.: Высш. шк., 1988. С. 68–75.

2. *Сазонов Д. М., Гридин А. Н., Мишустин Б. А.* Устройства СВЧ: учеб. пособие/Под ред. Д. М. Сазонова. М.: Высш. шк., 1981. С. 43–46, 104–110.

## Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОВОЛНОВЫХ ФИЛЬТРОВ

*Цель работы:* изучение принципа действия, конструкции параметров и частотных характеристик радиочастотных фильтров (Ф) дециметрового диапазона волн, выполненных в виде отдельных функциональных узлов на основе полосковых линий передачи и элементов с сосредоточенными и распределенными параметрами (наблюдение и измерение частотных характеристик фильтров проводятся с помощью панорамного измерителя КСВ и ослабления типа Р2-106).

#### 1. Общие сведения о радиочастотных фильтрах

Фильтрами СВЧ называют четырехполюсные микроволновые устройства, предназначенные для пропускания радиосигналов в заданной полосе частот – в «полосе пропускания» и подавления сигналов, частоты которых находятся вне этой полосы, т. е. в «полосе заграждения». Ослабление сигнала, проходящего через Ф, должно быть минимальным, а в полосе заграждения – больше некоторой заданной величины. Ослабление сигнала в полосе заграждения может осуществляться за счет его поглощения (теплового рассеяния), или за счет отражения со стороны входа Ф.

Частотные Ф используются для очистки спектра радиосигналов от ненужных, вредных частотных составляющих. Фильтры применяются в передатчиках, во входных цепях и гетеродинах приемников, в усилителях, в сумматорах и разделителях радиосигналов различных частот, в устройствах, обеспечивающих электромагнитную совместимость (ЭМС) различных радиоэлектронных средств. Устройства, подобные Ф по схеме и конструкции, применяются для широкополосного согласования сопротивлений в целях связи генераторов и усилителей с нагрузкой, для временной задержки сигналов.

По виду частотной характеристики затухания проходящих сигналов  $A = f(\omega)$  частотные фильтры разделяются на четыре группы:

фильтры нижних частот (ФНЧ);

фильтры верхних частот (ФВЧ);

полосно-пропускающие (полосовые) фильтры (ППФ);

полосно-заграждающие (режекторные) фильтры (ПЗФ).

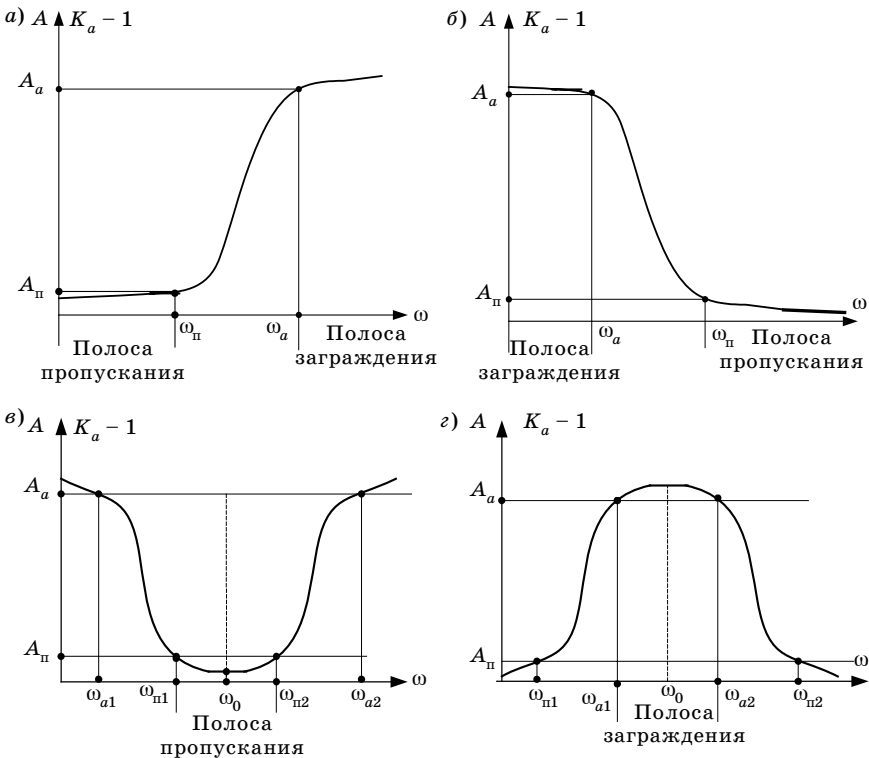
На рис. 1 в качестве примера приведены частотные характеристики соответствующих фильтров.

На этом рисунке и далее по тексту приняты следующие обозначения:  $\omega_{\text{п}}$  – частота пропускания;  $\omega_a$  – частота заграждения;  $\omega_0$  – центральная частота полосы пропускания для ППФ и полосы заграждения для ПЗФ;  $A_{\text{п}}$  – затухание на частоте пропускания;  $A_a$  – затухание на частоте заграждения.

Совокупность частот, на которых затухание  $A \leq A_{\text{п}}$  называется *полосой пропускания*.

Совокупность частот, на которых затухание  $A > A_a$ , называется *полосой заграждения*.

Чем круче идут наклонные участки характеристик между полосой пропускания и заграждения, тем совершеннее фильтр, однако такое качество достигается увеличением числа элементов и усложнением конструкции  $\Phi$ .



**Рис. 1.** Частотные характеристики ослабления фильтров: а – ФНЧ; б – ФВЧ; в – ППФ; г – ПЗФ

Основной характеристикой  $\Phi$  является частотная характеристика затухания  $A(\omega)$ , которая представляет собой логарифмическую меру коэффициента ослабления по мощности:

$$A(\omega) = 10 \lg K_a(\omega) = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{н}}} \right), \text{ дБ}, \quad (1)$$

где  $K_a(\omega)$  – частотнозависимый коэффициент ослабления по мощности;  $P_{\text{вх}}$  – мощность падающей волны на входе  $\Phi$ ;  $P_{\text{н}}$  – мощность, проходящая через  $\Phi$  в нагрузку.

Зависимость  $A(\omega)$  аналогична зависимости  $(K_a - 1) = f(\omega)$ . Обе эти функции показаны на рис. 1.

Фильтры разрабатываются (синтезируются) по заданной характеристике рабочего затухания  $A(\omega)$ .

Синтез  $\Phi$  предполагает выбор схемы  $\Phi$ , расчет параметров его элементов и разработку конструкции.

Исходной при синтезе  $\Phi$  принимают зависимость  $K_a(\omega)$ . Так как  $K_a(\omega) = \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{н}}} > 1$ , то эту функцию можно представить в виде

$$K_a(\omega) = 1 + [H(\omega)]^2, \quad (2)$$

где  $[H(\omega)]^2$  – некоторая всегда положительная функция частоты, аппроксимирующая частотную характеристику  $\Phi$ .

Существует универсальная методика синтеза для всех четырех видов  $\Phi$ , основанная на применении некоторой *единой модели*  $\Phi$ , пригодной для всего многообразия требований к численным значениям частот и затуханий.

В качестве единой модели, называемой «фильтром-прототипом» ( $\Phi$ -прототипом), используется условный ФНЧ с нормированными характеристиками, к которым относятся:

круговая частота, соответствующая частоте  $\omega_{\text{п}}$  реального фильтра, на которой задается максимальное затухание  $A_{\text{п}}$ , допустимое в полосе пропускания для данного  $\Phi$ . Эта условная частота принимается равной 1 рад/с;

выходное сопротивление генератора, питающего  $\Phi$ , и сопротивление нагрузки  $\Phi$ , которые принимаются равными 1 Ом.

В исходной формуле (2) в качестве функции  $H(\omega)$  используется некоторый полином  $n$ -й степени  $P_n(x)$ , который должен обладать определенными свойствами:

полином должен быть достаточно простым;

в интервале переменной  $x[0, 1]$ , в котором находятся корни полинома, его значение должно быть малым, не превышающим по модулю единицы;

за пределами этого интервала ( $x > 1$ ) полином должен круто возрастать по модулю.

Такой ход полинома обеспечивает нужную форму частотной характеристики  $\Phi$ -прототипа в полосе пропускания и в полосе заграждения.

Таким образом, частотная характеристика коэффициента ослабления по мощности  $K_a(\omega)$  для нормированного  $\Phi$ -прототипа нижних частот может быть представлена в виде

$$K(\omega) = 1 + [hP_n(x)]^2, \quad (3)$$

а частотная характеристика затухания

$$A(x) = 10 \lg(K(\omega)) = 10 \lg\{1 + [hP_n(x)]^2\}, \quad (4)$$

где  $x = \frac{\omega}{\omega_n}$  – нормированная частота пропускания  $\Phi$ -прототипа;

$h = \text{antilg}\left(\frac{A_n}{10}\right) - 1$  – нормирующий множитель, вычисляемый по допустимому уровню затухания ( $A_n$ ) в полосе пропускания;  $n$  – степень полинома, равная числу реактивных элементов  $\Phi$ .

Величина  $h^2 = \left(\left(\frac{A_n}{10}\right) - 1\right)$  – всегда положительна и является мерой неравномерности затухания в полосе пропускания.

В качестве полиномов  $P_n(x)$ , аппроксимирующих частотную характеристику ослабления, обычно используются полином Баттерворта

$$B_n(x) = x^n, \quad (5)$$

или полином Чебышева первого рода, который в тригонометрической форме записи имеет вид

$$T_n(x) = \begin{cases} \cos(n \arccos(x)) & \text{при } x \in [0..1]; \\ \text{ch}(n \text{ arch}(x)) & \text{при } x > 1. \end{cases} \quad (6)$$

Графически эти полиномы отражены на рис. 2.

При увеличении степени полинома  $n$  величина  $B_n(x)$  будет меньше отличаться от нуля в интервале  $x \in [0..1]$  и возрастать  $x > 1$ . Этот полином является монотонной функцией  $x$  и соответствует «максимально плоской» частотной характеристике ФНЧ:  $K(x) = 1 + h^2 x^{2n}$ .

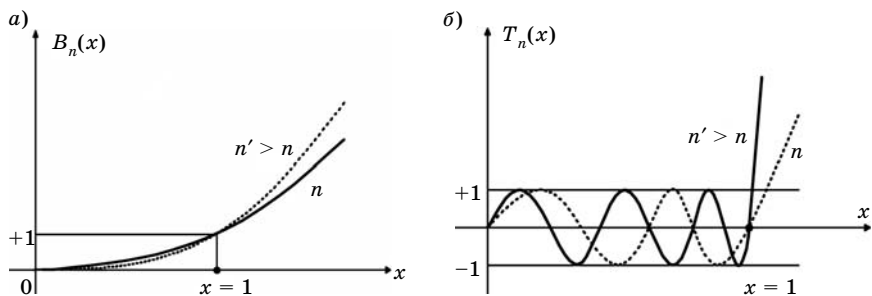


Рис. 2. Полиномы: а – Баттерворта, б – Чебышева

Полином  $T_n(x)$  осциллирует от 0 до  $\pm 1$  в интервале  $x[0...1]$ , а затем монотонно растет при  $x > 1$ . Количество осцилляций увеличивается с ростом  $n$ , одновременно возрастает крутизна характеристики при  $x > 1$ . Полином  $T_n(x)$  при  $x > 1$  растет быстрее, чем любой другой полином при равных степенях  $n$ . Соответствующая частотная характеристика называется «чебышевской»:

$$K(x) = 1 + h^2 T_n^2(x). \quad (7)$$

Таким образом, при одинаковой крутизне характеристик в интервале  $x > 1$  реальный «чебышевский» фильтр имеет меньшее число реактивных элементов  $n$ , чем «максимально плоский», однако он более чувствителен к отклонениям величин индуктивностей и емкостей элементов, образующих  $\Phi$ , от расчетных номиналов.

Схема реального ФНЧ с полиномиальной характеристикой называется «лестничной». Индуктивные элементы соединены в ней последовательно, а емкостные – параллельно (рис. 3, а, б). Варианты схемы отличаются количеством реактивных элементов, которое может быть четным или нечетным, при этом схема может начинаться с индуктивности либо с емкости. Предпочтительны схемы с нечетным  $n$ , так как при этом  $\Phi$  становится симметричным, а его частотные характеристики одинаковыми со стороны входа и выхода.

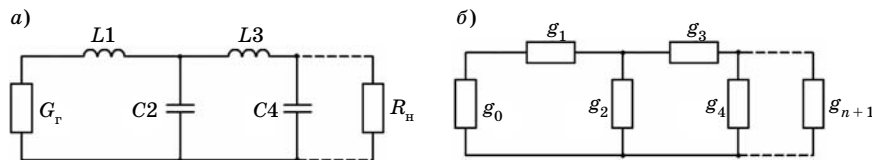


Рис. 3. Схемы фильтров: а – реального лестничного ФНЧ; б –  $\Phi$ -прототипа

Здесь приняты следующие обозначения:  $g_0$  – сопротивление генератора, если первый элемент схемы  $g_1$  – емкость;  $g_0$  – проводимость генератора, если  $g_1$  – индуктивность;  $g_{n+1}$  – сопротивление нагрузки, если последний элемент схемы  $g_n$  – емкость;  $g_{n+1}$  – проводимость нагрузки, если  $g_n$  – индуктивность.

Напомним, что для  $\Phi$ -прототипа проведена нормировка, при этом  $g_0 = g_{n+1} = 1$  и  $x = \frac{\omega}{\omega_{\Pi}} = 1$ .

Работу ФНЧ можно пояснить следующим образом. На низких частотах диапазона сопротивление последовательных индуктивных элементов  $X_{Li} = j\omega L_i$  мало, а сопротивление параллельных емкостных элементов  $X_{Ci} = 1/j\omega C_i$  – велико, поэтому почти все входное напряжение падает на емкостных элементах и передается на выход  $\Phi$  к нагрузке с малым ослаблением. По мере роста частоты входного сигнала  $\omega$  сопротивления  $X_{Li}$  растут, а  $X_{Ci}$  падают. Одновременно падает входное сопротивление звеньев лестничной схемы  $X_i = j\left(\omega L_i - \frac{1}{\omega C_i}\right)$ , образующих последовательные резонансные контуры. Это способствует росту тока через  $C_i$  и сохранению постоянства напряжения на емкостных элементах и на выходе  $\Phi$ . На частотах, превышающих частоту резонанса контуров  $L_i, C_i$ , сопротивление  $X_i$  начинает монотонно расти при дальнейшем уменьшении  $X_{Ci}$ . При этом напряжение на  $X_{Ci}$  и на нагрузке монотонно уменьшается т. е. увеличивается ослабление, вносимое  $\Phi$ . В результате, частотная характеристика соответствует изображенной на рис. 1, а.

Итак, синтез фильтра проводится на основе схемы  $\Phi$ -прототипа, представляющей ФНЧ с лестничной структурой и нормированными параметрами. Частотная характеристика затухания  $\Phi$  аппроксимируется при этом уравнением (4).

Первым шагом синтеза  $\Phi$  является выбор типа полинома  $P_n(x)$ , определяющего ход частотной характеристики  $\Phi$ .

Вторым шагом синтеза является определение необходимого числа реактивных элементов  $n$   $\Phi$ -прототипа исходя из максимальной допустимой величины затухания в полосе пропускания  $A_{\Pi}$ , заданного затухания в полосе заграждения  $A_a$ , а также из значения нормированной частоты  $x_a$ , соответствующей затуханию  $A_a$ .

Третий шаг синтеза – это нахождение значений параметров элементов  $\Phi$ -прототипа ( $g_i$ ).

Эти значения для применяемых полиномов и различных величин  $n$  вычислены, табулированы и содержатся в справочниках. Заметим, что при симметрии схемы  $\Phi$  выполняются соотношения:  $g_0 = g_{n+1} = 1$ ;  $g_1 = g_n$ ;  $g_2 = g_{n-1}$  и т. д.

Четвертым шагом является нахождение значений элементов схемы реального  $\Phi$  (ФНЧ, ППФ и др.) исходя из найденных значений  $g_i$  для  $\Phi$ -прототипа. Расчет производится по следующим формулам:

$$L_i = \frac{R_n g_i}{\omega_{\Pi}}; C_i = \frac{g_i}{R_n \omega_{\Pi}}. \quad (8)$$

Последним шагом синтеза микроволнового  $\Phi$  является его конструктивная разработка. Реализация последовательных индуктивностей и параллельных емкостей возможна на основе элементов с сосредоточенными параметрами ( $L_i, C_i$ ), либо на основе отрезков линий передачи, которые являются элементами с распределенными параметрами.

Элементы с сосредоточенными параметрами представляют собой навесные либо конструктивные конденсаторы и катушки индуктивности. Их размеры должны быть значительно меньше длины электромагнитной волны, а сопутствующие паразитные параметры возможно меньшей величины. Такие элементы могут работать в достаточно широкой полосе частот, однако их применение ограничено дециметровым диапазоном волн; на более коротких волнах используются элементы, выполненные на основе отрезков линий передачи.

Для примера на рис. 4 изображена топология ФНЧ, выполненного на элементах из отрезков микрополосковой линии (МПЛ) с разными волновыми сопротивлениями и малыми геометрическими размерами относительно длины волны. Такие элементы называют «полусосредоточенными».

Отметим, что волновое сопротивление отрезка МПЛ обычно не превышает 120...140 Ом и ограничивается технологически реализуемой минимальной шириной полоскового проводника (50...100 мкм). Минимальное волновое сопротивление МПЛ состав-

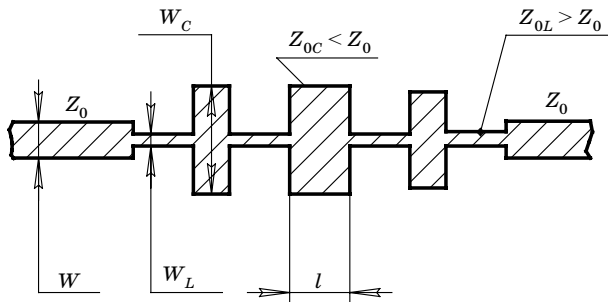


Рис. 4. Топология 7-элементного ФНЧ, выполненного на основе МПЛ

ляет 10...20 Ом и ограничивается возможным появлением волн вышних типов на участках с широким проводником.

Отрезки МПЛ увеличенной ширины ( $W_C$ ) с волновым сопротивлением  $Z_{0C} < Z_0$  эквивалентны параллельной емкости, величина которой

$$C_{\text{экв}} \cong 3,336l \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}C}} / Z_{0C}, \text{ пФ.} \quad (9)$$

Отрезки МПЛ малой ширины ( $W_L$ ) с волновым сопротивлением  $Z_{0L} > Z_0$  эквивалентны последовательным индуктивностям с величиной

$$L_{\text{экв}} \cong Z_{0L}l \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}L}} / 300, \text{ нГн.} \quad (10)$$

В приведенных формулах  $\varepsilon_{\text{эф}C}$  и  $\varepsilon_{\text{эф}L}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость материала подложки МПЛ на участках с емкостными и индуктивными элементами, а  $l$  – длина соответствующих участков. Приведенные формулы справедливы, если искомые длины отрезков МПЛ  $l < \left( \frac{\lambda}{10 \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}} \right)$ , что хорошо реализуется в дециметровом диапазоне волн.

На более коротких волнах, например в сантиметровом диапазоне, реактивные элементы могут быть реализованы в виде замкнутых или разомкнутых на конце отрезков МПЛ. Входное сопротивление таких отрезков находится из уравнений:

$$x_{\text{вх}} = jZ_0 \text{tg}\beta l \quad (\text{для короткозамкнутой ЛП}) \text{ или}$$

$$x_{\text{вх}} = -jZ_0 \text{ctg}\beta l \quad (\text{для разомкнутой на конце ЛП}).$$

Как видно, входное реактивное сопротивление знакопеременно и может быть емкостным либо индуктивным в зависимости от выбранной длины  $l$ , что позволяет применять такие отрезки ЛП в качестве частотнозависимых емкостных или индуктивных элементов. Отметим, что замкнутые или разомкнутые на концах отрезки ЛП длиной  $\lambda_l/4$  или  $\lambda_l/2$  эквивалентны параллельным или последовательным резонансным колебательным контурам и используются при синтезе ППФ и ПЗФ.

## 2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка предназначена для исследования частотных зависимостей КСВ и затухания исследуемых узлов в диапазоне 0,01...2,14 ГГц.

Основой установки является «Измеритель КСВ панорамный» типа Р2-106, в состав которого входят: генератор качающейся частоты, блок индикаторный и комплект СВЧ-узлов, содержащий датчик КСВ (направленный мост), детекторную головку, коаксиальные нагрузки и аттенюаторы, короткозамыкатель, переходники, соединительные кабели. Необходимые сведения о приборе Р2-106 содержатся в лабораторной работе № 1.

### 3. Проведение работы

#### 3.1. Исследуемые фильтры и измеряемые характеристики

Предлагается исследовать пять ФНЧ, выполненных на основе МПЛ. Один из Ф содержит полусосредоточенные реактивные элементы (см. рис. 4). Остальные выполнены на элементах с сосредоточенными параметрами (на основе миниатюрных катушек индуктивности и конденсаторов). Фильтры различны по количеству реактивных элементов (трех или семиэлементные) и обладают «чебышевской» либо «максимально плоской» частотной характеристикой. Все фильтры выполнены на диэлектрических платах, помещены в металлические корпуса и имеют по два коаксиальных присоединительных разъема гнездового типа.

Основными характеристиками фильтров являются частотные характеристики затухания проходящих сигналов  $A(\omega)$ . Исследуемым ФНЧ соответствует характеристика рис. 1, а. Здесь полоса пропускания нижних частот находится в пределах  $0 \dots \omega_{\text{п}}$ , а полоса заграждения верхних частот – выше частоты  $\omega_a$ . Частотный интервал  $\omega_{\text{п}} \dots \omega_a$  является переходным, его величина сокращается с увеличением числа реактивных элементов и зависит от выбора расчетного полинома.

Исследуемые фильтры являются отражающими.

Росту затухания  $A(\omega)$  соответствует рост мощности волны отраженной от входа Ф. поэтому частотные свойства Ф могут быть также описаны зависимостью КСВ или модуля коэффициента отражения ( $|\Gamma|$ ) от частоты. Напомним, что

$$A(\omega) = 10 \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{н}}}, \quad |\Gamma| = \frac{U_{\text{отр}}}{U_{\text{пад}}} = \sqrt{\frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{вх}}}}, \quad K_{\text{св}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}. \quad (11)$$

Понятно, что с ростом затухания  $A(\omega)$  величины  $|\Gamma|$  и  $K_{\text{св}}$  также возрастают.

В измерительной технике иногда пользуются понятием «обратное затухание», которое как и  $|\Gamma|$ , выражается через мощности падающей и отраженной волны

$$A_{\text{обр}} = 10 \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{отр}}}, \text{ дБ.} \quad (12)$$

В этом случае росту  $A_{\text{обр}}$  соответствует уменьшение  $P_{\text{отр}}$ ,  $|\Gamma|$  и  $K_{\text{св}}$ .

В данной работе измеряются характеристики обратного затухания фильтров  $A_{\text{обр}}(\omega)$ , при этом выход любого  $\Phi$  должен быть нагружен на согласованную нагрузку.

### 3.2. Измерение характеристик фильтров

**ВНИМАНИЕ!** Коаксиальные СВЧ-разъемы измерительной установки и разъемы  $\Phi$  имеют одинаковое волновое сопротивление  $Z_0 = 50 \text{ Ом}$ , однако различны по конструкции и диаметрам сопрягаемых проводников. Разъемы, установленные на  $\Phi$ , гнездового типа. *Соединять можно только конструктивно сопрягаемые разъемы*, один из которых должен быть гнездового, а другой штыревого типа. Для несопрягаемых разъемов следует применять «переходы». Во избежание поломки соединять разъемы следует аккуратно. При монтаже схемы и работе с установкой недопустимы крутые изгибы соединительных кабелей.

Перед проведением эксперимента следует подготовить к работе прибор Р2-106 (см. п. 2.1 лабораторной работы № 1).

Значение нижней частоты диапазона следует установить  $f_1 = 0,1 \text{ ГГц}$ , а верхней частоты  $f_2 = 1,5 \text{ ГГц}$ . В процессе исследований рабочий диапазон может быть изменен.

В работе измеряются частотные характеристики обратных потерь  $A_{\text{обр}}(\omega)$  и затухания фильтров  $A(\omega)$ .

Измерение обратного затухания (так же как при измерениях КСВ) проводится после предварительной калибровки прибора в режиме холостого хода и короткого замыкания (см. структурную схему – рис. 1 лабораторной работы № 1). Один из разъемов  $\Phi$  определяется как входной и подключается к разьему  $Z_x$  датчика КСВ (направленного моста), низкочастотный выход которого соединяется коаксиальным кабелем со входом  $A$  блока индикатора. Второй разъем  $\Phi$  – выходной, нагружается на согласованную нагрузку с  $K_{\text{св}} \leq 1,2$ . Характеристика обратных потерь наблюдается на экране индикатора. Конкретные значения  $A_{\text{обр}}(\omega)$  отсчитываются по табло канала 1 для ха-

рактерных значений частоты ( $\omega_p$ ,  $\omega_a$  и др.). Соответствующие частоты отсчитываются по табло «М». В процессе измерений следует снять осциллограммы зависимости  $A_{\text{обр}}(\omega)$ , нанести на них координатные оси, координаты точек измерения, указать выбранный масштаб.

Измерение ослабления  $\Phi$  проводится в соответствии со структурной схемой рис. 2 лабораторной работы № 1. Подготовленный к работе измеритель калибруется с помощью коаксиального аттенюатора с известным ослаблением  $A = 10$  дБ.

Перед измерениями  $A(\omega)$  вместо калибровочного аттенюатора включается исследуемый  $\Phi$ , который будет находиться между СВЧ-выходом ГКЧ и входом детекторной головки, соединенной со входом  $B$  индикатора.

Полученное изображение характеристики  $A(\omega)$  следует оформить в виде осциллограммы, на которую наносятся координатные оси, координаты характерных точек измерения, т. е. значения  $A(\omega)$  и  $\omega$ , а также указывается выбранный масштаб.

#### 4. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- краткое описание исследуемых фильтров;
- определение основных измеряемых параметров, характеристик;
- осциллограммы измеренных частотных характеристик с указанием координатных осей, масштаба, значений измеренных величин в характерных точках;
- анализ результатов измерений (анализ хода характеристик, их сравнение для различных  $\Phi$  и объяснение их хода, сравнение измеренных и ожидаемых теоретических характеристик);
- выводы по работе.

#### 5. Контрольные вопросы

1. Частотные фильтры, их назначение, применение.
2. Классификация фильтров по виду частотной характеристики, особые частотные точки на характеристиках, обозначение их координат.
3. Содержание синтеза фильтров.
4. Понятие о «фильтре-прототипе», его условные нормированные характеристики.

5. Полиномы, используемые при синтезе фильтров, свойства полиномов, различия в характеристиках синтезируемых фильтров.
6. Лестничная схема реального ФНЧ и Ф-прототипа.
7. Принцип действия ФНЧ.
8. Способы реализации фильтров. Фильтры на элементах с сосредоточенными, полусосредоточенными и распределенными параметрами.
9. Исследуемые фильтры и их характеристики.
10. Методика измерений частотных характеристик фильтров.
11. Полученные результаты, осциллограммы, их сравнение, анализ.

### **Литература**

1. *Веселов Г. Н., Егоров Е. Н.* и др. Микроэлектронные устройства СВЧ: учеб. пособие/Под ред. Г. Н. Веселова, М.: Высш. шк., 1988. С. 87–101.
2. *Сазонов Д. М., Гридин А. Н., Мишустин Б. А.* Устройства СВЧ: Учеб. пособие/Под ред. Д. М. Сазонова. М. : Высш. шк., 1981. С. 160–178.
3. *Калашиников В. С., Негурей А. В.* и др. Расчет параметров пассивных узлов СВЧ методами теории цепей: учеб. пособие/ГУАП. СПб., 1999. С. 38–54.
4. *Калашиников В. С., Негурей А. В.* Проектирование миниатюрных устройств СВЧ: метод. указ. к курсовому проектированию/ЛИАП. СПб., 1992. С. 27–43.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
Подготовка к работе .....	4
Лабораторная работа № 1. ИЗМЕРИТЕЛЬ КСВ ПАНОРАМНЫЙ ТИПА P2-106 .....	7
1. Общие сведения о панорамном измерителе КСВ типа P2-106 ...	7
1.1. Основные технические данные прибора типа P2-106 .....	7
1.2. Принцип действия .....	8
1.3. Генератор качающейся частоты .....	9
1.4. Блок индикаторный .....	12
1.5. Комплект СВЧ-узлов .....	15
2. Порядок проведения работы .....	17
2.1. Подготовка к измерениям .....	17
2.2. Проведение измерений .....	19
3. Содержание отчета .....	21
4. Контрольные вопросы .....	22
Литература .....	23
Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОСКОВОГО НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ .....	24
1. Общие сведения о направленных ответвителях .....	24
2. Описание лабораторной установки .....	30
3. Проведение работы .....	31
3.1. Исследуемый направленный ответвитель и измеряемые характеристики .....	31
3.2. Основные радиотехнические параметры НО .....	32
3.3. Измерение характеристик НО .....	33
4. Содержание отчета .....	34
5. Контрольные вопросы .....	34
Литература .....	35
Лабораторная работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОСКОВЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ .....	36
1. Общие сведения о делителях и сумматорах мощности .....	36
2. Описание лабораторной установки .....	42
3. Проведение работы .....	43
3.1. Исследуемые делители мощности и измеряемые характе- ристики .....	43
3.2. Измерение характеристик ДМ .....	44
4. Содержание отчета .....	45
5. Контрольные вопросы .....	46
Литература .....	46

Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОВОЛНОВЫХ ФИЛЬТРОВ .....	47
1. Общие сведения о радиочастотных фильтрах .....	47
2. Описание лабораторной установки .....	54
3. Проведение работы .....	55
3.1. Исследуемые фильтры и измеряемые характеристики ....	55
3.2. Измерение характеристик фильтров .....	56
4. Содержание отчета .....	57
5. Контрольные вопросы .....	57
Литература .....	58