

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
“Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”  
им. В.И.Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)

**Кафедра теоретических основ радиотехники**

---

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторных работ по дисциплине

**“ИЗМЕРЕНИЯ НА СВЧ”**

**А.А.Данилин**

для подготовки бакалавров по направлению  
код 210300 - «Радиотехника»

Санкт-Петербург

2011 г.

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

ОГЛАВЛЕНИЕ.....	2
1. АВТОМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР ПАРАМЕТРОВ СВЧ ЦЕПЕЙ AGILENT E5062a .....	3
2. ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛАНСНОГО СВЧ СМЕСИТЕЛЯ.....	62
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ СВЧ АТТЕНЮА- ТОРОВ НА P-I-N ДИОДАХ.....	83
4. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КСВ И ОСЛАБЛЕНИЯ ПАНОРАМНЫМ АНАЛИЗАТОРОМ Р2-61.....	90
5. ИЗМЕРЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАЧИ СВЧ УСТРОЙСТВ ПРИБОРОМ Р4-11 (Р4-23).....	100
6. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ СВЧ СИГНАЛОВ ПАНОРАМНЫМ АНА- ЛИЗАТОРОМ С4-27.....	108
7. ИЗМЕРЕНИЕ АЧХ СВЧ УСТРОЙСТВ МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ ПРИ- БОРОМ Р2-78.....	128
8. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ СВЧ СИГНАЛОВ МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ ЭЛЕКТРОННО-СЧЕТНЫМ ЧАСТОТОМЕРОМ Ч3-66.....	140
9. ИЗМЕРЕНИЕ МОДУЛЯ И ФАЗЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАЧИ СВЧ УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ФК2-18.....	157
Список литературы.....	168

# 1. АВТОМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР ПАРАМЕТРОВ СВЧ ЦЕПЕЙ AGILENT E5062a

В цикле лабораторных работ изучаются устройство и принцип действия автоматического анализатора СВЧ цепей E5062A серии ENA-L (производитель Agilent Technologies).

Анализаторы цепей серии ENA-L (E5061A- E5062A) обладают базовыми функциональными возможностями по анализу цепей для широкого круга применений в различных отраслях, таких как беспроводные средства связи, кабельное ТВ, автомобильная промышленность, образование и многое другое. Приборы данной серии имеют все необходимые параметры и функции для исследования и разработок и испытаний СВЧ устройств, таких как фильтры, усилители, антенны, кабели и распределительные устройства кабельного ТВ.

## **1.1.Структурная схема и принцип действия анализатора E5061A**

В цикле лабораторных работ исследуется автоматизированный анализатор цепей фирмы Agilent E5062A. Внешний вид анализатора приведен на рис.1.1

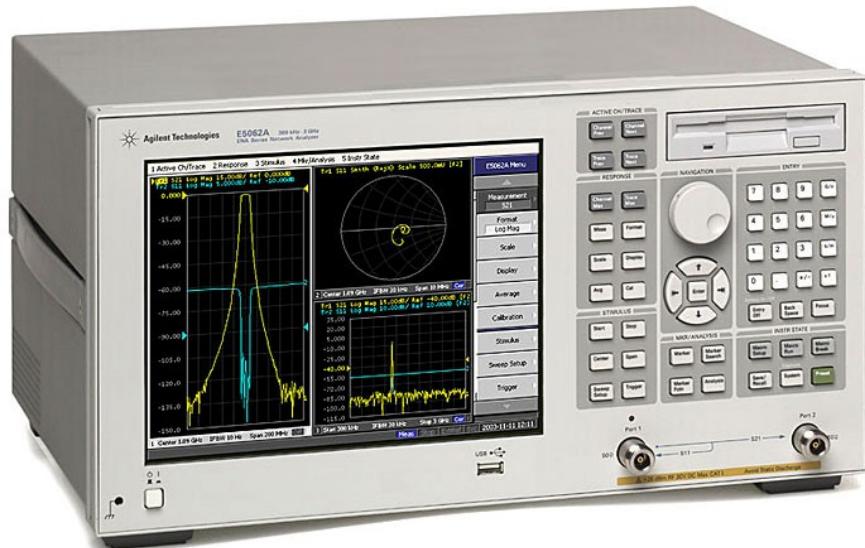


Рис. 1.1. Внешний вид анализатора E5062A

Основное назначение анализатора – измерение комплексных коэффициентов отражения или передачи СВЧ устройств со стандартными портами ввода/вывода (измерительный блок типа Т/R – Transmit/Reflect). Для получения полной матрицы рассеяния двухпортового устройства используют переключение направления прохождения сигнала путем смены входа и выхода исследуемого объекта.

Отличительные свойства приборов серии ENA-L:

1. Диапазон рабочих частот: E5061A от 300 кГц до 1,5 ГГц, E5062A от 300 кГц до 3 ГГц
2. Импеданс порта 50 или 75 Ом
3. Выходная мощность порта источника от -5 до 10 дБм (от -45 до 10 дБм в варианте с расширенным диапазоном мощности)
4. Динамический диапазон 115 дБ (при полосе УПЧ 10 Гц)
5. Зашумленность графика 0,005- 0,01 дБ
6. Типы свиппирования линейный, логарифмический, сегментированный
7. Экран 10,4-дюймовый цветной, ЖК-индикатор, есть вариант комплектации прибора с сенсорным экраном
8. Поддержка блока электронной калибровки ECal
9. Прибор имеет 4 независимые измерительные канала, число точек измерения от 2 до 1601

Структурная схема СВЧ тракта прибора представлена на рис.1.2.

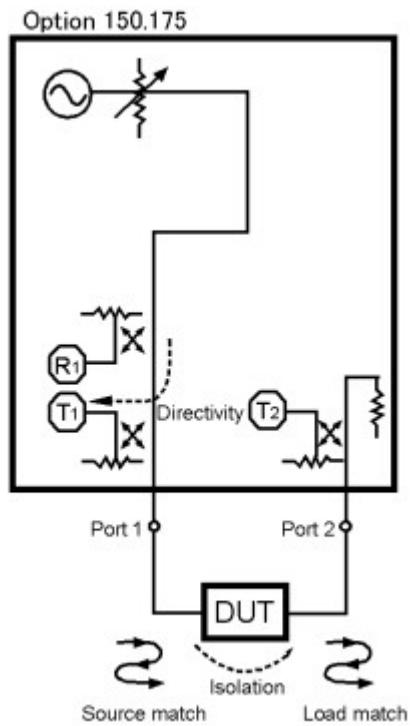


Рис. 1.2. Структурная схема СВЧ блока анализатора в режиме измерения коэффициента передачи и отражения

Она включает три направленных ответвителя для выделения сигналов падающей волны (R –reference channel), отраженной волны (T1 – test channel 1) и проходящей волны (T2 – test channel 2). Прибор имеет два измерительных порта со стандартными коаксиальными разъемами N типа. Port1 - порт источника (генератора СВЧ) и Port2 - порт нагрузки, куда подключается выход исследуемого устройства (обозначенного DUT – device under test).

Выделенные сигналы, пропорциональные падающей и отраженной (проходящей) волнам, поступают на преобразователи частоты приемника измерительного блока (рис.1.3).

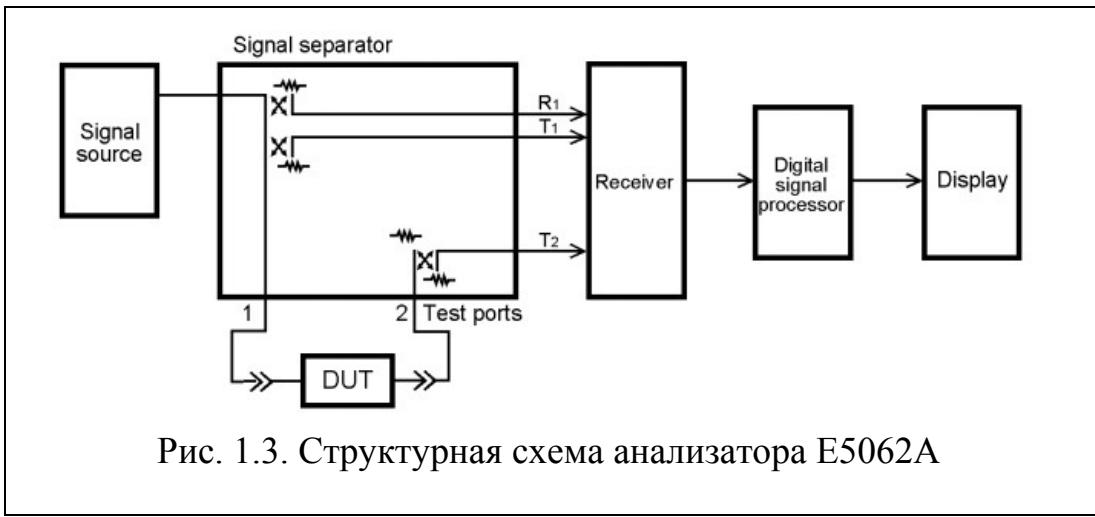


Рис. 1.3. Структурная схема анализатора Е5062А

В дальнейшем измерения отношения комплексных амплитуд производится на низких частотах. Результаты измерения обрабатываются цифровым сигнальным процессором (специализированным персональным компьютером), включающим в себя АЦП, микропроцессорную систему с тактовой частотой 533 МГц, жесткий диск объемом 80 Гб и др.

Программная часть прибора работает в среде Windows 2000, что позволяет использовать разнообразное стандартное программное обеспечение, работать с такими устройствами как мышь и клавиатура, принтер, применять дополнительный видеомонитор, USB флэш-диски и стандартный флооппидисковод. Возможно включение прибора в компьютерную сеть (LAN), для чего предусмотрен встроенный Ethernet - адаптер.

Управление прибором производят либо с помощью кнопочного табло, либо командами экранного меню. Предусмотрен способ управления прибором из программ, написанных на языке Visual BASIC for Application (VBA).

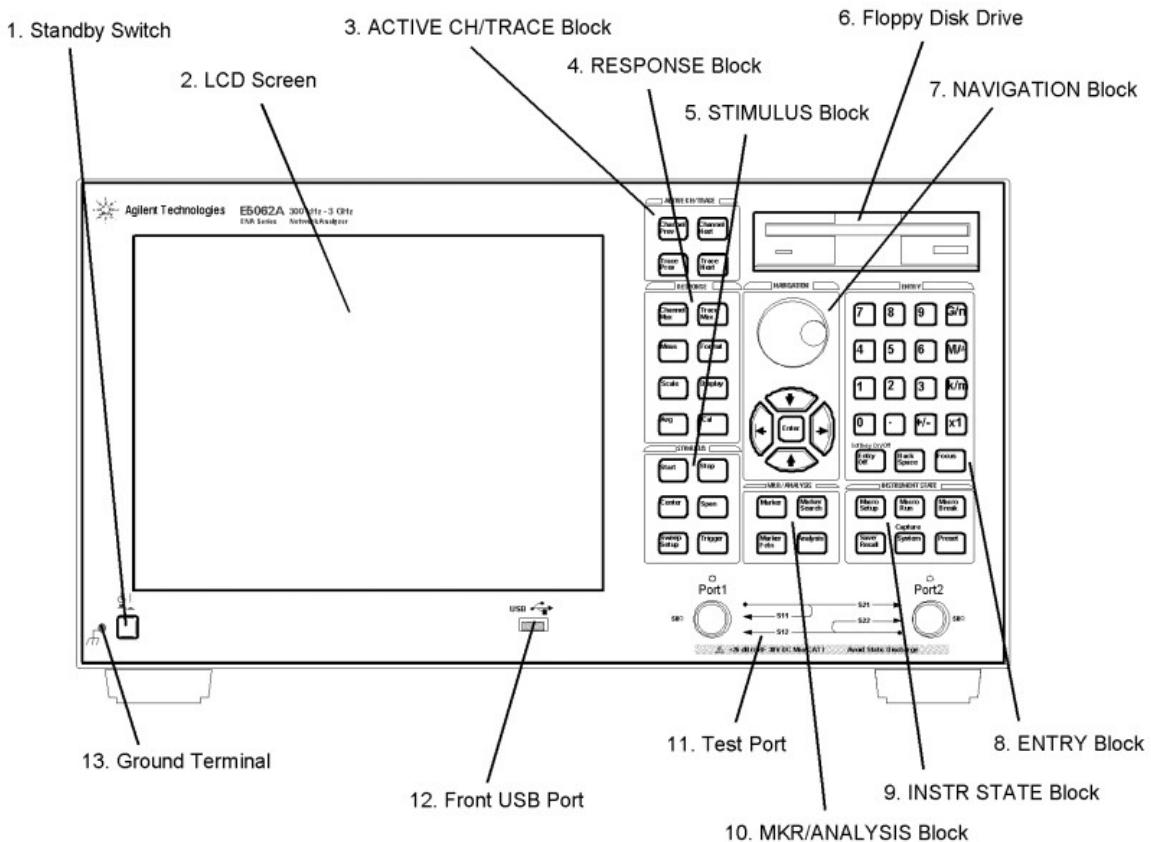


Рис. 1.4. Органы управления передней панели анализатора

На рис .1.4 представлен вид передней панели прибора. Кнопочные элементы управления разделены на блоки, соответствующие их функциональному назначению. Это блок активных каналов и графиков (ACTIVE CH/TRACE Block), блок измерения реакции цепи (RESPONSE Block), блок управления источником сигнала (STIMULUS Block). Кроме этого, предусмотрен блок навигации по меню и плавной установке параметров (NAVIGATION Block), блок установки режима прибора (INSTR STATE Block) и блок управления маркерами и анализа результатов (MKR/ANALYSIS Block). Для ввода числовых параметров предусмотрен блок цифровых клавиш (ENTRY Block). Он содержит также клавиши ввода размерности параметра (для безразмерных используется кнопка x1).

Кнопочные элементы управления дублируют соответствующие команды экранного меню (Menu bar) и программируемых экранных клавиш (Softkey menu bar) – см. рис. 5.

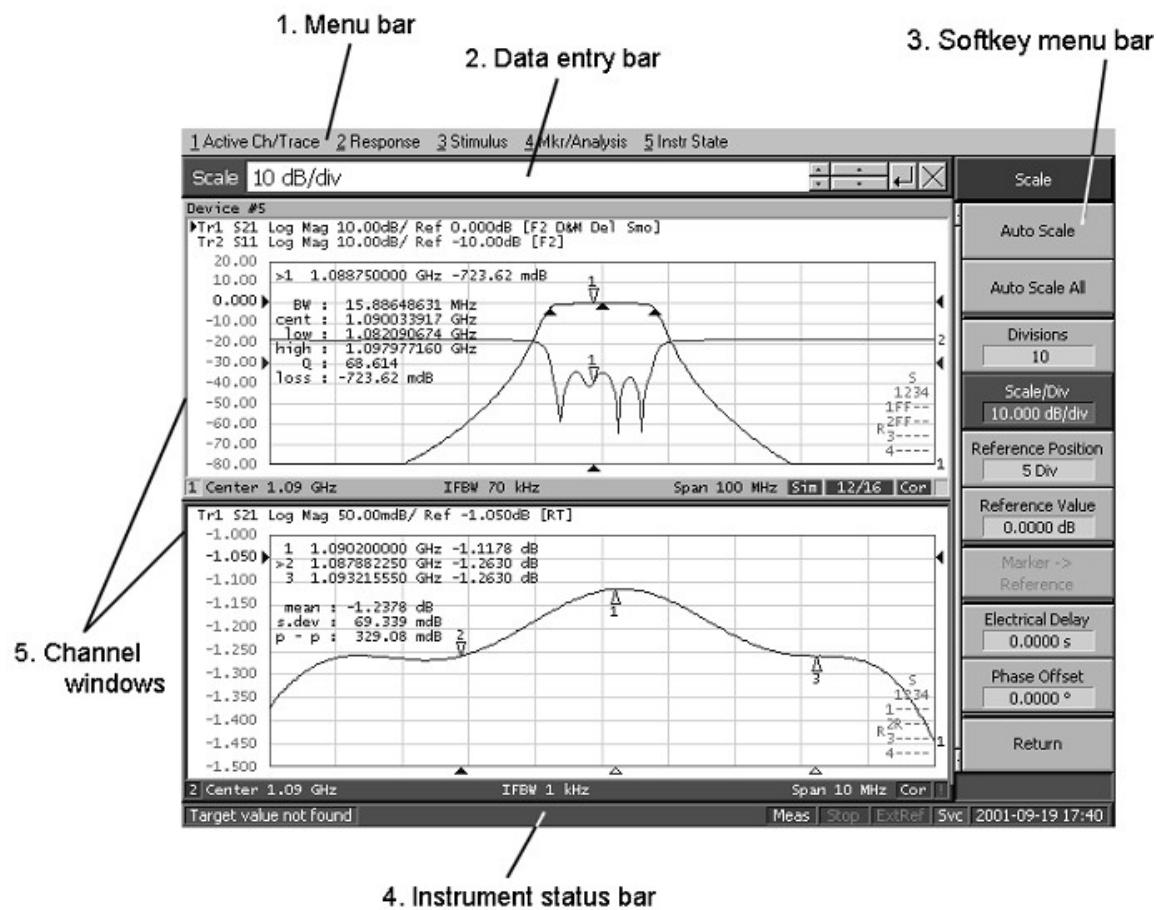


Рис. 1.5. Вид экрана анализатора цепей в двухканальном режиме измерения

Вид типичного экрана анализатора представлен на рис. 1.5. Сверху расположена строка меню (menu bar). Меню в строке соответствует блокам кнопок передней панели, а их подменю – кнопкам в этих блоках.

Строка ввода (Data entry bar) предназначена для набора числовых данных с помощью внешней или встроенной клавиатуры или мыши. Страна содержит кнопки пошагового изменения вводимого параметра, кнопку ввода и кнопку закрытия.

Строка состояния прибора (Instrument status bar) отображает приборные сообщения и предупреждения, индикатор отключения обновления экрана, отключения ВЧ выхода, состояние измерения и др. Состояние прибора может быть следующим:

- Setup – происходит процесс установки параметров измерения;
- Hold – Измерение приостановлено;
- Init – происходит инициализация измерения;
- Man – ручной запуск прибора оператором;
- Ext - внешний запуск прибора
- Bus – запуск прибора по шине интерфейса;
- Meas – режим проведения измерений.

Колонка программируемых клавиш (Softkey menu bar) - это основной орган управления прибором. Колонка имеет иерархическую структуру. Клавиши могут содержать подменю, на что указывает треугольная стрелка справа от названия. Программируемые клавиши переключаются нажатием мыши или клавишами блока навигации. Для расширения экрана можно колонку убрать – это делается нажатием кнопки Entry Off.

Окна каналов предназначены для отображения графиков. Активный канал – это окно прибора, в котором можно независимо устанавливать такие параметры, как диапазон качания частоты, масштаб измерения и пр. Окно активного канала выделяется серым цветом обрамления. Переход от окна к окну делается щелчком мыши или клавишами CHANNEL NEXT, CHANNEL PREV. Внутри окна располагаются графики, таблицы численных значений, оцифровка масштабной сетки, маркеры и их данные и пр. Внизу окна располагается строка состояния канала (номер канала, диапазон свиппирования частоты, полоса ПЧ). Состояние измерения в канале индицируется в строке состояния так: !- идет процесс измерения, # - недостоверные данные (например условия измерения были изменены, а графики еще не обновлены).

На задней панели прибора установлены разъемы портов (параллельного LPT для подключения принтера, портов USB, клавиатуры и мыши, внешнего видеомонитора. Предусмотрен интерфейс GPIB и Ethernet (LAN), разъем внешнего запуска прибора (Ext Trig), ввод и вывод внешнего и внутреннего опорных сигналов (Ref In, Ref Out).

## **1.2. Технические параметры анализатора и его функциональные возможности**

Основные технические параметры анализатора цепей СВЧ Е5062А (вариант исполнения - опция 150 – режим измерения Т/R в тракте 50 Ом) приведены в таблице 1.

<b>ХАРАКТЕРИСТИКИ</b>	<b>ПАРАМЕТРЫ</b>	<b>ЗНАЧЕНИЯ</b>
ВЫХОД ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПОРТА (ИСТОЧНИК)	Диапазон частот Разрешающая способность по частоте Нестабильность генератора	300 кГц - 3 ГГц 1 Гц $\pm 5 \cdot 10^{-6}$
	Выходная мощность Погрешность установки уровня Разрешающая способность по уровню	-5 ... 10 dBm $\pm 1.0$ dB (на уровне 0 dBm) 0,05 дБ
	Уровень 2 и 3 гармоник	< -25 dBc (на 5 dBm)
ВХОД ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПОРТА (ПРИЕМНИК)	Максимальная измеряемая мощность Развязка каналов	10 дБм -100 дБ
	Уровень шума на графике при полосе ПЧ 3 кГц Температурная нестабильность амплитуды	0.005 дБ 0.01 дБ/град
	Температурная нестабильность фазы	0.1 град/град
ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ	Диапазон установки полос ПЧ Динамический диапазон прибора в целом Входной и выходной импеданс	10 Гц ... 30 кГц 90 dB при полосе ПЧ 3 кГц, 115 dB при полосе ПЧ 10 Гц 50 Ом, N разъемы
	Экран дисплея	10,4 дюйма, VGA 640 x 480
	Примерное время измерения	98 мс для 51 точки, 322 мс для 1601 точки
	Количество точек измерения	От 2 до 1601
	Время пересылки данных по интерфейсам (1601 точка)	GPIB – 1522 мс, LAN – 127 мс,

Прибор имеет расширенные функциональные возможности для выполнения измерений и обеспечивает:

- Работу 4-х независимых измерительных канала с отдельной установкой параметров зондирующего сигнала и режима работы приемника; каждому каналу соответствует экранное окно, в котором может отображаться до 4 графиков данных измерения и до 4-х графиков данных памяти;
- Различные форматы представления данных – линейный и логарифмический модуль, фаза в пределах  $360^\circ$ , расширенная фаза, групповое время запаздывания (ГВЗ), КСВН, круговая диаграмма, вещественная и мнимая части импедансов и адmittансов, параметров рассеяния. Предусмотрена возможность преобразования S-параметров в эквивалентные сопротивления и проводимости отражения и передачи;
- Измерения с использованием экранных маркеров (до 10 маркеров на каждый график). Они позволяют выводить численные значения интересующих точек графиков, производить поиск максимума, минимума, пиков, полосы пропускания и пр.
- Несколько режимов свиппирования по частоте: линейный, логарифмический (для широкополосных устройств), сегментированный – исследование отдельных фрагментов АЧХ (до 201 сегмента), что позволяет уменьшить общее время анализа АЧХ. Для анализа активных устройств можно использовать режим свиппирования по мощности на фиксированной частоте. Запуск свиппирования может быть непрерывный, ждущий и одиночный с ручным или внешним запуском.
- Обработка результатов измерений позволяет запомнить данные в памяти прибора и производить векторное сложение, вычитание, умножение и деление комплексных измеренных значений и данных памяти, автомасштабирование графиков на экране, вычисление среднего и максимального значений, СКО, размах данных.

Повышение точности измерений достигается различными типами калибровки. Для упрощения этой процедуры можно использовать дополнительный внешний блок электронной калибровки ECal, управляемый через порт USB на передней панели прибора.

Запоминание состояния прибора, результатов калибровки и измеренных данных производят на жестком диске прибора. Он может быть доступен в локальной сети в виде сетевого диска, что позволяет осуществить доступ с внешнего компьютера. Возможно сохранение данных на гибком флоппи-диске прибора, а также прямая распечатка данных измерения на принтере, подключенному к портам USB или LPT.

### **1.3. Установка режимов работы прибора и проведение измерений**

- *Установка числа каналов и графиков.*

Первым шагом при работе с прибором является установка количества каналов и вида выводимой информации (расположение графиков). В приборе Agilent E5062A можно использовать от 1 до 4-х каналов. По умолчанию отображается только один канал. Для увеличения количества отображаемых каналов необходимо:

1. Нажать **Display**
2. Нажать **Allocate Channels** и выбрать из списка способ отображения каналов

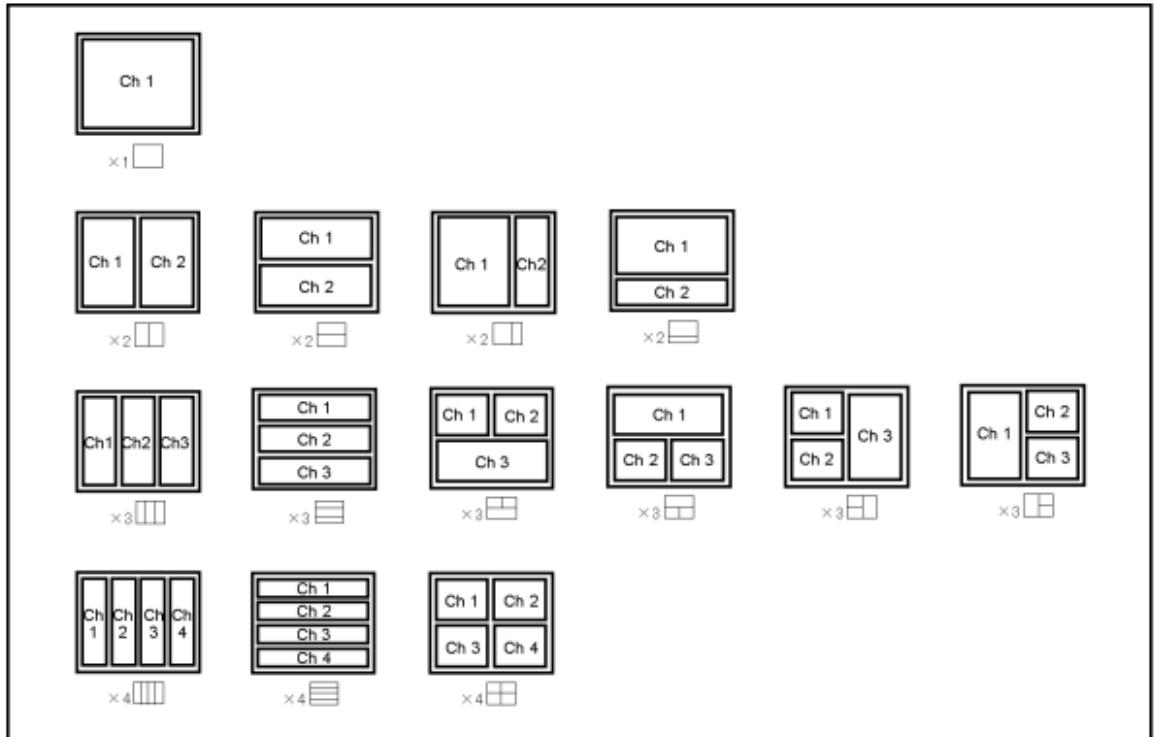


Рис. 1.6. Возможные шаблоны расположения окон каналов

Внимание: На дополнительных каналах при их создании по умолчанию стоит однократная развертка (значок # в правом нижнем углу экрана канала). Для проведения измерений, необходимо изменить режим развертки – установить непрерывный запуск (Continuous) (см. режимы запуска каналов)

Для переключения между каналами можно пользоваться клавишами на лицевой панели прибора **Channel Next** (следующий канал), **Channel Prev** (предыдущий канал), кнопками экранного меню или щелчком правой кнопки мыши на окне требуемого канала.

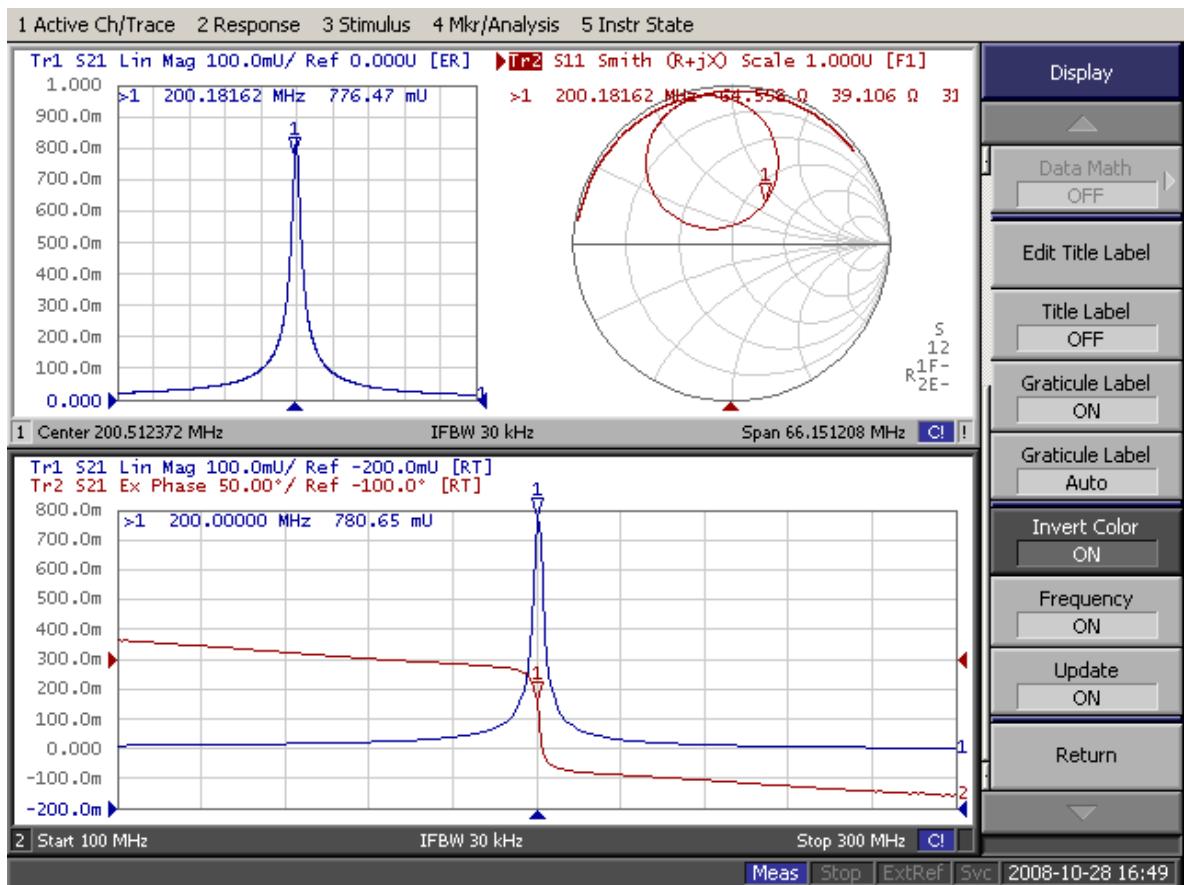


Рис. 1.7. Отображение на экране 2-х каналов: в первом два графика отдельно, во втором – два графика совмещены.

В каждом канале имеется возможность отображения до 4-х графиков, которые можно накладывать друг на друга, либо выводить в отдельной рамке. Это удобно использовать для просмотра сразу нескольких характеристик исследуемого элемента. Для выбора количества отображаемых графиков в активном канале необходимо:

- Нажать **Display**
- Нажать **Number of Traces**
- Нажать требуемую цифровую клавишу 1...4

Установка расположения рамок графиков производится аналогично каналам:

- Нажать **Display**
- Нажать **Allocate Traces**
- Выбрать из списка способ отображения графиков.

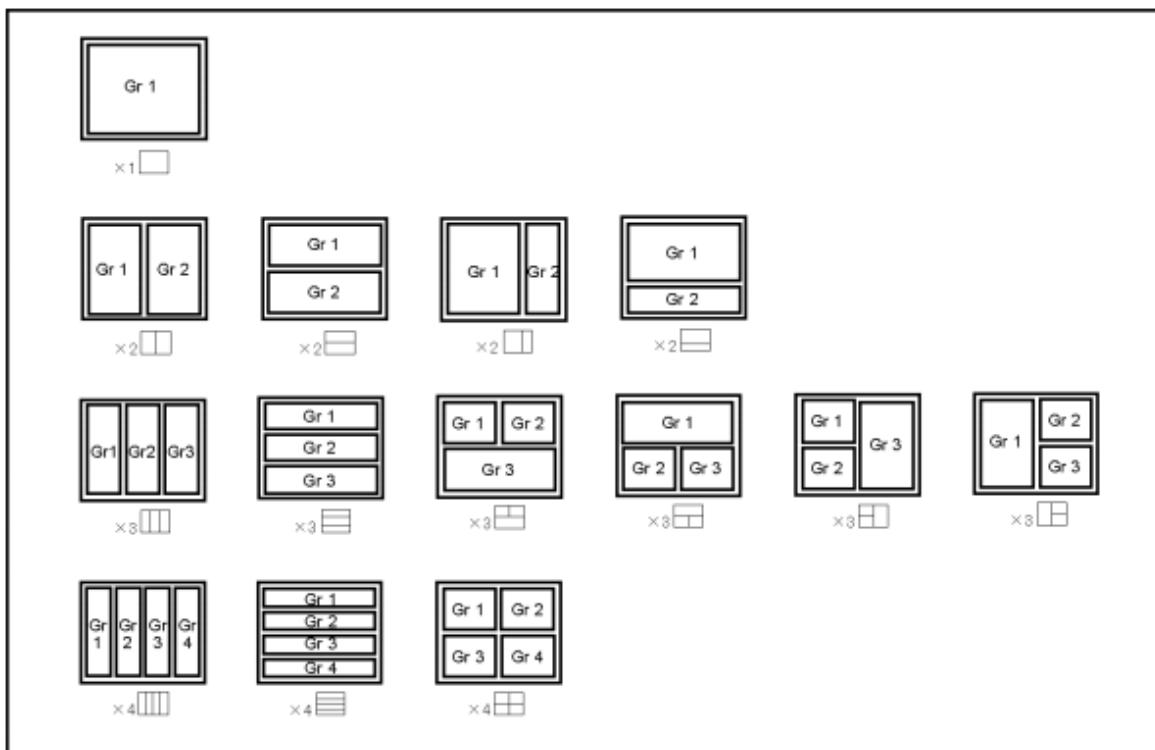


Рис. 1.8. Возможные шаблоны расположения графиков в окне канала

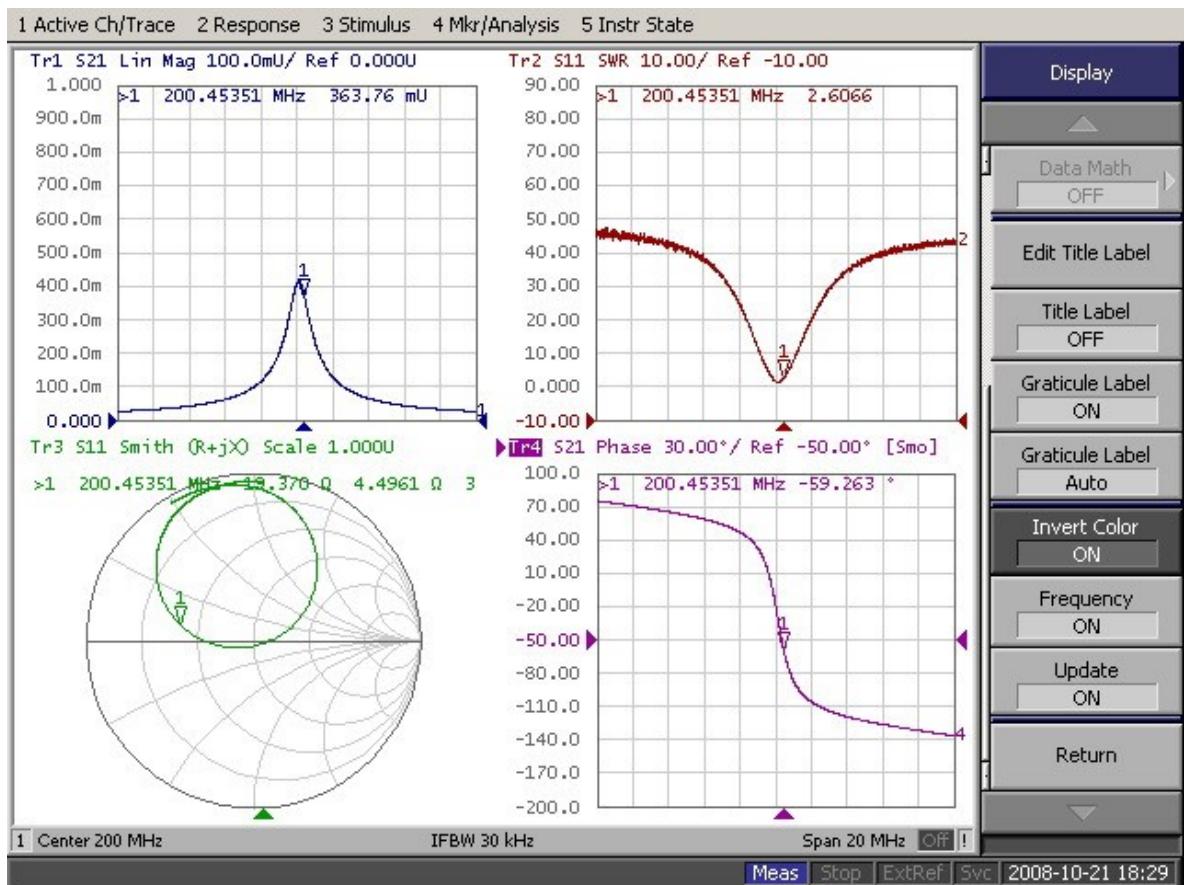


Рис. 1.9. Отображение в окне одного канала отдельно 4-х графиков

- *Режимы (параметры) каналов*

Параметры в каждом из каналов устанавливаются независимо. Они являются общими для всех графиков канала: диапазон свиппирования, мощность генератора, число частотных точек, режим свиппирования, полоса ПЧ, калибровка, режим запуска.

Установка частотного диапазона:

- Нажать **Display**
- Нажать **Frequency**

Установить частотный диапазон можно несколькими способами:

- Ввести клавишами **Start** и **Stop** и цифровыми клавишами начальную и конечную частоту диапазона.
- Нажать клавишу **Center** и цифровыми клавишами ввести значение центральной частоты.
- Клавишей **Span**+цифровые клавиши можно устанавливать ширину

диапазона относительно центральной частоты.

- Установка диапазона качания с помощью маркеров. Для этого необходимо:

1. В окне канала, в котором должен быть изменён диапазон, поместить

активный маркер на активном графике в положение, соответствующее нижнему, верхнему или центральному значению нового диапазона частот.

2. Нажать клавишу **Marker Fctn.**

3. Выбрать программируемую клавишу:

**Marker —> Start** Присваивает нижнему значению диапазона значение частоты в точке маркера.

**Marker —> Stop** Присваивает верхнему значению диапазона значение частоты в точке маркера.

**Marker —> Center** Присваивает центральному значению диапазона значение частоты в точке маркера на текущем активном графике.

Частотный диапазон измерения, как правило, должен совпадать с частотным диапазоном калибровки. При расширении частотного диапазона измерения относительно диапазона калибровки, прибор автоматически проведёт интерполяцию калибровочных данных. Это позволит провести измерения, но приведёт к некоторому увеличению их погрешности. Область калибровки при этом отмечается жёлтым квадратом, а в правом нижнем углу загорается значок ?.

#### Установка количества точек:

Увеличение числа точек ведёт к уменьшению погрешности дискретности, но уменьшает скорость измерения, при которой не наблюдается динамических искажений. Число точек устанавливается в пределах 2...1601, при

этом автоматически меняется и время измерения (если установлен режим Sweep Time – AUTO).

Для изменения числа точек необходимо:

- Выбрать канал
- Нажать Sweep Setup
- Нажать Points
- Используя цифровые клавиши, ввести нужное число точек

Установки режима свиппирования:

В приборе имеется возможность выбора одного из 4-х установленных типов свиппирования генератора:

Тип свиппирования	Пояснение
Linear	Свиппирование по частоте в линейном масштабе
Log	Свиппирование по частоте в логарифмическом масштабе
Segment	Свиппирование по частотным сегментам
Power	Свиппирование по уровню мощности в линейном масштабе на фиксированной частоте

Для установки режима свиппирования:

- Нажать Sweep Setup
- Нажать Sweep Type
- Выбрать необходимый тип свиппирования

Установка времени свиппирования (время анализа):

Предусмотрено два режима установки времени свиппирования: ручной и автоматический.

В *ручном* режиме, время свиппирования устанавливается с цифрового блока на лицевой панели прибора. Для установки времени свиппирования необходимо:

- Выбрать активный канал
- Нажать Sweep Setup
- Нажать Sweep Time
- Ввести время свиппирования в секундах

В автоматическом режиме прибор самостоятельно выбирает наименьшее время, соответствующее текущим параметрам измерения. В автоматическом режиме имеется возможность установки задержки начала измерения относительно момента запуска свиппирования (рис. 1.10). Это время может быть использовано на подготовку объекта исследования.

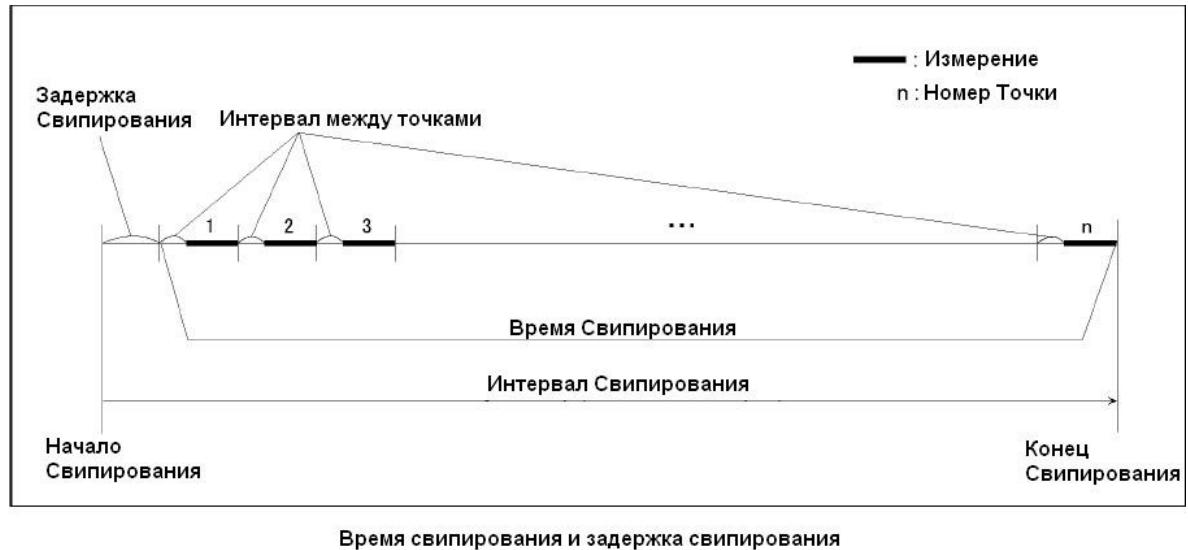


Рис. 1.10. Параметры закона свиппирования по частоте

Для автоматической установки времени свиппирования необходимо:

- Выбрать необходимый активный канал
- Нажать **Sweep Setup**
- Нажать **Sweep Time**
- Нажать **0 x1** (ввод нуля активизирует автоматический выбор времени, x1 означает ввод числа без единицы измерения)

#### Установка выходной мощности генератора:

Установка мощности генератора влияет на режим активных и нелинейных объектов. Уровень мощности выбирается из диапазона -5 дБм ... 10 дБм. Для установки уровня мощности требуется:

- Выбрать необходимый канал
- Нажать **Sweep Setup**

- Нажать **Power**
- Ввести значение выходной мощности при помощи клавиш цифровой панели

#### *Свиппирование по мощности:*

В приборе предусмотрен режим исследования активных устройств на одной частоте при свиппировании мощности генератора. Для установки частоты на которой происходит Свиппирование

- Нажать **Sweep Setup**
- Нажать **Power**
- Нажать **CW Freq** и ввести необходимую частоту

Для установки свиппирования по мощности требуется включить выходной сигнал генератора (например, если он был отключен системой защиты). Для этого необходимо:

- Нажать **Sweep Setup**
- Нажать **Power**
- Нажать **RF Out** (Каждое нажатие этой клавиши производит переключение между двумя состояниями вкл. (on) и выкл. (off), которые индицируются на статусной панели прибора, находящейся в нижнем углу экрана.)

#### *Установка закона изменения частоты:*

Позволяет выбрать закон изменения частоты, для чего необходимо:

- Нажать **Sweep Setup**
- Нажать **Sweep Type**
- Выбрать необходимый закон

**Linear** – изменение частоты в линейном масштабе (стандартный режим измерения)

**Log** – изменение частоты в логарифмическом масштабе, что удобно при измерениях в широкой полосе частот

**Segment** – в данном режиме весь частотный диапазон составляется из различных поддиапазонов (сегментов). Это позволяет сократить время измерения и облегчить сравнения разных частотных участков характеристики.

**Power** - режим свиппирования по мощности на фиксированной частоте

*Режимы запуска канала (triggering):*

При измерении прибор начинает работу (запускается) от одного из возможных источников запуска. Необходимо выбрать источник запуска (для всего прибора), а также тип запуска каждого канала.

Для выбора источника запуска необходимо:

- Нажать **Trigger**
- Нажать **Trigger Source**
- Выбрать источник запуска канала:

**Internal** – запуск канала производится непрерывно от внутреннего источника (внутренняя развертка)

**External** – запуск канала производится от внешнего источника (внешняя развертка). В качестве источника используется сигнал, подаваемый на вход внешнего запуска.

**Manual** – запуск канала производится вручную нажатием кнопки **Trigger** (однократная развертка)

**Bus** – запуск канала по команде интерфейса от сети, в которую включен прибор (программный запуск командой \*TRG).

Для выбора типа запуска необходимо:

- Выбрать требуемый канал
- Нажать **Trigger**
- Выбрать требуемый тип запуска:

**Hold** – устанавливает развёртку в состояние ожидания (Idle- остановка свиппирования)

**Single** – режим однократной развёртки – прибор в состоянии готовности к запуску (Initiate). После запуска прибор переходит в состояние ожидания

**Continuous** – режим непрерывной развёртки

**Hold All Channels** – устанавливает развёртки всех каналов в режим ожидания

**Continuous Disp Channels** – режим непрерывной развёртки для всех отображаемых каналов

*Имя канала (заголовок окна):*

В приборе введена возможность ввода названия канала (заголовка окна), что удобно при последующем сохранении результатов измерения в файл данных или графиков.

Для задания (изменения) заголовка окна необходимо:

- Выбрать требуемый канал
- Нажать **Display**
- Нажать **Edit Title Label**. На экране появится диалоговое окно клавиатуры для ввода заголовка. Используя экранную клавиатуру, ввести заголовок окна, после чего нажать **Enter**
- Нажать клавишу **Title Display** для включения вывода заголовка в верхнюю часть окна канала

*Режим оцифровки шкал графиков канала:*

Включение/отключение оцифровки вертикальной шкалы в декартовой системе координат. Может быть полезно для увеличения полезной площади окна. При отключенной оцифровке шкалы можно наблюдать значение исследуемых параметров при помощи маркеров. Для включения/отключения оцифровки шкал:

- Выбрать необходимый канал
- Нажать **Display**
- Нажать **Graticule Label**

Кроме отключения, в этом пункте меню можно менять вид выводимых значений:

Auto – вывод абсолютных значений измеряемого параметра,

Relative – вывод значений относительно установленного опорного уровня (reference level), вводимого дополнительно.

*Режим гашения вывода значений частоты:*

В данном режиме с экрана убирается вся информация о частотах, на которых проводится измерение (используется при возникновении необходимости скрыть рабочий диапазон исследуемого устройства)

- Нажать **Display**
- Нажать **Frequency**

Гашение частоты автоматически деактивируется, при использовании клавиш **[Start]**, **[Stop]**, **[Center]** и **[Span]**. Для «полного» гашения, необходимо отключить эти кнопки, нажатием клавиши **[SoftKeyOn/Off]**.

*Установка полосы пропускания усилителя ПЧ для каждого канала:*

Для установки полосы пропускания необходимо:

- Выбрать требуемый канал
- Нажать **Avg**
- Нажать **IF Bandwidth**
- Ввести значение полосы пропускания в пределах 10 Гц...30 кГц
  - Режимы (параметры) графиков.

*Установка измеряемых параметров для каждого графика:*

Прибор E5062A в каждой точке измеряет два параметра матрицы рассеяния S11 и S21(их амплитуды и фазы). Для каждого графика требуется указать вид индицируемого параметра. На одном графике может отображаться как один параметр, так и два сразу. Для выбора измеряемого параметра:

- Выбрать необходимый канал и график
- Нажать **Meas**
- Выбрать требуемый параметр матрицы рассеяния (S11 или S21)

Выбор формата выводимых данных:

Прибор позволяет отображать на графиках измеряемые параметры в следующих форматах:

- Прямоугольная (декартова) система координат
  - Линейная шкала амплитуды
  - Логарифмическая шкала амплитуды
  - Стандартный формат фазы (-180<sup>0</sup>...180<sup>0</sup>)
  - Расширенный формат фазы (-∞...∞)
  - Формат положительной фазы (0...360<sup>0</sup>)
  - Групповое время запаздывания (ГВЗ)
  - КСВ
  - Формат вывода вещественной и мнимой части параметра
- Полярная система координат
- Диаграмма Смита

Прямоугольная система координат:

Тип	Данные по Оси Y	Единицы измерения	Измеряемые величины
Логарифмическая шкала	Измеряемая величина	дБ	Обратные потери Вносимые потери
Стандартный формат фазы	Фаза в пределах от -180 <sup>0</sup> до 180 <sup>0</sup>	град	Изменение фазы
Расширенный формат фазы	Фаза в пределах от -∞ до +∞	град	Изменение фазы
Формат положительной фазы	Фаза в пределах 0 <sup>0</sup> до 360 <sup>0</sup>	град	Изменение фазы
Формат групповой	Сигнал, задержанный	сек	Групповая задержка

Тип	Данные по Оси Y	Единицы измерения	Измеряемые величины
задержки	внутри исследуемого устройства		
Линейный формат	Измеряемая величина	безразмерно	Коэффициент отражения
KCB	$\frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}$	безразмерно	Измерение параметров стоячей волны
Формат вещественных данных	Вещественная часть измеряемых комплексных параметров	безразмерно	
Формат комплексных данных	Мнимая часть измеряемых комплексных параметров	безразмерно	

#### Полярная система координат:

Выводятся частотная зависимость (годограф) комплексного параметра в следующих форматах:

- Линейный модуль параметра и его фаза
- Логарифмический модуль величины и фаза
- Вещественные и комплексные части параметра (выводятся с помощью маркера)

В данном формате отсутствует отображение частот, на которых проводятся измерения (рис.11). Определить частоту можно только при помощи маркера.

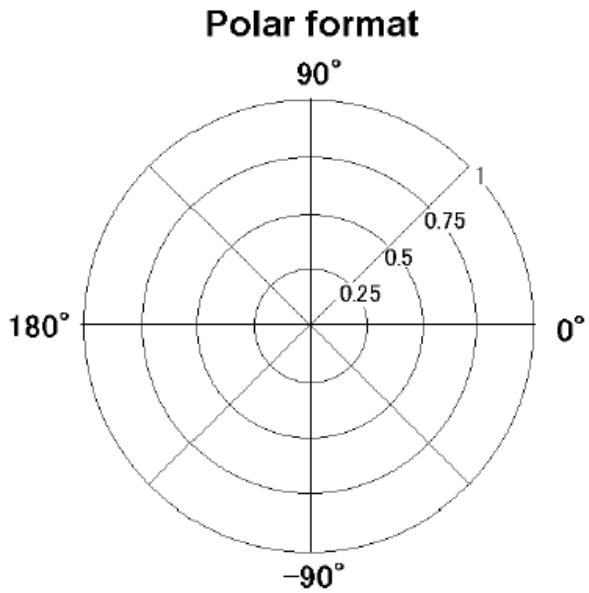


Рис. 1.11. Полярная диаграмма

Диаграмма Смита (круговая диаграмма).

Это полярная система координат для коэффициента отражения с наложенной сеткой вещественной и мнимой частями полных сопротивлений или проводимостей. Форматы вывода:

- Линейный модуль и фаза
- Логарифмический модуль и фаза
- Вещественные и комплексные части
- Сопротивление (Ом), реактивное сопротивление и индуктивность (Гн) или ёмкость ( $\Phi$ )
- Проводимость (См), реактивная проводимость и ёмкость или индуктивность

Последние данные являются расчетными и выводятся при помощи маркера. Для их расчета требуется предварительно ввод волнового сопротивления тракта  $Z_0$ .

## Smith chart format

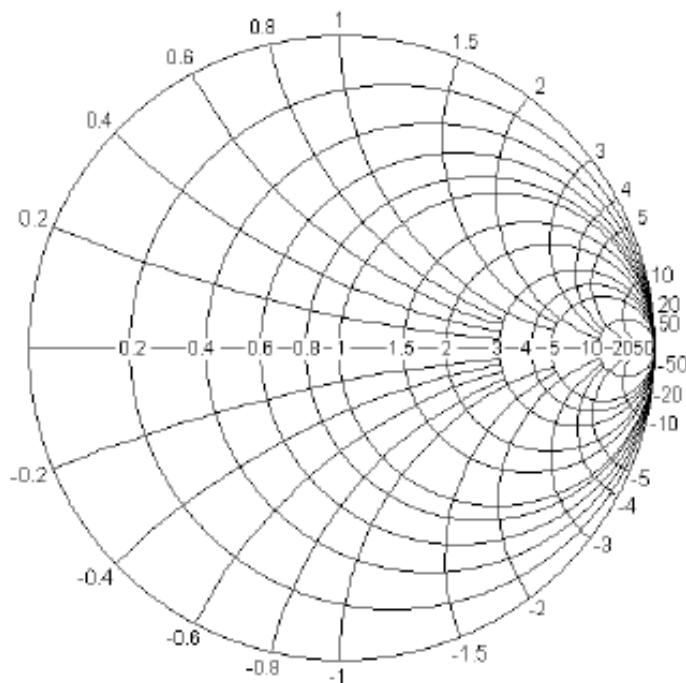


Рис. 1.12. Круговая диаграмма

Для выбора формата отображения необходимо:

- Указать необходимый канал и график
- Нажать **Format**
- С помощью программируемой клавиши выбрать требуемый формат вывода данных

**Lin Mag** - Прямоугольная система координат, линейный формат

**Log Mag** - Прямоугольная система координат, логарифмическая шкала

**Phase** Прямоугольная система координат, стандартный формат фазы –  
значения в пределах -180 ...180 градусов

**Group Delay** Прямоугольная система координат, формат ГВЗ

<b>Smith - Lin / Phase</b>	Диаграмма Смита, линейный модуль и фаза
<b>Smith - Log / Phase</b>	Диаграмма Смита, логарифмический модуль и фаза
<b>Smith - Real / Imag</b>	Диаграмма Смита, вещественные и комплексные части
<b>Smith - R + jX</b>	Диаграмма Смита, сопротивление, реактивное сопротивление и индуктивность или ёмкость
<b>Smith - G + jB</b>	Диаграмма Смита, проводимость, реактивная проводимость и ёмкость или индуктивность
<b>Polar - Lin / Phase</b>	Полярная система координат, линейный модуль и фаза
<b>Polar - Log / Phase</b>	Полярная система координат, логарифмический модуль и фаза
<b>Polar - Real / Imag</b>	Полярная система координат, вещественные и комплексные части
<b>SWR</b>	Прямоугольная система координат, КСВ
<b>Real</b>	Прямоугольная система координат, вещественная часть параметра
<b>Imaginary</b>	Прямоугольная система координат, мнимая часть параметра
<b>Expand Phase</b>	Прямоугольная система координат, «расширенный» формат фазы, в котором исключены броски фазы на 360 градусов
<b>Positive Phase</b>	Прямоугольная система координат, формат положительной фазы – фазовый угол изменяется в пределах 0 -360 градусов

### Установка масштаба графиков

Предусмотрено два режима установки масштабов – автоматический (автоподстройка) и ручной. В режиме автоподстройки, прибор подбирает масштаб осей графика для наилучшего отображения измеряемых данных.

Устанавливаются начало координат (опорный уровень) и цена деления шкалы. Для включения автоподстройки необходимо:

- Выбрать требуемые канал и график
- Нажать **Scale**
- Нажать **Auto Scale**

Если необходимо провести автоподстройку для всех графиков в канале

- Выбрать требуемый канал
- Нажать **Scale**
- Нажать **Auto Scale All**

В ручном режиме для декартовой системы координат допускается установка вида оси Y . Регулируются 4 параметра:

- Число делений по оси Y (**Divisions**)- от 4 до 30 – устанавливается для всех графиков канала.
- Цена деления (**Scale/Div**) масштабной сетки по оси Y активного графика
- Положение опорного уровня (**Reference Position**) активного графика. Указывается номер деления шкалы, принятый для опорного значения.
- Значение опорного уровня (**Reference Value**)

Для ввода параметров требуется:

- Выбрать требуемый канал и график
- Нажать **Scale**
- Нажать программируемую клавишу, соответствующую параметру установки масштаба.

В ручном режиме для полярной системы координат и диаграммы Смита устанавливается только один параметр – величина радиуса внешней окружности (**Scale/Div**).

## **1.4. Калибровка анализатора цепей СВЧ E5062A**

Калибровка прибора представляет собой процедуру исключения систематических погрешностей, возникающих за счет неидеальности СВЧ тракта.

Все погрешности измерения параметров СВЧ устройств измерений делятся на три основных типа:

- 1) Погрешности дрейфа
- 2) Случайные погрешности
- 3) Систематические погрешности

### *Погрешности дрейфа*

Погрешности дрейфа вызваны отклонениями в работе измерительного прибора (измерительной системы), которые возникают уже после калибровки. Главные причины – тепловое расширение соединений кабелей и тепловой дрейф преобразователя частоты прибора. Эти ошибки могут быть уменьшены, если периодически выполнять калибровку в процессе измерений или поддерживать устойчивую окружающую температуру во время измерений.

### *Случайные погрешности*

Случайные погрешности не могут быть устранины при калибровке. Эти ошибки подразделяются по причине возникновения на:

- Внутренние шумы прибора;
- Ошибки, возникшие в результате многократного подсоединения к разъемам прибора.

Погрешность, вызванную внутренними шумами, можно уменьшить с помощью увеличения мощности источника сигнала, сужения полосы пропускания, использования режимов усреднения и сглаживания. Погрешность, связанная с непостоянством свойств соединителей, возрастает при длительной

эксплуатации прибора, поэтому стремятся к уменьшению числа коммутаций на разъемах портов.

### *Систематические погрешности*

Систематические погрешности вызваны несовершенством СВЧ тракта прибора (направленные ответвители и др.) и внешних соединителей (кабели, разъемы, крепления, и т.д.). Эти погрешности повторяющиеся и практически не меняются во времени. Их можно уменьшить с помощью калибровки. Для СВЧ тракта вида рис. 2 можно выделить шесть типов систематических погрешностей:

- Неидеальная направленность ответвителей (Directivity). Погрешность, связанная с направленностью, возникает в результате проникновения падающей волны в тракт измерения отражённой волны ( $E_d$ ).
- Погрешность, связанная с перекрестным (crosstalk) проникновением сигналов (неидеальная развязка каналов -Isolation); она появляется при проникновении побочных сигналов в тракт измерения прошедшего сигнала ( $E_x$ ).
- Рассогласование источника – Source Match. Погрешность возникает из-за того, что отраженный от испытуемого устройства сигнал переотражается от направленного ответвителя отраженной волны и поступает опять на вход ( $E_s$ ).
- Рассогласование нагрузки (Load Match). При переотражении сигнала от нагрузки измерительного порта (вход направленного ответвителя прошедшей волны) в измерительный канал попадает не вся мощность прошедшего через устройство сигнала.
- Ошибка из-за неравномерности ЧХ канала отражения (Tracking error) ( $E_t$ ). Она возникает из-за неодинаковости частотных характеристик измерительного и опорного каналов для коэффициента отражения
- Ошибка, зависящая от неравномерности ЧХ канала передачи ( $E_{t'}$ ). Она связана с неодинаковостью ЧХ измерительного и опорного каналов для коэффициента передачи.

Калибровка прибора предназначена для уменьшения этих погрешностей и проводится с использованием комплекта калибровочных мер, включающих нагрузки холостого хода и короткого замыкания (ХХ – OPEN, КЗ – SHORT), перемычку (THRU) и согласованные нагрузки (CH - LOAD).

В зависимости от измерительной задачи, применяют различные типы калибровок

#### Калибровка частотной неравномерности и направленности порта источника с использованием нагрузок ХХ/КЗ(OPEN/SHORT)

При такой калибровке устраняются систематические погрешности, связанные с направленностью ( $E_d$ ) и неравномерностью ЧХ канала отражения( $E_r$ ). Схематически погрешности отражены на графике рис.1.13.

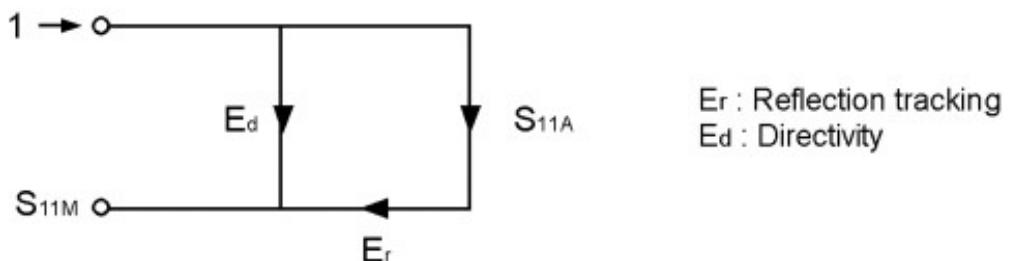


Рис. 1.13. 1-портовая модель погрешности СВЧ тракта анализатора цепей СВЧ

Калибровка ведется по измеряемому параметру S11. Этапы проведения калибровки:

- 1) В правом меню выбрать подменю Calibrate.
- 2) Выбрать тип калибровки из двух вариантов:
  - **Response (Open)** - с подключением ХХ
  - **Response (Short)** - с подключением КЗ
- 3) Подключить ХХ или КЗ к исследуемому порту и нажать **Open** или **Short** соответственно для начала калибровочных измерений. Нажать **Done** для завершения калибровки

- 4) Если дополнительно требуется провести калибровку изоляции  $E_x$ , то нужно подключить согласованную нагрузку к порту и нажать **Load (Optional)**.

### **Калибровка частотной неравномерности передачи с использованием перемычки (THRU)**

При такой калибровке устраняются погрешности несовершенной изоляции ( $E_x$ ) и неравномерности ЧХ канала прохождения ( $E_t$ ).

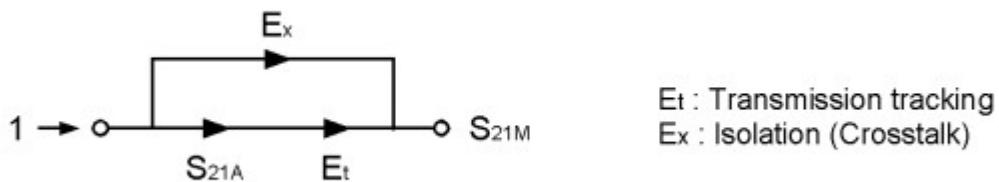


Рис. 1.14. 2x-портовая модель погрешности СВЧ тракта анализатора цепей СВЧ

Калибровка ведется по параметру S21 . Этапы проведения калибровки:

- 1) В подменю Calibrate выбрать пункт **Response (THRU)**.
- 2) Соединить порт 1 и порт 2 с помощью перемычки – отрезка линии передачи.
- 3) Нажать **Thru** для начала калибровки.
- 4) Если требуется провести калибровку изоляции  $E_x$ , то нужно подключить две согласованные нагрузки к портам 1 и 2 и нажать **Load (Optional)**.
- 5) Нажать **Done** для завершения калибровки.

### **Полная 1-портовая калибровка (1-Port Calibration)**

После этой калибровки исключаются погрешности согласования источника ( $E_s$ ), направленности ( $E_d$ ) и неравномерности ЧХ канала отражения ( $E_r$ ).

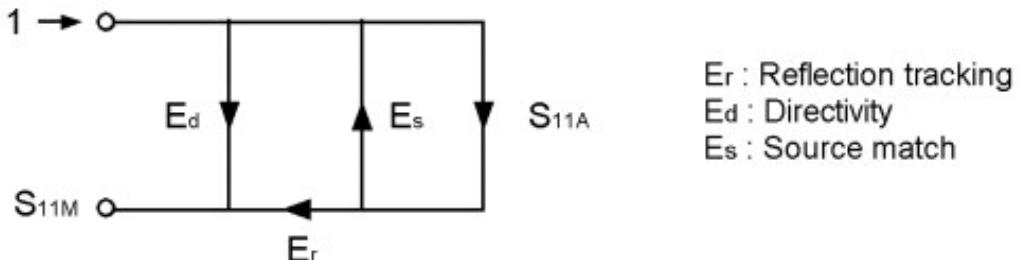


Рис. 1.15. Полная 1-портовая модель погрешности СВЧ тракта

Этапы проведения калибровки:

- 1) В правом меню выбрать подменю **Calibrate**.
- 2) Выбрать тип калибровки **1-Port Cal.**
- 3) Подключить ХХ к измерительному порту и нажать **Open** для начала калибровочных измерений.
- 4) Подключить КЗ к измерительному порту и нажать **Short**.
- 5) Подключить согласованную нагрузку к порту и нажать **Load**.
- 6) Нажать **Done** для завершения калибровки.

#### **Расширенная калибровка (Enhanced Response)**

При такой калибровке исправляются все систематические погрешности, кроме погрешности рассогласования нагрузки (Load match) – рассогласование НО проходящей волны. Используется полный набор калибровочных мер (SHORT/OPEN/LOAD/THRU).

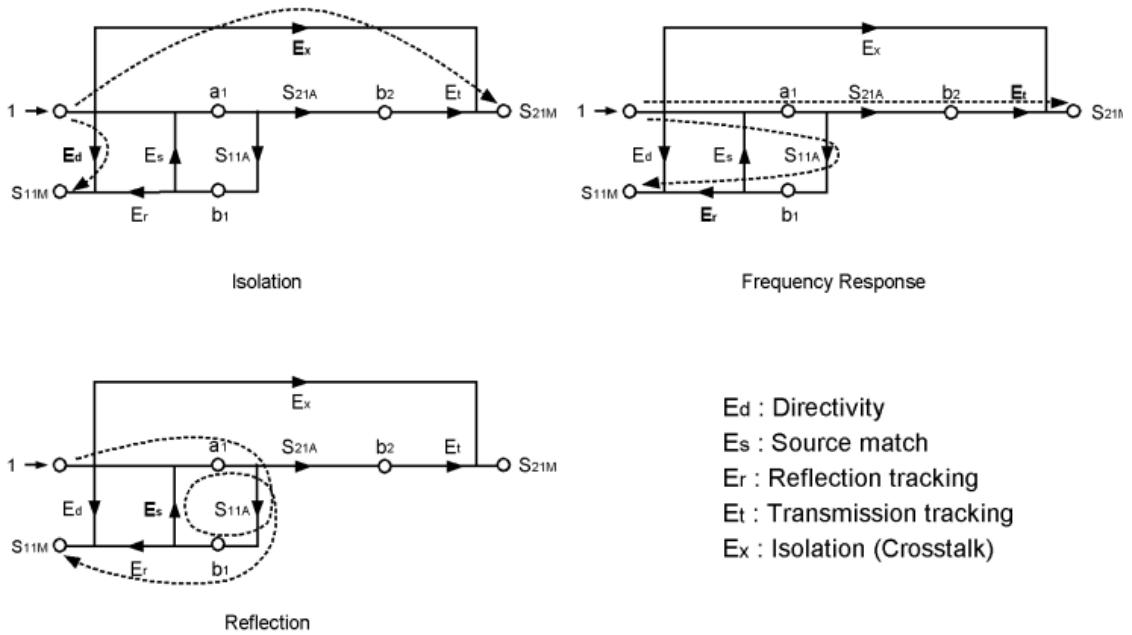


Рис. 1.16. Расширенная 2х-портовая модель погрешностей СВЧ тракта

Этапы проведения калибровки

- 1) В правом меню выбрать подменю **Calibrate**.
- 2) Выбрать тип калибровки **Enhanced Response**.
- 3) Подключить ХХ к порту источника и нажать **Open** для начала калибровочных измерений.
- 4) Подключить КЗ к измерительному порту и нажать **Short**.
- 5) Подключить согласованную нагрузку к порту и нажать **Load**.
- 6) Соединить два порта с помощью линии передачи и нажать **Thru**.
- 7) Если требуется провести калибровку изоляции, то нужно подключить согласованные нагрузки к портам и нажать **Isolation (Optional)**.
- 8) Нажать **Done** для завершения калибровки.

Состояние выполнения коррекции погрешностей для каждого канала отображается в строке состояния прибора символами, указанными в табл. 2.

Таблица 2

Символ	Состояние выполнения коррекции погрешностей
Cor (синий цвет)	Коррекция погрешностей включена для всех каналов
Cor (серый цвет)	Коррекция погрешностей включена для некоторых кан-

	ЛОВ
Off	Коррекция погрешностей выключена
---	Коррекция погрешностей включена, но нет данных калибровки
C?	Коррекция погрешностей включена и используется интерполяция( или полоса ПЧ, уровень мощности, параметры свиппирования отличаются от того состояния, которое было при калибровке )
C!	Коррекция погрешностей включена и используется экстраполяция

Состояние выполнения коррекции погрешностей для каждого графика (используемый тип калибровки) указывается в строке состояния графика символами в квадратных скобках, приведенными в табл. 3. Если ни один из представленных выше символов не отображается на экране, для данного графика коррекция ошибок не производится.

Таблица 3

Символ	Тип калибровки
RO	Калибровка частотной неравномерности по нагрузке ХХ
RS	Калибровка частотной неравномерности по нагрузке КЗ
RT	Калибровка частотной неравномерности по перемычке
ER	Расширенная калибровка
F1	1-портовая калибровка

Индикация использованных методик калибровки в каждом канале отображается в виде матрицы в правом нижнем углу экрана при вызове свойств калибровки (для активного канала надо нажать клавиши Calibration -> Property). S – порт источника, R –порт приемника.

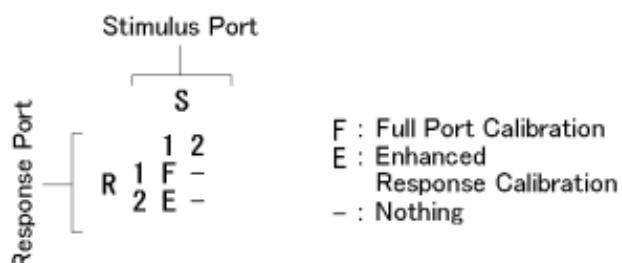


Рис. 1.17. Пример индикации свойств калибровки

F: полная калибровка порта (**1-Port Calibration**)

R: калибровка частотной неравномерности (**OPEN/SHORT**)

E: расширенная калибровка (**Enhanced Response**)

- : нет калибровки

## **1.5. Измерения с использованием маркеров.**

Маркер – это электронная метка на графике , которая позволяет:

- Считывать численное значение измеренной величины (абсолютное или относительное значение)
- Перемещение маркера в нужную точку графика (режим маркерного поиска)
- Анализ данных графика с целью определения его параметров (полосы пропускания, неравномерности и пр.)
- Изменение параметров генератора (например, установка диапазона свип-пирвания) или масштаба отображения (например, значения опорного уровня) с использованием маркера.

Каждому маркеру соответствует значение частоты (значение по оси X в формате прямоугольных координат) и значение результата измерения (значение по оси Y в формате прямоугольных координат). В формате диаграммы Смита и в полярных координатах каждому маркеру соответствует частота и два значения результата измерения (амплитуда и фаза). Прибор позволяет размещать на каждом графике до 10 маркеров.

### **Добавление маркеров на график активного окна.**

- Выбрать требуемые канал и график
- Нажать **Marker**.
- выбрать маркер с помощью программируемых клавиш **Marker 1-4**. Они включают один из маркеров 1-4, если он был выключен; или

делают маркер 1-4 активным.

**More Markers - Marker 5-9** Включает маркер с номером 5-9, если он был выключен; делает маркер 5-9 активным.

**Ref Marker** - включает опорный маркер, если он был выключен; делает опорный маркер активным.

Для выключения маркеров необходимо нажать клавишу **Clear Marker Menu** и выбрать одну из программируемых клавиш:

**All OFF** – выключение всех маркеров на активном графике;

**Marker1 – 9** - выключает один из 9 маркеров;

**Ref Marker** - выключает опорные маркеры на активном графике

#### Считывание абсолютного значения данных в точке маркера

Перемещение маркера по графику осуществляют манипулятором мышь или регулятором на цифровой панели. В поле ввода данных активного маркера можно менять значение частоты. Это позволяет перемещать маркер по графику в нужную частотную точку, вводя ее координату с помощью цифровых клавиш. Завершать ввод можно нажатием клавиш со стрелками или щелчком мыши по указателю с правой стороны зоны ввода.

В графиках с прямоугольными координатами формат вывода результата измерения в точке маркера всегда соответствует формату данных графика по оси Y. В других координатах можно выбрать один из нескольких форматов представления численных значений измеренной величины (таблица 4).

Таблица 4. Показания в точке маркера в формате диаграммы Смита или полярной диаграммы.

Программируемая клавиша для выбора формата данных	Значение измеряемой величины в точке маркера	
	Основное	Дополнительное
<b>Smith - Lin/Phase</b>	Линейная амплитуда	Фаза
<b>Smith - Log/Phase</b>	Логарифм, амплитуда	Фаза
<b>Smith - Real/Imag</b>	Действительная часть	Мнимая часть
<b>Smith-R + jX</b>	Активное сопро- тивление	Реактивное сопро- тивление* <sup>1</sup>

<b>Smith-G + jX</b>	Проводимость (действительная часть проводимости)	Восприимчивость (мнимая часть проводимости)* <sup>1</sup>
<b>Polar - Lin/Phase</b>	Линейная амплитуда	Фаза
<b>Polar - Log/Phase</b>	Логарифм, амплитуда	Фаза
<b>Polar - Real/Img</b>	Действительная часть	Мнимая часть

### Считывание относительного значения данных измерения

В приборе предусмотрен режим вывода данных измерений относительно опорного значения, задаваемого маркером специального типа. Он называется опорный маркер - Ref Marker.

Нажатие клавиши **Marker** —> **Ref Marker** позволяет поместить опорный маркер в положение, в котором находится в данный момент активный маркер. После этого относительный режим включится автоматически. В противном случае режим относительных измерений вводится клавишей **Ref Marker Mode**.

В относительном режиме значение частоты и измеряемая величина отображаются на экране в относительных величинах, отсчитанных от точки, в которой находится опорный маркер (рис. 1.18).

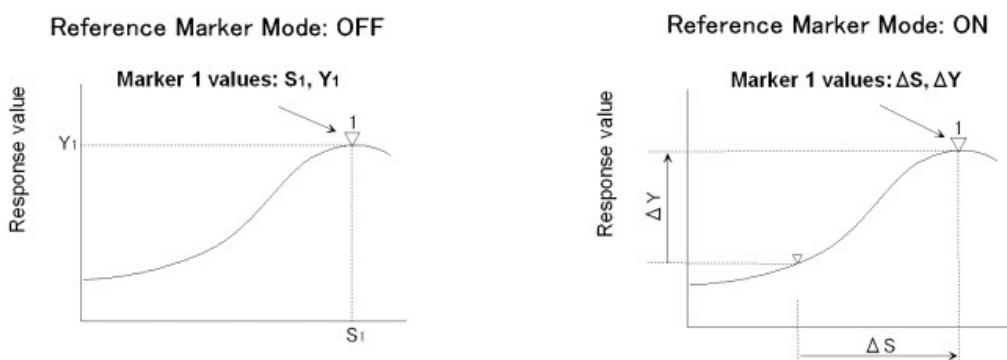


Рис. 1.18.. Режим дельта-маркера

### Дискретный режим позиционирования маркера

Если включен дискретный режим (**Discrete ON**), то маркер перемещается только по точкам, в которых проводилось измерение. Если указано конкрет-

ное числовое значение частоты, маркер помещается в точку измерения, ближайшую к этому значению по оси X. Если дискретный режим выключен (**Discrete OFF**) - маркер может размещаться и в области между точками, в которых проводилось измерение (рис.1.19).

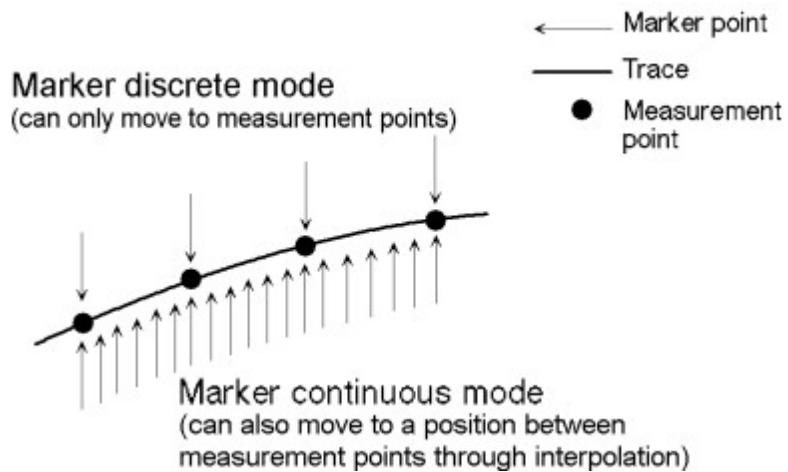


Рис. 1.19. Дискретный режим маркера

Включение и выключение дискретного режима маркера производится следующим образом - необходимо:

- Выбрать требуемые канал и график
- Нажать клавишу **Marker Fctn.**
- Нажать клавишу **Discrete ON|OFF** для включения или выключения дискретного режима

#### Установка режима связности маркеров на различных графиках

Установка и перемещение маркеров может производиться в режиме связности для всех графиков в одном канале (в одном положении по оси X) или независимо для каждого графика (рис.1.20).

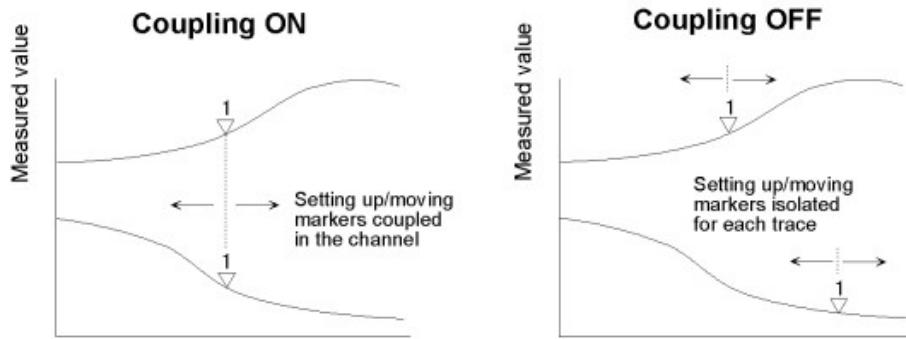


Рис. 1.20. Связь маркеров

Для включения или выключения функции связанности маркеров необходимо:

- Выбрать требуемые канал и график
- Нажать клавишу **Marker Fctn.**
- Нажать клавишу **Couple** для включения или выключения режима связанности

#### Вывод таблицы значений для маркеров во всех каналах

В приборе имеется возможность вывода таблицы значений для всех маркеров во всех отображаемых каналах. Для этого требуется:

- Нажать клавишу Marker Fctn.
- Нажать клавишу Marker Table.

В нижней части экрана появляется таблица маркеров (номер маркера, номер графика , частота , значение параметра).

#### Режим маркерного поиска (Marker Search).

В приборе реализован режим установки маркера в точку, удовлетворяющую заданному критерию поиска:

1. Максимальное значение параметра
2. Минимальное значение

3. Целевая точка с указанным значением параметра

4. Пиковое значение параметра

Установка диапазона поиска позволяет искать точку установки маркера как в полном диапазоне качания частоты (по умолчанию), так и в частичном (**Partial Search**). Для этого требуется:

- Нажать клавишу **Marker Search**.
- Нажать клавишу **Search Range**.
- Вторично нажать клавишу **Search Range**.
- Нажать клавишу **Start** и ввести нижний предел поиска
- Нажать клавишу **Stop** и ввести верхний предел поиска

Поиск можно осуществлять один раз, а также автоматически повторять его на каждом цикле свиппирования (Search Tracking). Включать и выключать этот режим можно так:

- Нажать клавишу **Marker Search**.
- Нажать клавишу **Search Range**.
- Нажать клавишу **Tracking** для включения или выключения режима автоматического поиска.

#### Поиск максимума или минимума графика

Предусмотрена возможность поиска максимального или минимального значения величины на графике и перемещения в эту точку маркера (рис. 1.21.)

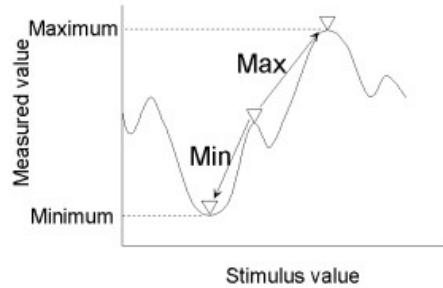


Рис. 1.21. Поиск максимума или минимума

- Нажать клавишу **Marker Search**.
- Нажать клавишу **Max (Min)**.

#### Поиск целевого значения (Target Search)

Целью является точка на графике, которой соответствует введенное значение измеряемой величины. Цели можно разделить на две группы по наклону графика: положительный (Positive) и отрицательный (Negative) (рис. 1.22)

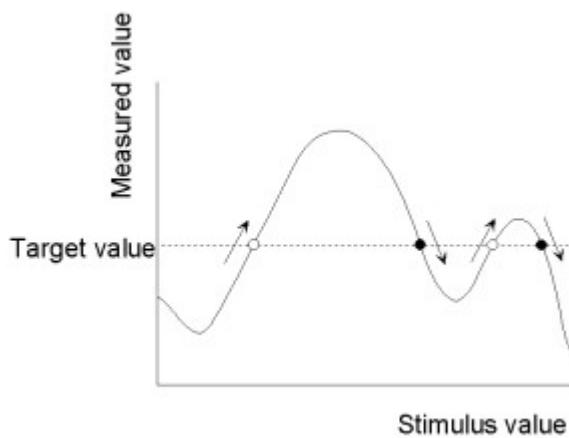


Рис. 1.22. Поиск заданного значения

Предусмотрено три способа выполнения поиска цели:

Поиск цели (**Search Target**) - Маркер будет перемещаться в ближайшую слева или справа точку графика с целевым значением измеряемой величины

Поиск слева (**Search Left**) - Выполняется поиск ближайшей точки слева от активного маркера

Поиск справа (**Search Right**) - Выполняется поиск ближайшей точки справа от активного маркера (рис. 1.23)

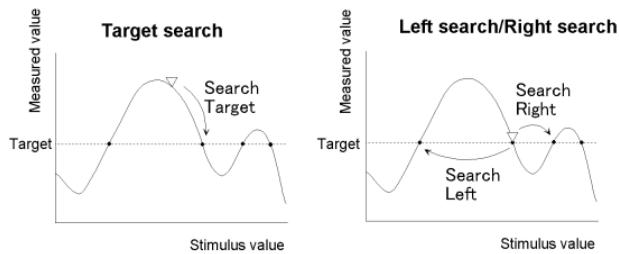


Рис. 1.23. Поиск заданного значения справа или слева от активного маркера

Выполнение поиска цели:

- Нажать клавишу **Marker Search**.
- Нажать клавишу **Target**.
- Нажать клавишу **Target Value** и в появившейся зоне ввода ввести требуемое целевое значение.
- Нажать клавишу **Target Transition**.
- Выбрать вид наклона графика в точке (**Positive/Negative/ Both**)
- Нажать соответствующую программируемую клавишу для перемещения маркера в точку цели (**Search Target/Search Left/Search Right**)

#### Поиск пика (локального максимума или минимума)

Функция поиска пика позволяет переместить маркер в точку локального пика на графике. Пики можно разделить на две группы, показанные на рис. 1.24:

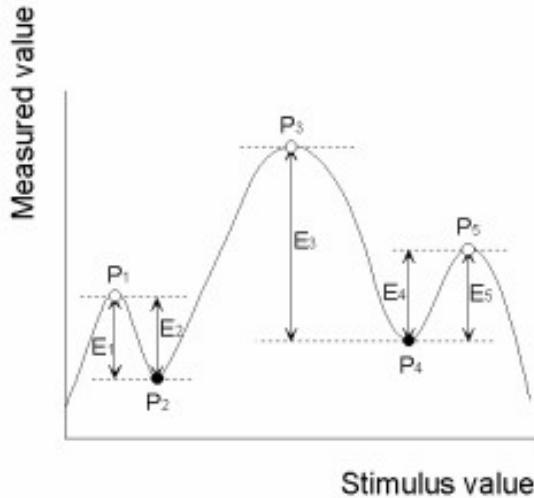


Рис. 1.24.. Поиск локального пика на графике

- Положительный пик (**Positive**) Пик, значение измеряемой величины, в котором больше, чем в точках измерения по обеим сторонам от него (полярность пика положительная).
- Отрицательный пик (**Negative**) Пик, значение измеряемой величины, в котором меньше, чем в точках измерения по обеим сторонам от него (полярность пика отрицательная).

Предусмотрено три способа выполнения поиска пика.

- Поиск пика (**Search Peak**) Маркер будет перемещён в пик графика с максимальным значением измеряемой величины, если указана положительная (**Positive**) или любая (**Both**) полярность пика, либо в пик графика с минимальным значением измеряемой величины, если указана отрицательная (**Negative**) полярность пика.
- Поиск слева (**Search Left**) Выполняется поиск слева от маркера, затем маркер перемещается на первый встретившийся пик.
- Поиск справа (**Search Right**) Выполняется поиск справа от маркера, затем маркер перемещается на первый встретившийся пик. (рис.1.25)

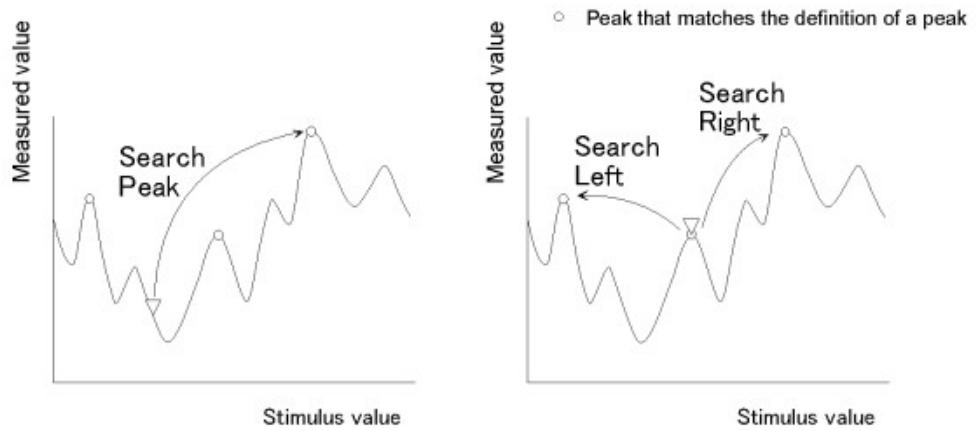


Рис. 1.25. Поиск положительного пика на графике

Выполнение поиска пика:

- Нажать клавишу **Marker Search**.
- Нажать клавишу **Peak**.
- Нажать клавишу **Peak Excursion** и в появившейся зоне ввода ввести требуемое значение нижнего предела пикового отклонения..
- Нажать клавишу **Peak Polarity**.
- Выбрать полярность пика в точке (**Positive/Negative/ Both**)
- Нажать соответствующую программируемую клавишу для перемещения маркера в точку пика (**Search Peak/Search Left/Search Rigth** )

### Поиск полосы пропускания. Обработка данных.

Режим поиска полосы предназначен для определения полосы пропускания, центральной частоты, точек отсечки (со стороны верхней и нижней частоты), добротности (Q) и потерь (ослабления). Поиск ведется относительно уровня активного маркера. Определения параметров, используемых при поиске полосы, приведены на рис. 1.26 и в таблице 5.

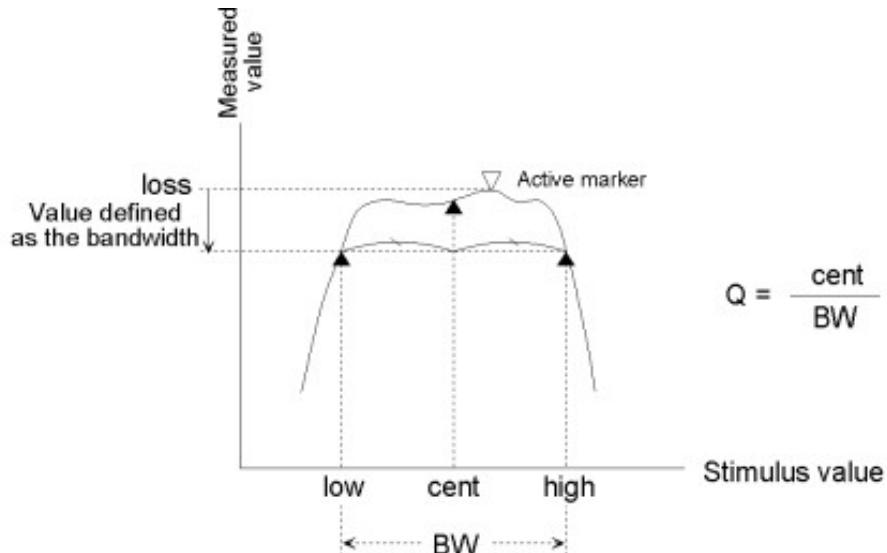


Рис. 1.26. Параметры полосы пропускания ППФ

**Таблица 5**

Параметр полосы	Определение
<u>Вносимые потери (loss)</u>	Измеряемая величина в точке активного маркера в момент включения поиска полосы
<u>Нижняя частота отсечки (low)</u>	Нижняя частота полосы пропускания по установленному уровню. Этот уровень отсчитывается относительно значения величины в точке активного маркера.
<u>Верхняя частота отсечки (high)</u>	Верхняя частота полосы пропускания по установленному уровню.
<u>Центральная частота (cent)</u>	Средняя частота между точками нижней и верхней частотами отсечки ( $\frac{high + low}{2}$ )
<u>Полоса (BW)</u>	Разность частот между точками нижней и верхней частоты отсечки ( $high - low$ ).
<u>Добротность(Q)</u>	Отношение центральной частоты к полосе частот ( $cent/BW$ )

Для реализации режима поиска полосы необходимо:

- Поместить активный маркер в отсчетную точку на графике (максимум АЧХ). Значение вносимых потерь принимается равным измеренному значению в этой точке активного маркера
- Нажать клавишу **Marker Search**.

- Нажать клавишу **Bandwidth Value Peak**.

В левой верхней части поля графика на экране отобразятся шесть параметров полосы (рис. 1.27).

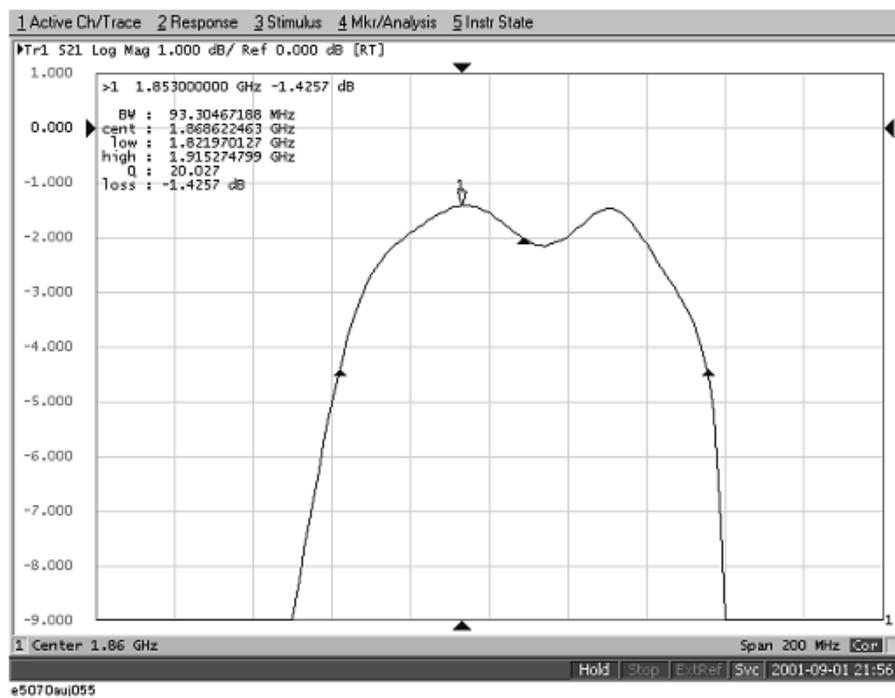


Рис. 1.27. Результаты поиска полосы ППФ

#### Определение статистических параметров графика

Режим позволяет определить статистические характеристики графика (среднего значения, стандартного отклонения и диапазона изменения от пика к пику ( $p - p$ )). Рис. 1.28 и таблица 6 иллюстрируют определение статистических характеристик

Таблица 6

Элемент статистических данных	Определение
Среднее значение ( <b>mean</b> )	$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ n: число точек; x <sub>i</sub> : измеренное значение в i-й точке измерения
Стандартное отклонение ( <b>s. dev</b> )	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \text{mean})^2}{n-1}}$ n: число точек; x <sub>i</sub> : измеренное значение в i-й точке измерения
Диапазон изменения пик-пик ( <b>p-p</b> )	$\text{Max} - \text{Min}$ (Max: наибольшее измеренное значение; Min: наименьшее измеренное значение)

Отображение статистических данных:

- Выбрать активный канал и требуемый график.
- Нажать клавишу **Marker Fctn.**
- Нажать клавишу **Statistics**.

#### Определение параметров RF фильтров (потери, неравномерность и ослабление)

В этом режиме используют 4 маркера (рис.29). По графику определяют следующие параметры фильтров: потери (Loss) – минимальное значение в полосе между маркерами 1 и 2, неравномерность (Ripple) – разница между максимальным и минимальным значениями в промежутке между маркерами 1 и 2, ослабление (Attenuation) – разница между минимальным значением из промежутка маркеров 1 - 2 и максимальным значением из промежутка маркеров 3 – 4.

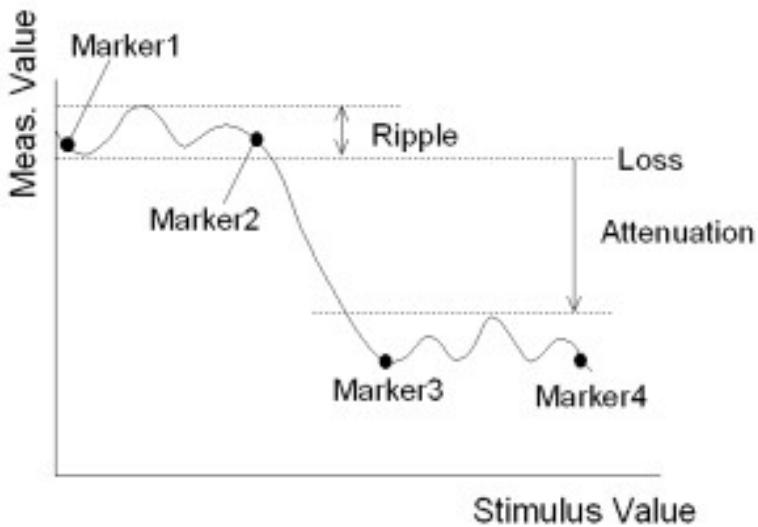


Рис. 1.28. Параметры, используемые при анализе АЧХ радиофильтров

Отображение параметров фильтров:

- Выбрать активный канал и требуемый график.
- Нажать клавишу **Marker Fctn**.
- Нажать клавишу **RF Filter Stats**.
- Последовательно установить на графике позиции маркеров с 1 по 4.

#### Сравнение графиков/математическая обработка данных

Каждый график измеренных данных, который выводится на экран, может быть сохранен в памяти прибора (график памяти). График памяти можно использовать для сравнения графиков на экране или для выполнения комплексных математических действий над запомненными и измеренными данными.

Предусмотрены следующие математические действия:

**Data / Memory**      Деление измеренных данных на данные графика памяти. Эта функция может использоваться для определения отношения двух графиков (например, для определения усиления или ослабления).

**Data \* Memory**      Умножение измеренных данных на данные графика памяти.

**Data - Memory** Вычитание данных графика памяти из измеренных данных. Эта функция может использоваться, например, для вычитания измеренной и запомненной векторной величины поправки (например, направленности) из последующих результатов измерения характеристик устройства.

**Data + Memory** Сложение измеренных данных и данных графика памяти.

Запоминание данных графика в память и выполнение математических действий производится следующим образом:

- Выбрать активный канал и требуемый график.
- Нажать клавишу **Display**.
- Нажать клавишу **Data > Mem** для запоминания данных графика в памяти.
- Нажать клавишу **Data Math**.
- Выбрать математическое действие над данными, нажав программируемую клавишу: **OFF** Прекращает математическую обработку данных (математические действия не выполняются).

**Data /Mem** Производит деление измеренных данных на данные графика памяти, результат операции выводится вместо графика измеренных данных.

**Data \* Mem** Производит умножение измеренных данных на данные графика памяти, результат операции выводится вместо графика измеренных данных.

**Data - Mem** Производит вычитание данных графика памяти из измеренных данных, результат операции выводится вместо графика измеренных данных.

**Data + Mem** Производит сложение измеренных данных и данных графика памяти, результат операции выводится вместо графика измеренных данных.

Для выбора типа данных, отображаемых на графике необходимо нажать клавишу **Display** и в подменю выбрать тип данных, отображаемых на экране:

**Data** Отображает на экране только график измеренных данных.

**Mem** Отображает на экране только график памяти, запомненный нажатием клавиши **Data → Mem**.

**Data & Mem** Отображает на экране одновременно график измеренных данных и график памяти. При этом предоставляется удобная возможность сравнения графика измеренных данных и графика памяти на экране.

**OFF** Графики не отображаются.

### Перерасчёт выводимых параметров

Возможно использовать функцию перерасчёта измеренных параметров для преобразования S-параметров ( $S_{ab}$ ) к следующим величинам:

1. Эквивалентное (нормированное) сопротивление ( $Z_r$ ) или эквивалентная (нормированная) проводимость ( $Y_r$ ) (как параметры отражения)

$$Z_r = Z_{0a} \times \frac{1 + S_{ab}}{1 - S_{ab}}, Y_r = \frac{1}{Z_r};$$

2. Эквивалентное (нормированное) сопротивление ( $Z_t$ ) или эквивалентная (нормированная) проводимость ( $Y_t$ ) (как параметры прохождения)

$$Z_t = \frac{2 \times \sqrt{Z_{0a} \times Z_{0b}}}{S_{ab}} - (Z_{0a} + Z_{0b}); Y_t = \frac{1}{Z_t};$$

3. Обратный S-параметр ( $\frac{1}{S_{ab}}$ ).

Здесь  $Z_{0a}$  - характеристическое сопротивления для порта a,  $Z_{0b}$  - характеристическое сопротивления для порта b ( $Z_0$  считаем равным 50 Ом).

Включение режима пересчета:

- Выбрать активный канал и требуемый график.
- Нажать клавишу **Analysis**.

- Нажать клавишу **Conversion**.
- Нажать клавишу **Conversion** еще раз, чтобы включить состояние ON функции перерасчёта.

Для выбора вида преобразования :

- Выбрать активный канал и требуемый график.
- Нажать клавишу **Analysis**.
- Нажать клавишу **Conversion**.
- Нажать клавишу **Function**.
- Нажать программируемую клавишу, соответствующую требуемому параметру.

## **1.6. Вывод и сохранение данных**

В приборе предусмотрено сохранение следующих типов данных:

- Состояние прибора (State) - запоминаются установленные параметры прибора. При последующей загрузке прибор воспроизводит запомненное состояние;
- Состояние и данные калибровки (State & Cal) - запоминаются установленные параметры и массив калибровочных коэффициентов;
- Состояние и данные графиков (State & Trace) – запоминаются установленные параметры прибора и массив данных графиков с учетом калибровки;
- Состояние, данные калибровки и графиков (All) – запоминаются все данные.

Сохранение производится в файлах на жестком диске или флоппи – диске.

Процедура сохранения включает в себя выбор запоминаемой информации:

- Нажать клавишу **Save/Recall**.
- Нажать клавишу **Save Types**.
- Нажать программируемую клавишу, соответствующую выбору типа запоминаемой информации.

Процедура выбора канала и запоминаемого графика :

- Нажать клавишу **Save/Recall**.
- Нажать клавишу **Channel/Trace** и выбрать запоминаемые графики – все для всех каналов (**All**) или только отображаемые на экране (**Disp Only**).

Процедура сохранения состояния прибора:

- Нажать клавишу **Save/Recall**.
- Нажать клавишу **Save State**.
- Нажать программируемую клавишу имени файла сохранения. По умолчанию это имя State01.sta ... State08.sta или Autorec.sta. Последний файл используется для автоматической конфигурации прибора при загрузке системы. Возможен ввод другого имени файла (клавиша **FileDialog**).
- Нажать клавишу **Save**

Процедура вызова состояния прибора:

- Нажать клавишу **Save/Recall**.
- Нажать клавишу **Recall State**.
- Нажать программируемую клавишу имени файла сохранения. По умолчанию это имя State01.sta ... State08.sta или Autorec.sta. Последний файл используется для автоматической конфигурации прибора при загрузке системы. Возможен ввод другого имени файла (клавиша **FileDialog**).
- Нажать клавишу **Open**.

Прибор имеет также режим сохранения и восстановления состояния только активного канала.

Запоминание данных графиков можно сделать в файле типа CSV (текстовый файл с разделителем - запятой). Формат запомненной информации по строкам: номер активного канала, номер активного графика, строка заголовка (шапка данных), строки данных – (частота, данные)

Процедура запоминания данных графика:

- Выбрать канал и график.
- Нажать клавишу **Save/Recall**.
- Нажать **Save Trace Data** и в диалоговом окне ввести имя файла и место его расположения.

Сохранение и распечатку результатов измерения удобно делать в виде образов экрана. Это можно сделать :

- В виде графического файла формата .bmp (256 color) , .png;
- В виде прямой печати на принтер, установленный и подключенный к прибору;
- В виде образа в буфере Windows.

При сохранении используется флоппи – дисковод или жесткий диск. Имя файла и его расположение выбирают в стандартном диалоговом окне сохранения. Ввод имени производят с помощью внешней или экранной клавиатуры. Последнюю вызывают находящейся в окне диалога кнопкой “**Input from the front panel**”.

Процедура запоминания образа экрана:

- Выбрать вид изображения – с черным или белым фоном (**System – Invert Image Off/On**).
- Нажать клавишу **System/Capture** – образ экрана при этом сохраняется в памяти прибора (в буфере обмена).
- Для записи образа в файл нажмите **Dump Screen Image**. В окне диалога указать расположение и имя файла и нажать **Save**. Будет за-

помнен тот образ экрана, который присутствует в момент нажатия клавиши **System/Capture**.

- Для распечатки запомненного изображения можно использовать принтер, подключенный к параллельному порту LPT или последовательному порту USB. Принтер должен быть установлен в системе (**System-Printer Setup**). Распечатки делается в пункте **System-Print**.

## **1.7.Связь прибора с внешними устройствами и измерительными системами**

Прибор обеспечивает связь с компьютером и измерительными системами нескольких типов интерфейсов. Для включения в систему по интерфейсу GPIB (IEE 488 или КОП) требуется указать аппаратный адрес прибора (в интервале 0 ..30). Для этого используется пункт **System-Misc Setup – GPIB Setup- Talker/Listener Address**. Само подключение осуществляют с использованием платы сопряжения USB-GPIB (например, Agilent 82357A USB-GPIB Interface). Конфигурирование интерфейса осуществляется в пункте меню **System-Misc Setup-GPIB Setup-System Controller Configuration**.

Для конфигурации интерфейса локальной сети Ethernet (LAN) требуется установить IP адрес прибора, задать его имя и разрешить доступ в сеть. Установка проводится в пункте меню **System-Network Setup**. Конфигурирование сети осуществляется обычным способом в диалоговом окне Windows при нажатии кнопки **Network Configuration**. Тут же устанавливается IP адрес прибора в LAN и адрес шлюза. При необходимости можно запретить подключение в сеть (**Properties-Disable/Enable**). Для установки имени компьютера и его рабочей группы используется пункт **System-Network Identification**.

При правильно установленных параметрах соединения в сети появляется устройство с указанным именем. Проверка правильного конфигурирова-

ния осуществляется в пункте LAN Dialog. В нем выводится статус соединения (Normal или FAULT) и IP адрес.

Для управления прибором по сети предусмотрены Web Server и VNC Server. Web сервер позволяет получить удаленный доступ к прибору с помощью обычного Internet Explorer. Для этого на компьютере необходимо указать лишь адрес прибора. Сервер передаст страничку , на которой можно просмотреть и отредактировать сетевые установки прибора (View&Modify Configuration), получить копию экрана (Get Image) и распечатать ее (Print Display).

Для управления прибором по LAN в приборе использован программный продукт Virtual Network Computing (VNC). Это программный продукт для удаленного управления компьютерами (<http://www.realvnc.com/>) включает VNC сервер, запускаемый на приборе, и VNC viewer – программу, запускаемую на удаленном компьютере. Вьюер позволяет получить на экране компьютера изображение экрана прибора и управлять его меню с помощью клавиатуры и мыши. Количество компьютеров, одновременно соединенных с сервером, может быть большим. Для части из них функция управления может быть блокирована, что превращает их в удаленные демонстрационные дисплеи. Вьюер позволяет обмениваться содержимым буфера (clipboard) с сервером, что можно использовать для рассылки данных измерений и пр.

VNC Server , установленный в приборе, может быть сконфигурирован в пункте **System-Misc Setup-Network Setup – VNC Server Configuration**. Доступны следующие опции –

- установка пароля доступа к серверу;
- выбор порта, по которому осуществляется HTTP протокол обмена данными;
- тип доступа – можно позволить доступ только с указанных локальных машин в сети (Access Control);

- ограничение активности клиентов от мыши, клавиатуры, возможности обмена по буферу (clipboard updates), полное отключение ввода команд от локальных клиентов.

## **1.8. Задание и указания к выполнению лабораторной работы**

Перед выполнением лабораторной работы необходимо изучить описание прибора и методик его использования, изложенные в разделах 3-7 описания.

### *1. Калибровка и подготовка прибора к работе*

Включите прибор и установите максимальный диапазон качания частоты 300 кГц . . 3 ГГц. Подключите соединительные кабели и проведите стандартную калибровку прибора в максимальной полосе частот.

Включите один канал прибора (см. п.3.1) и установите максимальную полосу обзора (п. 3.2). Проведите стандартные типы калибровки, предусмотренных для прибора E5062A и описанных в п. 4 описания лаб.работы:

- Калибровка источника сигнала для исключения погрешностей, связанных с неидеальной направленностью ( $E_d$ ) и неравномерностью ЧХ канала отражения( $E_r$ ). Для калибровки войдите в пункт меню Calibrate и используйте оконечные нагрузки: K3 для пункта подменю Calibrate-Response(Short) и XX для пункта Calibrate-Response (Open). Для большей точности отсчета фазы устанавливайте нагрузки на конце соединительного кабеля. Результаты калибровки контролируйте по индикатору калибровки канала Calibration- Property –On (Off).
- Калибровка коэффициента передачи для исключения погрешностей, связанных с несовершенной изоляцией ( $E_x$ ) и неравномерностью ЧХ канала передачи ( $E_t$ ). Используйте прямое соединение портов прибора через кабели и разъемный переход. Результаты калибровки контролируйте по индикатору калибровки канала Calibration- Property –On (Off).

Прибор откалиброван в максимальной полосе частот и готов к работе.

## *2. Исследование проходного СВЧ резонатора*

Для наблюдения частотной характеристики резонатора включите его на проход и выведите в окно графики модуля (дБ) и фазы коэффициента передачи S21 во всей полосе частот (пункты меню Meas, Format - см. п.3.3). Выберите удобный для наблюдения масштаб графиков (пункт Scale). Сохраните скриншот графика (System-Dump Screen Image) в инвертированном виде (Display-Invert Color-On - см. п.6) в файл на внешнем USB –диске.

Определите частоту первого резонанса и настройте канал на работу вблизи этой частоты. Сделать это удобнее с помощью маркеров. (Использование маркеров подробно описано в п.5). Установите маркер слева от АЧХ резонатора и сделайте эту частоту начальной. Также поступите и с конечной частотой. Затем выведите и поместите опорный маркер (Ref Marker) в максимум АЧХ (Marker-Search-Max).

Включите логарифмический масштаб графика S21 по вертикали. Активируйте маркеры 1 и 2 а и поместите их на 3 дБ ниже максимума АЧХ. Отсчитайте рабочую полосу резонатора по уровню -3 дБ. Включите автоматический поиск полосы пропускания (Marker-Search- Bandwidth – On) по уровню -3 дБ и проверьте полученный результат. Запишите полученные данные резонатора (резонансная частота, полоса , добротность). Сохраните скриншот графика АЧХ и численные данные АЧХ и ФЧХ (Save Trace Data). По численным данным программой Excel постройте результаты измерений.

Проверьте влияние калибровки на АЧХ резонатора. Выключите коррекцию калибровки (Calibrate -Correction - Off) и запишите полученную АЧХ в память (Display-Data –Mem). Затем включите корректировку и выведите на график две АЧХ резонатора - при включенной и выключенной калибровке (Display-Data &Mem). Результат зафиксируйте в виде скриншота.

Выведите на экран 4 графика для коэффициента отражения и коэффициента передачи:

- модуль S21
- фаза S21
- КСВН
- круговая диаграмма S11

Подберите удобные для наблюдения масштабы графиков и сохраните результат в виде скриншота (в инверсном цвете – с белым фоном) и в численном виде.

### *3. Исследование полосно-пропускающего СВЧ фильтра*

Установите в измерительный тракт прибора полосовой СВЧ фильтр. Проведите анализ его АЧХ в максимальной полосе качания и определите рабочую область частот фильтра. Включите маркер и с его помощью установите начальную и конечную частоты обзора (Marker Function-Marker-Start/Stop). Постройте в активном канале частотные характеристики модуля S21 в логарифмическом масштабе, фазу S21 в разных форматах (Phase, Expand Phase, Positive Phase а также групповое время запаздывания фильтра Group Delay), КСВН (SWR) и диаграмму Смита для коэффициента отражения S11. Сохраните данные в файле и скриншоте.

Во втором канале получите два графика – модуля S21 и КСВН в полосе частот, соответствующих полосе пропускания фильтра (в диапазоне S21 0 – 3 дБ и КСВН не более 4...5). Для работы второго канала его надо запустить ((Trigger-Continuous ), так как при создании канала по умолчанию он находится в задержанном (Hold) состоянии. Сохраните данные в файле и сделайте скриншот экрана канала.

С помощью маркеров измерьте полосу пропускания фильтра по уровню -3 дБ от максимума и по уровню КСВН=2.5. Используйте как один маркер так и два маркера в режиме Ref Marker Mode – On. Включите режим

Bandwidth - On и определите параметры фильтра в полосе пропускания по характеристике S21 и KCBH. Получите статистические параметры графиков (Statistics, Flatness, RF Filter Stats – On/Off – см. п.5).

*4. Работа в сети (по указанию преподавателя).*

Исследуйте работу прибора в сети. Для этого просмотрите сетевые установки прибора и, при необходимости, скорректируйте их (Network Setup – Network configuration, Network Identification). Проверку корректности подключения к сети проведите в пункте LAN Dialog.

Включите Web Server и проверьте установку параметров VNC Server. Запустите на компьютере Internet Explorer и откройте веб-страничку прибора по его IP-адресу.

Просмотрите пункты конфигурации прибора в сети и получите изображение экрана. Запустите VNC viewer (Browser Web Control) и опробуйте удаленный режим управления прибором.

### **Содержание отчета по лабораторной работе**

Отчет по лабораторной работе должен содержать описание последовательности действий при калибровке и измерении параметров резонатора и фильтра, набор скриншотов и таблиц численных данных измерения и построенные по этим данным графики комплексных коэффициентов отражения и передачи, краткие выводы.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛАНСНОГО СВЧ СМЕСИТЕЛЯ

В лабораторной работе студенты знакомятся с работой балансного смесителя СВЧ диапазона, методикой измерения его параметров с помощью анализатора спектра (АС).

### 2.1. СВЧ смесители и их параметры

В радиоприемниках СВЧ, в измерительных приборах (анализаторах спектра, частотомерах и пр.) входной сигнала с помощью *преобразователя частоты* переносится на более низкую *промежуточную частоту* (ПЧ). На этой частоте осуществляется основное усиление сигнала и измерение его параметров. Таким образом, от параметров преобразователя частоты зависит степень искажения исходного сигнала и погрешности его измерения.

Структурная схема преобразователя частоты представлена на рис. 2.1.

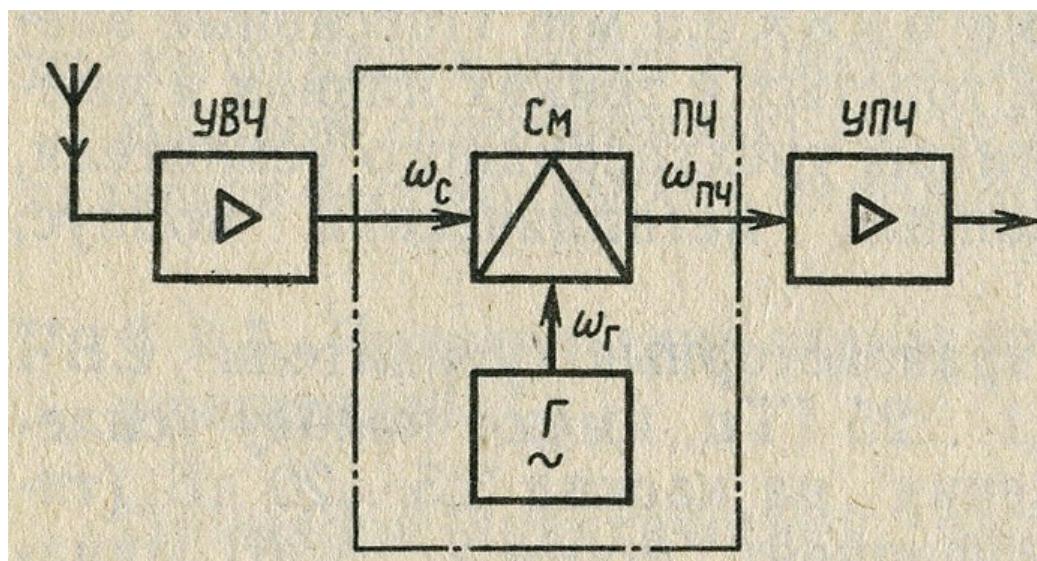


Рис. 2.29. Структурная схема преобразователя частоты

Преобразователь частоты состоит из смесителя СВЧ (обычно на основе СВЧ диода) и гетеродина - маломощного генератора СВЧ, а также фильтра, выделяющего из выходной смеси сигнал, имеющий нужную промежуточную частоту. Мощность сигнала гетеродина значительно выше мощности входно-

го сигнала. Преобразование частоты сигнала происходит за счет нелинейности характеристик смесительного диода, в качестве которого используют точечно-контактные диоды (ТКД) и диоды с контактом Шотки (ДШ). Последние обладают более крутой ВАХ, лучшей электрической и механической прочностью, однако требуют значительной мощности гетеродина. Иногда в смесителях используют обращенный туннельные диоды (ОД), у которых используется обратная ветвь ВАХ (рис. 2.2)

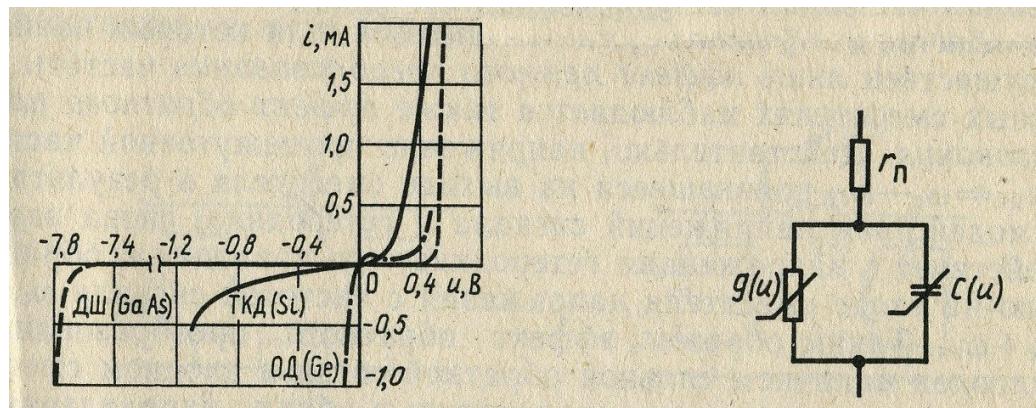


Рис. 2.30. Вольтамперные характеристики смесительных диодов и их эквивалентная схема

Упрощенная эквивалентная схема смесительного диода содержит со- противление потерь  $r_n$ , нелинейную паразитную емкость  $C(u)$  и нелинейную проводимость барьера слоя диода  $g(u)$ . Эффект преобразования частоты связан с этой проводимостью, поэтому смесительные диоды по сути являются *варисторами* – нелинейными резисторами.

Схема однотактного СВЧ смесителя приведена на рис 2.3 а, а его эквивалентная схема – на рис.2.3 б.

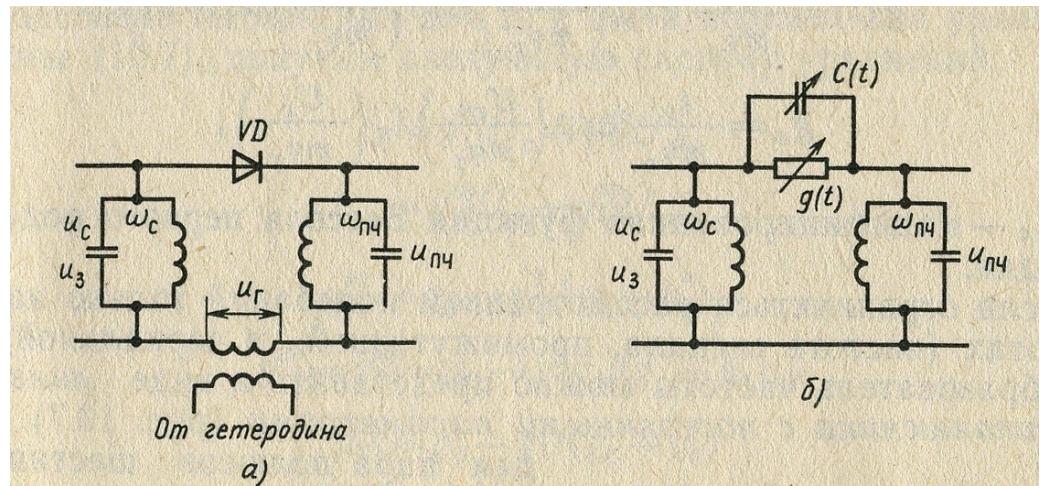


Рис. 2.31. Электрическая (а) и эквивалентная (б) схемы смесителя

Колебания сигнала и гетеродина суммируются и подаются на смесительный диод. ВАХ диода можно аппроксимировать степенным рядом. Поскольку для входного сигнала диод представляет собой параметрическое устройство, смеситель осуществляет линейное преобразование спектра. В спектре тока диода имеется постоянная составляющая  $I_0$ , а также многочисленные комбинационные составляющие  $\pm m\omega_c \pm n\omega_g$ , где  $m$  и  $n$  – целые числа. На выходе смесителя фильтр выделяет основной продукт преобразования – разностную промежуточную частоту  $\omega_{\text{ПЧ}} = \omega_c - \omega_g$ . Такой вариант смесителя называют «смеситель с верхней боковой полосой». Возможен и другой вариант – выделение частоты  $\omega_{\text{ПЧ}} = \omega_g - \omega_c$  (смеситель с нижней боковой полосой).

Кроме полезного сигнала ПЧ, в спектре тока диода примерно такую же амплитуду будет иметь компонента суммарной частоты  $\omega_s = \omega_g + \omega_c$  (рис. 2.4).

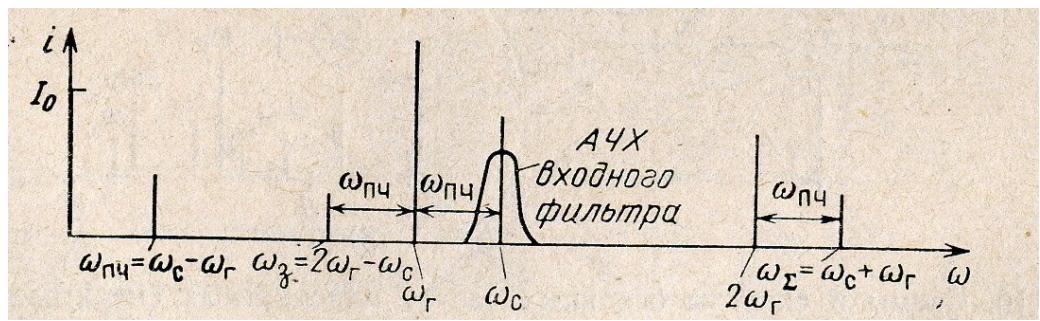


Рис. 2.32. Спектр комбинационных составляющих смесителя с верхней боковой полосой

Кроме этой составляющей, которую относительно просто отфильтровать на выходе, в спектре присутствует зеркальная частота  $\omega_3 = 2\omega_r - \omega_c$ . Она образуется в результате взаимодействия сигнала с удвоенной частотой гетеродина. Отметим, что зеркальная частота совпадает с частотой «зеркального» канала приема преобразователя частоты. Сигнал зеркальной частоты образуется на входе смесителя также в результате обратного преобразования  $\omega_3 = \omega_r - \omega_{\text{пч}}$  из-за взаимодействия сигнала ПЧ и сигнала гетеродина. Взаимодействие между колебаниями сигнальной и зеркальной частот оказывает существенное влияние на потери преобразования диодного смесителя.

Характеристики преобразования улучшаются при подавлении зеркальной частоты. Подавление внешних сигналов зеркального канала позволяет улучшить избирательность преобразователя, подавление комбинационных составляющих самого смесителя уменьшает потери преобразования и снижает уровень паразитного излучения гетеродина. Если на входе смесителя существует узкополосный фильтр-преселектор, настроенный на частоту сигнала, то на зеркальной частоте его входная проводимость мнимая. В результате не поглощается мощность на зеркальной частоте и несколько увеличивается коэффициент преобразования смесителя. Кроме того, эффективно подавляются помехи на частоте зеркального канала. Если же входная цепь смесителя относительно широкополосна (полоса больше  $2\omega_{\text{пч}}$ ), то условия для

основной и зеркальной частоты примерно равны и подавления зеркального канала не происходит.

В сантиметровом диапазоне однотактные смесители имеют потери преобразования 7...10 дБ. Главным недостатком однотактных смесителей является преобразование шумов гетеродина на частоту ПЧ. Составляющие спектра шума гетеродина с частотами основного и зеркального каналов, взаимодействуя в смесительном диоде с колебаниями гетеродина, попадают в полосу пропускания УПЧ.

Для уменьшения влияния шумов гетеродина применяются балансные смесители различного типа: двухдиодные, двойные балансные, кольцевые и двойные кольцевые. Рассмотрим двухдиодный балансный смеситель (рис.2.5)

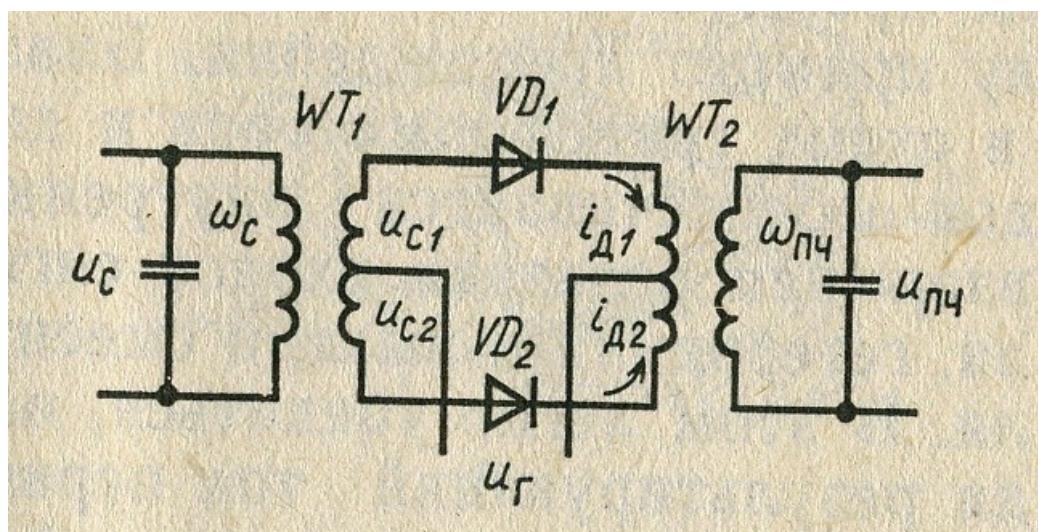


Рис. 2.33. Двухдиодный смеситель

Он содержит два диода, которые включены таким образом, что токи их в первичной обмотке выходного трансформатора направлены встречно. Напряжение гетеродина подается на диоды синфазно, а напряжение сигнала - противофазно. Токи сигнала ПЧ поэтому тоже противофазны и их магнитные потоки складываются в выходном трансформаторе. Составляющие с частотой гетеродина создают противофазные потоки и на выходе взаимокомпенсируются.

Балансная схема имеет меньший коэффициент шума, вся мощность гетеродина поступает на диоды, что позволяет уменьшить уровень сигнала гетеродина. Схема обеспечивает малые потери входного сигнала в цепях гетеродина из-за высокой развязки мостовых схем и имеет типовой потери преобразования в пределах 5...8 дБ. Интересно, что при выходе из строя одного диода схема остается работоспособной, только падает уровень выходного сигнала.

Более высокой избирательностью по прямому каналу имеют кольцевые смесители (рис.2.6)

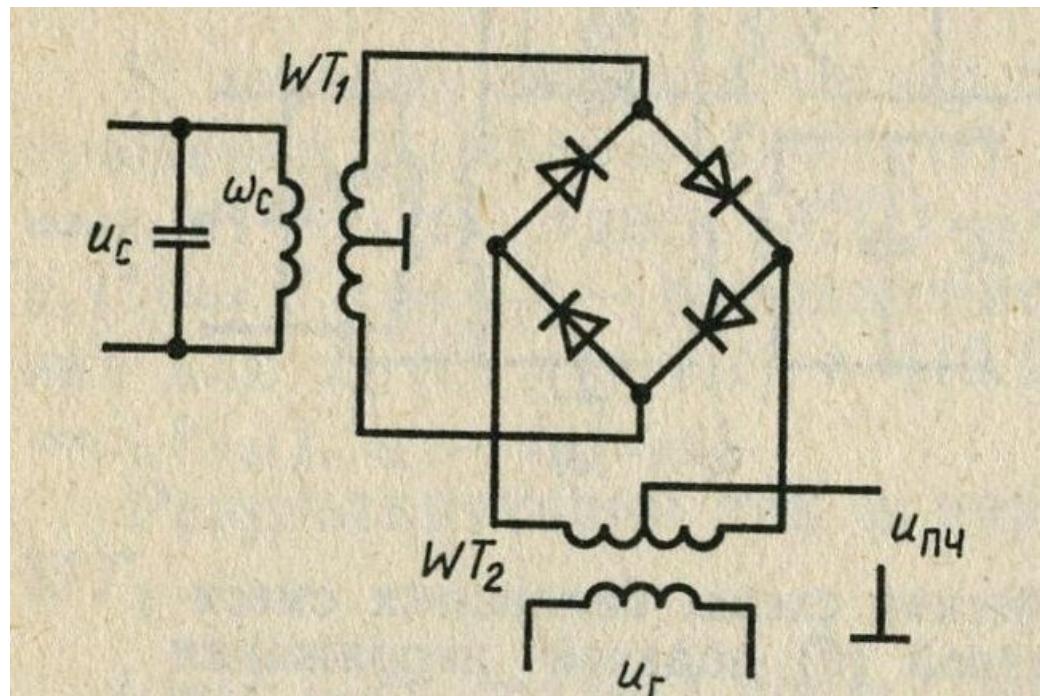


Рис. 2.34. Кольцевой балансный смеситель

Благодаря симметрии трансформаторов и диодов обеспечивается высокая развязка входов сигнала, гетеродина и выхода ПЧ, малый уровень потерь сигнала и гетеродина, подавление зеркального канала приема. Есть варианты схем, позволяющие реализовать фазовое подавление сигнала зеркальной частоты (двойной кольцевой смеситель). При этом удается получить такие же низкие потери преобразования, что и в обычной кольцевой схеме, но в гораздо большей полосе частот.

## **2.2.Анализаторы спектра СВЧ радиосигналов**

В диапазоне СВЧ наблюдение формы сигнала (зависимости его во времени) не позволяет получить полную информацию о нем. Так, осцилограмма радиосигнала с частотной модуляцией практически мало отличим от синусоидального сигнала, наличие в составе сигнала дополнительных гармонических составляющих маскируется большой величиной гармоники несущей частоты и пр. Анализ спектральных характеристик радиосигналов в диапазоне СВЧ более информативен и позволяет измерить его мощность, частоту, коэффициент модуляции и пр. Практически анализатор спектра в СВЧ диапазоне является таким же универсальным прибором для исследования радиосигналов, каким на низких частотах является осциллограф.

Напомним спектральные характеристики радиосигнала. Для сигнала  $u(t)$  вводят *спектральную функцию* (или *спектральную плотность*), определяемую прямым преобразованием Фурье

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-i\omega t} dt$$

Эта функция комплексная, имеет размерность В/Гц и представляет распределение амплитуд и фаз гармонических составляющих по частотной оси. Спектральная функция существует при абсолютной интегрируемости функции сигнала. Для реальных сигналов это условие обычно всегда выполняется.

Спектральная функция – это функционал уже закончившегося процесса (интеграл берется до «бесконечного» времени). В реальных условиях измерять можно только *текущий частотный спектр*

$$S(\omega, t) = \int_{-\infty}^t u(t)e^{-i\omega t} dt,$$

характеризующий незаконченный процесс. Чаще измеряют модуль этого выражения – его называют *амплитудной спектральной функцией* или *ам-*

*амплитудным спектром* сигнала. Фазу измерить сложнее, поэтому в стандартных измерительных задачах этого не делают.

Для периодических бесконечных сигналов спектральная функция представляет собой последовательность дельта-функций, смещенных друг относительно друга на частоту повторения сигнала. Для этого случая используют спектральное представление в виде ряда Фурье:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t + \varphi_n\right)$$

где Т – период повторения сигнала ( $u(t \pm kT) = u(t), k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ).

Ряд Фурье представляет собой совокупность гармонических колебаний с кратными частотами. Составляющая с нулевой частотой  $U_0$  является постоянной составляющей сигнала. Последовательности амплитуд  $U_n$  и начальных фаз  $\varphi_n$  гармоник представляют собой *амплитудный* и *фазовый спектры* периодических сигналов.

Особый класс сигналов, который исследуется в спектральном представлении - это шумовые и случайные сигналы. Важной характеристикой шумового сигнала является его спектральная плотность мощности:

$$W(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|S(\omega, T)|^2}{T}$$

Здесь  $S(\omega, T)$  – спектральная плотность реализации случайного процесса на интервале  $[-T/2, T/2]$ . Размерность спектральной плотности мощности  $[В2·с]$  совпадает с размерностью энергии сигнала, поэтому иногда говорят об энергетическом спектре случайного сигнала. Фактически это характеристика распределения мощности случайного сигнала по частоте.

Сформулируем измерительные задачи спектрального анализа сигналов СВЧ. Это определение амплитуд и частот гармонических составляющих периодических сигналов, измерение амплитудной спектральной функции непериодических сигналов и спектральной плотности мощности случайных сигналов.

Стандартные анализаторы спектра СВЧ диапазона строятся преимущественно по принципу последовательного анализа. Спектральные составляю-

щие выделяют узкополосным фильтром. Фактически такой прибор является узкополосным селективным вольтметром с супергетеродинным принципом перестройки по частоте. Используют электронную перестройку частоты и панорамный принцип индикации результата. На выходе фильтра ставят измеритель уровня (квадратичный детектор). Результат измерения подают на отсчетное устройство - осциллографический индикатор.

Структурная схема прибора с последовательным методом анализа представлена на рис. 2.7.

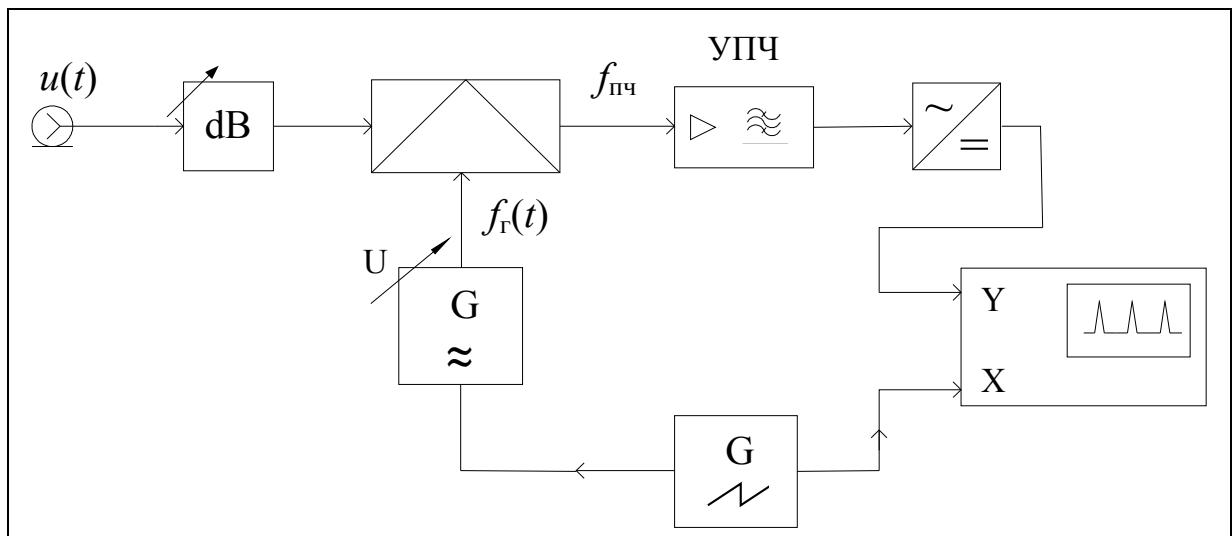


Рис. 2.35. Структурная схема анализатора спектра последовательного типа.

Управление перестройкой частоты гетеродина производится генератором пилообразного напряжения  $u_{\text{упр}}(t)$ . Он задает время анализа  $T_a$ , то есть время, за которое анализатор сканирует заданный диапазон частот спектра (полосу анализа  $\Delta f_a$ ). Этим же напряжением производят горизонтальное отклонение луча осциллографического индикатора. Гетеродин является генератором качающейся частоты (ГКЧ) с постоянной амплитудой и меняющейся по линейному закону частотой:

$$f_c(t) = f_{c_0} + \Delta f_a \frac{u_{\text{упр}}(t)}{U_{\text{упр max}}}$$

Сигнал с ГКЧ поступает на смеситель. Предположим, что на вход анализатора подан синусоидальный сигнал с частотой  $f_c$ . Тогда на выходе смеси-

теля возникают колебания с комбинационными частотами, в том числе с разностной частотой  $f_c - f_r(t)$ . Сигнал с разностной (и меняющейся во времени) частотой подают на вход узкополосного УПЧ, который и производит процедуру частотного анализа спектра. Закон изменения частоты от времени показан на графике рис.2.8, где для наглядности ось времени повернута вниз.

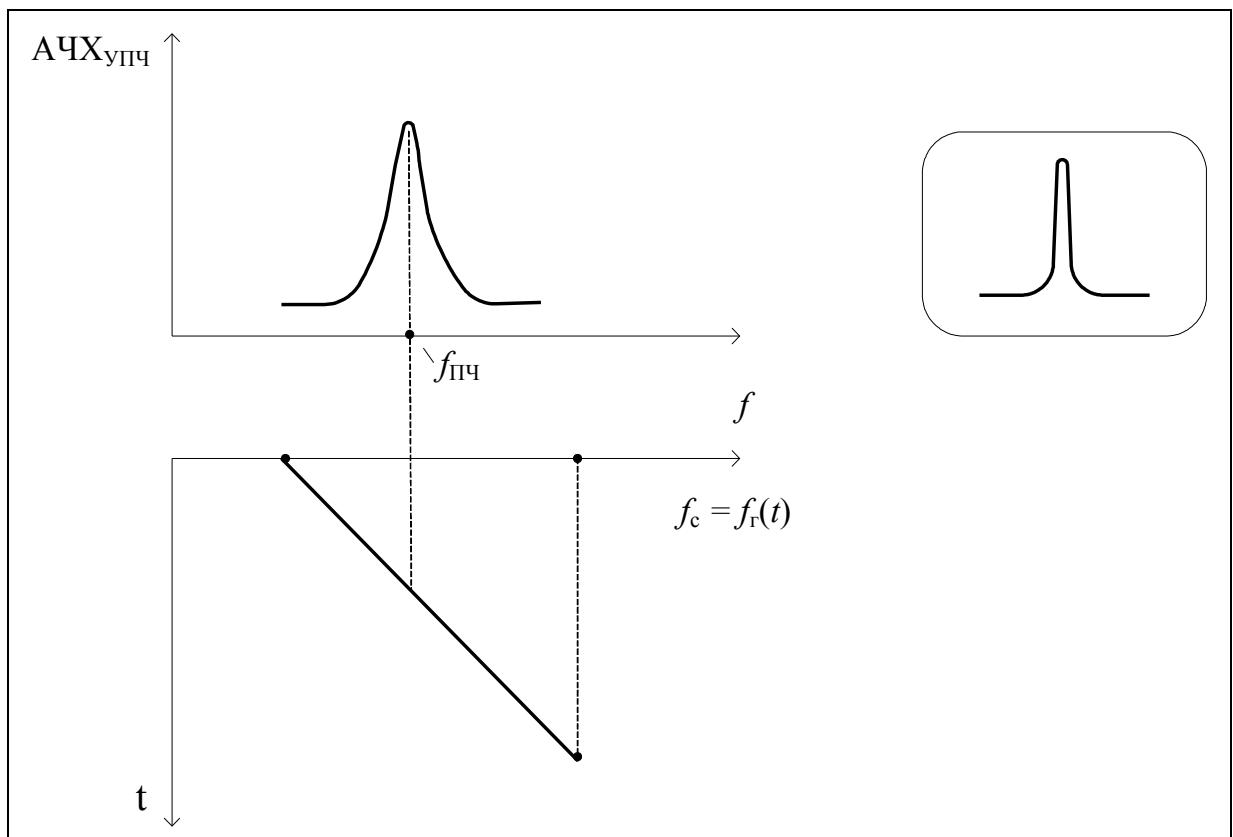


Рис. 2.36. Принцип действия последовательного анализатора спектра

В момент  $t_0$ , когда выполняется  $f_c - f_c(t_0) = f_{ПЧ}$ , на выходе УПЧ появляется радиоимпульс. Его огибающая повторяет форму АЧХ фильтра УПЧ.

Детектор выделяет напряжение (видеоимпульс), повторяющее его огибающую. Этот сигнал поступает на осциллографический индикатор. При наличии в составе спектра сигнала нескольких гармоник, процесс формирования видеоимпульса происходит аналогично, но в разные моменты времени. Совокупность откликов спектроанализатора на каждую гармоническую составляющую входного сигнала называют *спектрограммой*. Величины откликов пропорциональны амплитудам входных гармоник, расположение откликов на оси X соответствует частотам гармонических составляющих входного сигнала.

Отклик повторяет форму АЧХ УПЧ только в статическом режиме, когда изменение частоты происходит медленно по сравнению со скоростью переходных процессов в фильтре. На практике приходится учитывать искажение отклика за счет динамических искажений выходного напряжения фильтра. Степень искажений описывают коэффициентом динамических искажений  $\mu$ , который равен отношению постоянной времени фильтра  $\tau_\phi$  к времени  $\tau_0$  пребывания частоты в пределах полосы пропускания фильтра

$$\boxed{\mu = \frac{\tau_\phi}{\tau_0}}.$$

Постоянную времени можно оценить через полосу пропускания  $\Delta f_{УПЧ}$  фильтра

$$\boxed{\tau_\phi = \frac{1}{A \cdot \Delta f_{УПЧ}}},$$

где  $A = 1..2$  – коэффициент, зависящий от схемы фильтра УПЧ. Время пребывания частоты рассчитывается через скорость изменения частоты ГКЧ

$$\boxed{v_f = \frac{\Delta f_a}{T_a}}$$

и полосу УПЧ

$$\boxed{\tau_0 = \frac{\Delta f_{УПЧ}}{v_f} = \frac{\Delta f_{УПЧ} T_a}{\Delta f_a}}.$$

Коэффициент динамических искажений можно оценить следующим образом:

$$\boxed{\mu = \frac{\Delta f_a}{A \cdot (\Delta f_{VITQ})^2 T_a}}$$

Считают приемлемым режим работы анализатора с  $\mu \sim 1$ .

Отсюда вытекает важное условие неискаженной спектрограммы, устанавливающее связь между временем анализа, полосой анализа и полосой пропускания УПЧ:

$$\boxed{T_a \geq \frac{\Delta f_a}{A \cdot (\Delta f_{VITQ})^2}}$$

При широкой полосе анализа и узкой полосе пропускания требуемое время анализа может достигать десятков секунд и более. Поэтому в анализаторах спектра применяют запоминание спектрограмм. Полоса пропускания УПЧ делается регулируемой, что позволяет подобрать оптимальное соотношение между временем анализа и формой отклика спектроанализатора. Аналогичные проблемы могут возникнуть при слишком узкой полосе пропускания виделфильтра (сглаживающего сигнал после детектора). Поэтому выбор времени анализа, полосы УПЧ (радиофильтра) и полосы видеофильтра при заданной полосе обзора спектра - задача компромиссная и требующая определенного опыта.

Искажают спектрограмму и помехи, которые попадают на выход анализатора по зеркальному каналу. Напомним, что для преобразования частоты характерно наличие паразитного зеркального канала прохождения сигнала. Кроме полезного сигнала с разностной частотой  $f_c - f_r(t) = f_{UPC}$ , в полосу пропускания УПЧ попадает сигнал с частотой, ниже частоты гетеродина на значение промежуточной частоты  $f_r(t) - f_c = f_{UPC}$ . Этот канал является «зеркальным» для анализатора спектра. Гармоника с частотой зеркального канала создаст паразитный отклик, накладывающийся на полезный. Для исключения паразитных сигналов необходимо осуществлять фильтрацию сигнала на входе анализатора. Это можно сделать электрически перестраиваемым фильтром, настроенным на частоту полезного сигнала (преселектор). В диапазоне СВЧ такой фильтр реализуют на ЖИГ-резонаторах с электронной

перестройкой. Требования к таким фильтрам достаточно жесткие – синхронность перестройки с гетеродином, постоянство коэффициента передачи при перестройке, малый уровень шумов, высокая линейность.

Чаще используют неперестраиваемые полосовые фильтры, пропускающие весь рабочий диапазон частот спектроанализатора. При этом для лучшего частотного разделения полезного и зеркального каналов выбирают высокое значение промежуточной частоты. Однако на высоких ПЧ трудно получить узкие полосы пропускания фильтра. Выход из этого противоречия - использование двойного или тройного преобразования частоты. Частота первой ПЧ выбирается, исходя их требований подавления зеркального канала, частота последней ПЧ – с точки зрения простоты реализации узкополосного фильтра.

Измерение параметров спектра производят по спектrogramме. Амплитуды (уровни) спектральных составляющих измеряют обычно методом калиброванных шкал (аналогично осциллографу). Вертикальная калибруется в единицах напряжения ( мощности), относительного или абсолютного уровня в дБ. Для точного измерения частоты гармоник метод калиброванных шкал не подходит из-за низкой стабильности установки частотного диапазона спектроанализатора. Вместо этого используют метод частотных меток. На вход анализатора вместе с исследуемым сигналом от встроенного или внешнего калибратора подают радиоимпульсы, частота повторения которых стабилизована кристаллом. Спектр импульсов содержит гармоники, расстояние между которыми равно образцовой частоте повторения. Отклики на эти гармоники образуют частотные метки на экране анализатора. Меняя частоту несущей радиосигнала, можно перемещать спектр сигнала калибратора в пределы полосы обзора. Сравнивая исследуемый и образцовый сигналы, по масштабной сетке проводят измерение частот гармоник. Другой способ – поставить на вход синусоидальный сигнал с известной частотой. На экране он создаст одиночную частотную метку. Перемещая ее по изображению, добиваются совпадения метки с исследуемыми гармониками сигналом. В ряде слу-

чаев используют метод стоп-метку со встроенным электронно-счетным частотометром.

### **2.3.Краткие технические данные анализатора спектра GSP -827 и его структурная схема**

В лабораторной работе используется СВЧ анализатор GSP -827, который имеет рабочий диапазон частот 0... 2,7 ГГц. Прибор имеет малые габариты, массу около 4,5 кг, работает как от сети, так и от батарей (рис.2.9).



Рис. 2.37. Анализатор спектра GSP -827

Анализатор спектра GSP-827 предназначен для исследования спектров периодически повторяющихся радиоимпульсов и непрерывных сигналов:

- Определение уровня и частоты гармонических сигналов;
- Наличие паразитных амплитудной и частотной модуляции;
- Определение соотношения гармонических составляющих в спектрах сигналов сложной формы;
- Для импульсных сигналов: измерение частоты несущей и ширины лепестков спектра, оценку длительности импульса и искажения его формы по виду спектра.

Основные параметры анализатора спектра GSP-827 приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Наименование параметра	Значение	Погрешность
Диапазон частот	9 кГц - 2,7 ГГц	Определяется опорным источником частоты
Полоса обзора	0 Гц, 2 кГц - 2,5 ГГц	Определяется опорным источником частоты
Опорный источник частоты	10 МГц	0,001%
Полоса пропускания	3 кГц, 30 кГц, 300 кГц, 4 МГц	±15%
Входное сопротивление	50 Ом	КСВН не более 1,5
Диапазон входных уровней сигнала	-100...+20 дБмВт	Неравномерность АЧХ: ±1,5 дБ Линейность шкалы: ±1,5 дБ
Спектральная плотность шумов	-130 дБмВт/Гц	
Интермодуляционные и негармонические искажения	Менее (-60 дБ) относительно несущей	

Вход ВЧ имеет разъем N-типа; 50 Ом; КСВН < 1,5 при относительном опорном уровне 0 дБм. Максимальный уровень входного сигнала +30 дБм, постоянное напряжение не более 25 В. Относительный опорный уровень может быть установлен в пределах -30...20 дБм.

Анализатор GSP-827 способен проводить сканирование полосы обзора за 100 мс, что снижает вероятность ошибок при исследовании непериодических меняющихся сигналов. Время анализа регулируется в пределах 100 мс...25,6 с. Полоса пропускания УПЧ – от 3 кГц до 4 МГц (меняется дискретно). Полоса видеофильтра регулируется в пределах 10 Гц...1 МГц.

Прибор имеет низкий уровень собственных фазовых шумов. Плотность фазовых шумов составляет -85 дБс/Гц на частоте 1 ГГц при отстройке от несущей на 20 кГц. Уровень вносимых гармонических искажений < -60 дБ при

входном уровне не превышающем – 40 дБм и интермодуляционных искажений 3-го порядка < -70 дБ при входном уровне –40 дБм.

Прибор обеспечивает дополнительные функциональные возможности:

- Измерение мощности в канале и соотношения мощностей в смежных каналах, измерение пропускной способности канала связи;
- Разделение окна для одновременного измерения при двух различных полосах обзора;
- Обработку спектрограмм (поиск пикового значения; накопление; замораживание; математическую обработку);
- Маркерные измерения (до 10 маркеров);
- Анализ по шаблону: задание верхней/нижней границы с индикацией «Годен – Негоден»;
- Запись результатов и профилей установок в энергонезависимую память (до 100 спектрограмм и профилей);

#### **2.4. Описание лабораторной установки**

Исследуемый смеситель (рис.2.10) представляет собой гибридную интегральную схему производства фирмы Mini-Circuits ([www.minicircuits.com](http://www.minicircuits.com)) типа SYM-25DHW.

Этот смеситель имеет широкий рабочий диапазон (80 ... 2500 МГц),

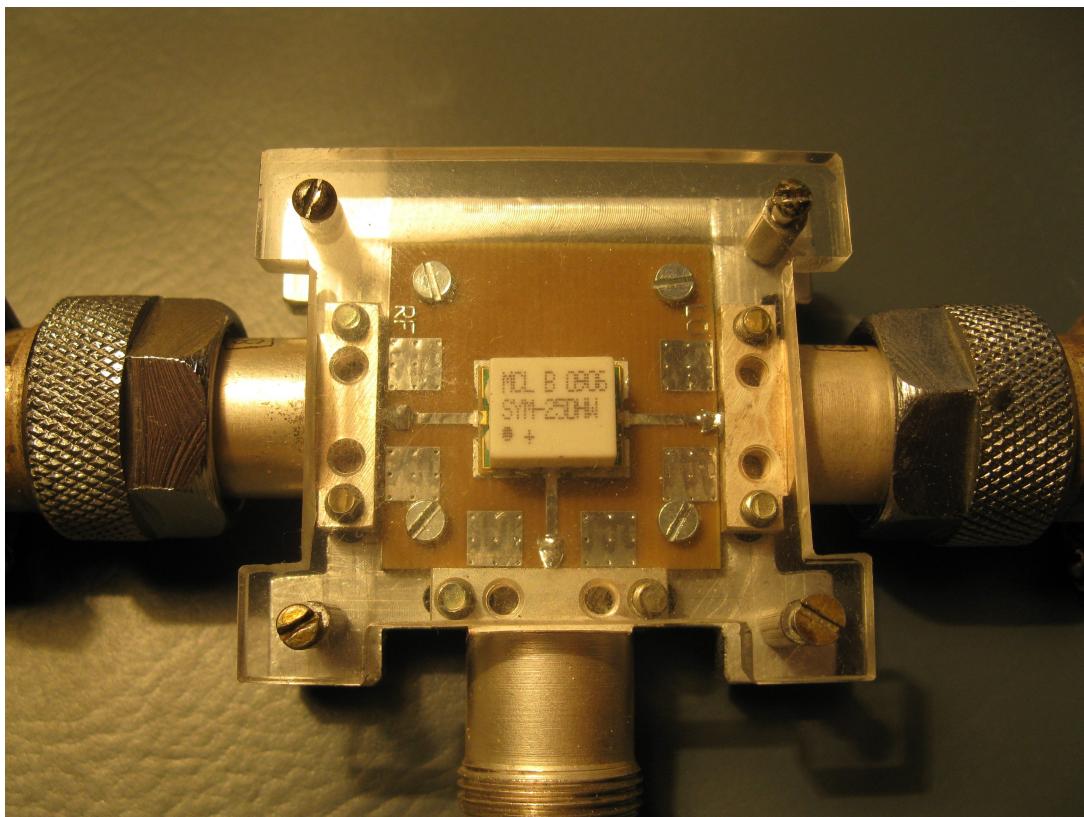


Рис. 2.38. СВЧ смеситель – общий вид

возможные частоты на выходе ПЧ - 0...1000 МГц, малые потери преобразования (6,4 ...9 дБ), высокую линейность (коэффициент IP3 порядка 30 дБм). Развязка входной цепи (RF) и гетеродина (LO) 25...46 дБ, гетеродина и выхода ПЧ – порядка 36 дБ, КСВН входа RF – порядка 2. Номинальный уровень мощности гетеродина - 17 дБм (порядка 50 мВт).

Электрическая схема соответствует двойному балансному смесителю с двумя диодными мостами и симметрирующими трансформаторами (рис.2.11)

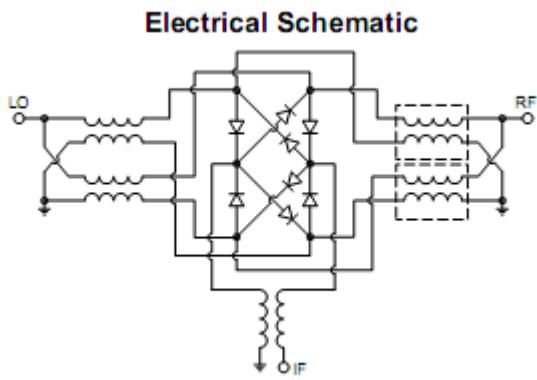


Рис. 2.39. СВЧ смеситель – электрическая схема

Для фильтрации входных и выходных сигналов используются внешние селективные цепи. В лабораторной работе для выделения сигнала ПЧ используется коаксиальный фильтр низкой частоты с частотой среза 800...900 МГц. Для исследования смесителя используется два измерительных СВЧ генератора и анализатор спектра GSP-827.

## **2.5. Задание и указания к выполнению лабораторной работы**

### *1. Измерение полного спектра комбинационных составляющих*

Соедините кабелем ВЧ вход анализатора с разъемом выхода промежуточной частоты смесителя. Подключите генератор сигнала гетеродина к разъему LO, а генератор входного сигнала – к разъему RF смесителя.

Включите анализатор длительным нажатием кнопки СЕТЬ. Установите следующие параметры спектроанализатора: полоса обзора – полный диапазон (Full Span), полоса пропускания фильтра УПЧ (RBW) = 4 МГц, полоса видеофильтра (VBW) = 30 кГц, отсчетный уровень спектrogramмы (RefLevel) = 0 dBm, шкала спектrogramмы (Unit) в логарифмических единицах мощности относительно 1 мВт (dBm), цена деления (Scale) – 10 dBm.

Подайте от гетеродина сигнал с частотой 900 МГц и уровнем +17 дБм. Установите частоту входного сигнала 1000 МГц, уровень 0 дБм, что соответ-

ствует работе смесителя с верхней боковой полосой. На выходе ПЧ, кроме преобразованного сигнала с частотой 100МГц, появятся и комбинационные составляющие типа  $\pm m \cdot f_c \pm n \cdot f_r$ .

Амплитудный спектр полного сигнала в диапазоне до 2,7 ГГц можно наблюдать на экране спектроанализатора. Зарисуйте вид спектра. По калиброванной шкале уровня сигнала оцените величины его гармонических составляющих. Результаты занесите в таблицу по форме 1. С помощью маркера (электронной метки) проведите точное измерение мощностей и частот гармоник. Для этого включите одиночный маркер (Marker – ON, MM mode-OFF), режим маркера – Normal. На экране появится один маркер, обозначенный точкой в кружочке. Переведите его на пик спектра (Поиск Пика -To Peak). При необходимости подстройте положение маркера на максимум отклика колесом прокрутки. Частота и уровень спектра в точке расположения маркера выведены в правой верхней части экрана. Запишите частоту гармоники и уровень мощности в дБм и занесите полученные результаты в таблицу 1. Определите индексы комбинационной частоты  $m,n$  для каждой гармонической составляющей спектра.

Повторите измерения амплитудного спектра комбинационных составляющих для режима работы смесителя с нижней боковой полосой. Для этого подайте от гетеродина сигнал с частотой 1100 МГц, которая выше частоты сигнала на величину  $\Delta f = 100\text{МГц}$ , и проведите описанные выше измерения.

## *2. Измерение коэффициента ослабления смесителя в диапазоне частот*

Измерьте коэффициент преобразования смесителя на частотах 500...2500МГц.

Подключите на выход смесителя фильтр НЧ для подавления высших комбинационных составляющих. Получите на экране отклик сигнала ПЧ в крупном масштабе. Для этого установите метку на отклик сигнала ПЧ  $f = 100$  МГц и сделайте его частоту центральной частотой полосы обзора (Mkr->Center). Установите следующие параметры спектроанализатора: полоса об-

зора (Span) – 10 МГц, полоса пропускания фильтра УПЧ (RBW) = 30 кГц, полоса видеофильтра (VBW) = 3 кГц.

Установите маркер на вершину отклика ПЧ и измерьте его уровень. Учитывая, что уровень входного сигнала 0дБм, уровень отклика будет равен коэффициенту преобразования смесителя.

Проведите измерение коэффициента преобразования на частотах сигнала 500, 1000, 1500, 2000, 2500 МГц. На каждой частоте сигнала устанавливайте частоту гетеродина дважды: на 100 МГц больше и меньше, чем частота сигнала. Результаты измерений сведите в таблицу по форме 2. Постройте график зависимости коэффициента преобразования от частоты для режимов верхней и нижней боковых полос.

### *3. Исследование преобразования частоты модулированных сигналов*

Установите следующие параметры спектроанализатора: полоса обзора (Span) – 100 МГц, полоса пропускания фильтра УПЧ (RBW) = 3 кГц, полоса видеофильтра (VBW) = 3 кГц.

Установите на генераторе СВЧ сигнала режим амплитудной модуляции 100%, частота модуляции – 20 кГц. Получите на экране спектр АМ сигнала на ПЧ=100Мгц и измерьте амплитуды гармонических составляющих. Рассчитайте коэффициент АМ преобразованного сигнала.

Установите режим ЧМ преобразованного сигнала с девиацией 20 кГц и частотой модуляции 1 кГц. Измерьте ширину спектра ЧМ колебания по его огибающей. Для этого удобно использовать режим фиксации максимального значения спектrogramмы (Об.спектра->PkHold->On). Зарисуйте вид огибающей спектра ЧМ сигнала.

## **Содержание отчета по лабораторной работе**

Отчет должен содержать структурную схему установки, таблицы данных и графики измеренных зависимостей.

### **Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте измерительные задачи, решаемые анализатором спектра последовательного типа.
2. Какие особенности имеет измерение спектров в СВЧ диапазоне?
3. Для чего в анализаторах спектра используют двойное или тройное преобразование частоты?
4. Поясните структурную схему последовательного анализатора спектра. Укажите назначение основных блоков прибора.
5. Что такое рабочий диапазон частот и полоса обзора спектроанализатора и чем они отличаются?
6. Как производят измерение амплитуд спектральных составляющих в спектроанализаторах последовательного типа?
7. Как выполняется измерение частоты гармоник в анализаторе спектра?
8. Какие параметры анализатора спектра определяет полоса пропускания УПЧ? В каких случаях ее необходимо подбирать?
9. Что такое прямой и зеркальный каналы спектроанализатора?

### **Рекомендуемые формы таблиц**

Форма 1

Параметр	обозначение комбинационной частоты				
Оценка уровня гармоники, дБм					
Частота гармоники, МГц					
Мощность гармоники $P_n$ , дБм					

Форма 2

Частота сигнала, МГц	Коэффициент преобразования, дБм (верхняя боковая полоса)	Коэффициент преобразования, дБм (нижняя боковая полоса)
500		
1000		
...		

### **3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ СВЧ АТТЕНЮАТОРОВ НА Р-І-Н ДИОДАХ**

В лабораторной работе студенты знакомятся с устройством и принципом действия электрически управляемых микрополосковых СВЧ аттенюаторов (коммутаторов) с полупроводниковыми диодами. Исследуют частотные свойства и регулировочные характеристики трех типов аттенюаторов. Изучаются методы измерения их параметров с помощью автоматизированных анализаторов цепей СВЧ.

#### **3.1. Полупроводниковые управляющие СВЧ диоды.**

Для управления СВЧ сигналами используются коммутационные PIN-диоды. Они представляют собой полупроводниковый элемент, который содержит две сильно легированные р- и n- слои, разделенные высокоомной областью i с электропроводностью собственного типа (база диода). Торцевые слои диода металлизируют и используют в качестве выводов. Два перехода p-i и n-i при приложении обратного напряжения заперты. Диод обладает большим обратным сопротивлением. Схема замещения запертого диода представляет собой конденсатор с параллельным сопротивлением потерь. Емкость диода практически не зависит от СВЧ сигнала, поэтому нелинейность PIN-диода не проявляется в широком диапазоне напряжений. При подаче на диод положительного напряжения смещения переходы отпираются, база диода заполняется свободными носителями ее сопротивление уменьшается. Величина сопротивления диода зависит от тока смещения и меняется в пределах от десятков кОм до единиц и долей Ом. Таким образом, в прямом направлении PIN- диод представляет собой переменный резистор с электрическим управлением. Это свойство используют при создании электрически управляемых коммутаторов и аттенюаторов.

### **3.2. Конструкции полупроводниковых аттенюаторов, используемых в лабораторной работе**

Для изучения микрополосковых аттенюаторов с полупроводниковыми диодами в лабораторной работе исследуются три схемы включения PIN – диодов - последовательная, параллельная и комбинированная. Аттенюатор с последовательным включением диода представляет собой полосковую линию на диэлектрической подложке (рис.3.1).

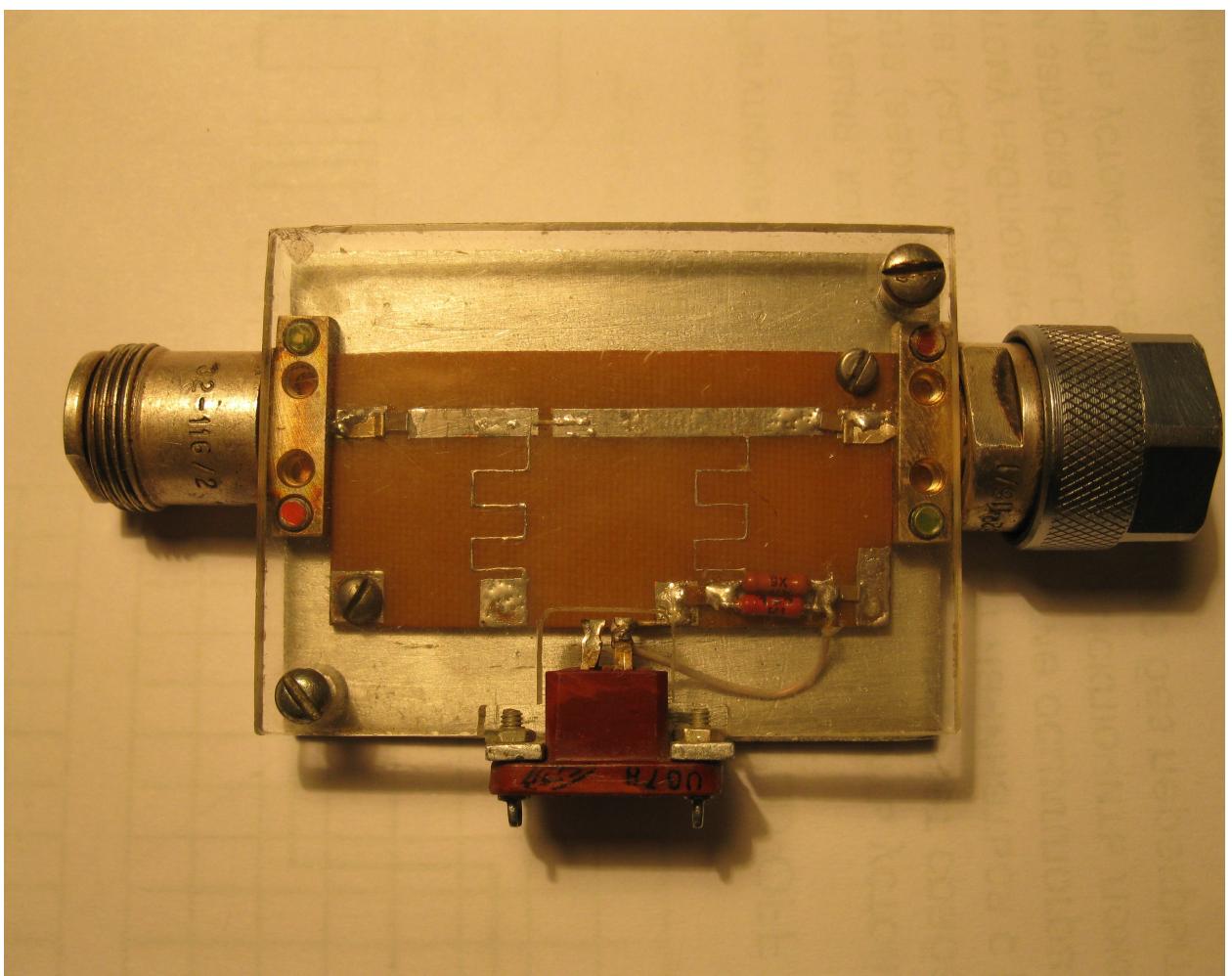


Рис. 3.40. Аттенюатор с последовательным включением диода

Ширина полоска линии 3 мм, что обеспечивает волновое сопротивление 50 Ом. Бескорпусной PIN- диод включен в разрыв полоска. Для подачи на него тока смещения используются две дроссельные меандровые линии, обеспечивающие разделение цепей смещения и СВЧ-сигнала. Для этого слу-

жат также два бескорпусных конденсатора, включенных в разрывы линии у входных разъемов.

Схемотехническая модель такого аттенюатора в среде Microwave Office представлена на рис.3.2. Значения блокировочных емкостей и индуктивность дросселей подобрана ориентировано, значение параметров PIN-диода задано моделью PINDD из библиотеки MWO.

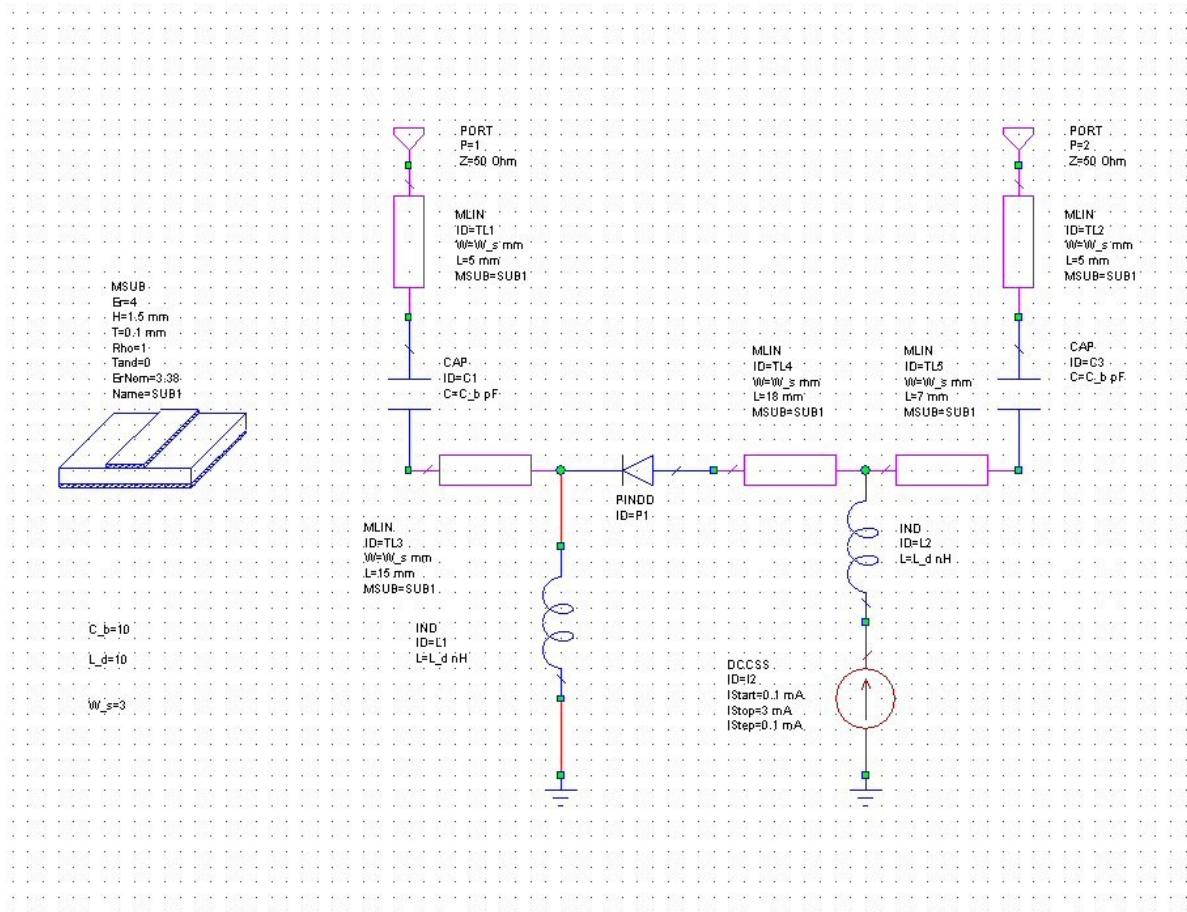


Рис. 3.41. Схема аттенюатора с последовательным включением диода

Параллельное включение диода используют для создания обратной регулировочной характеристики. Сопротивление диода шунтирует линию передачи, поэтому минимальное ослабление вносится при нулевом токе смещения, максимальное – при токе порядка нескольких мА. Вид аттенюатора с параллельным включением диода представлен на рис.3.3 , а его схема – на рис. 3.4

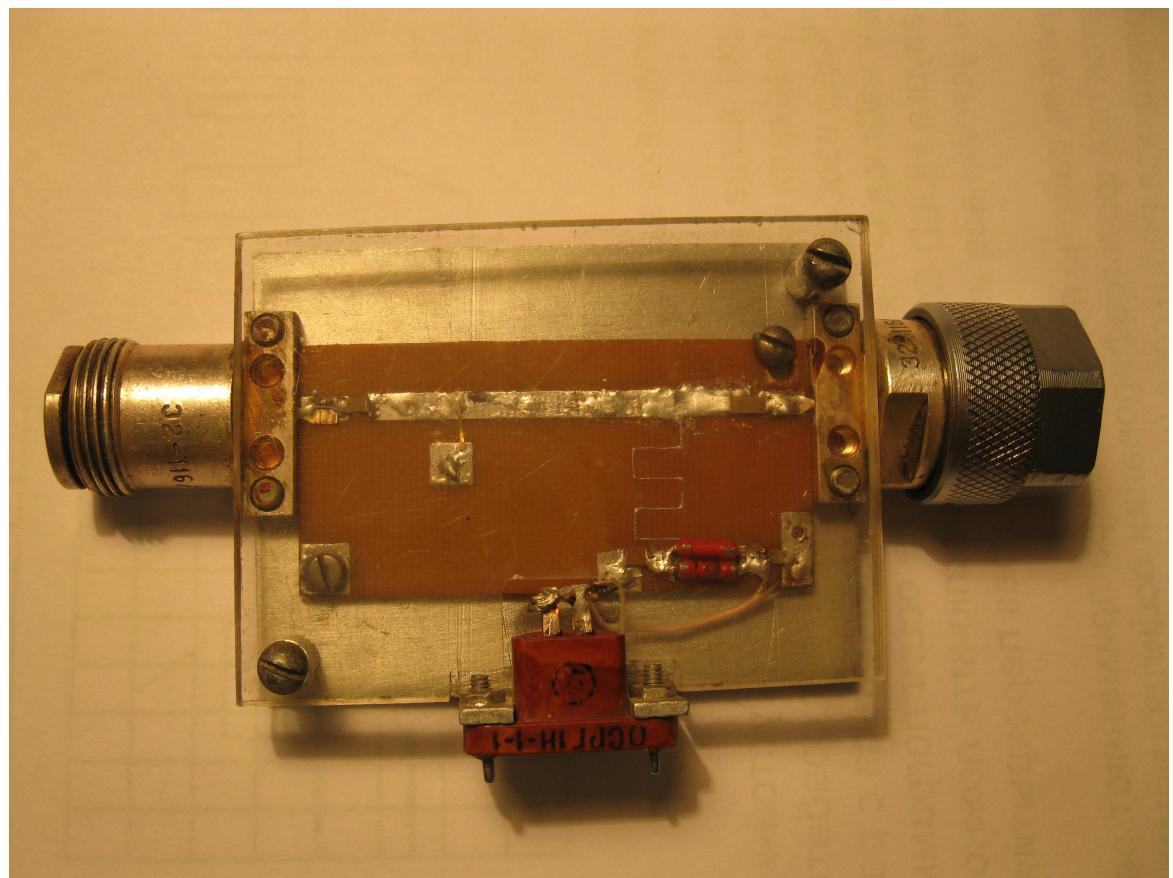


Рис. 3.42. Аттенюатор с параллельным включением диода

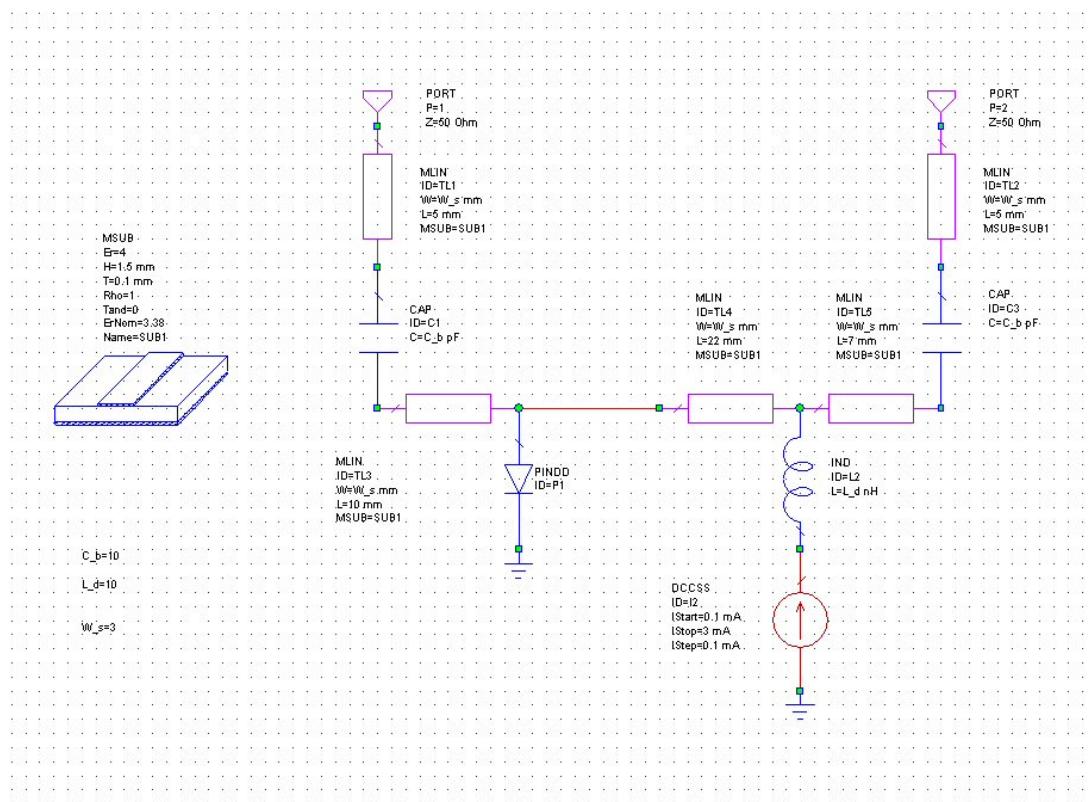


Рис. 3.43. Схема аттенюатора с параллельным включением диода

Для увеличения вносимого ослабления и повышения гибкости управления используют комбинированные схемы включения диодов. На рис. 5 показан вид Г-образного включения двух PIN-диодов. Такая схема позволяет увеличить диапазон изменения ослабления и улучшить согласование аттенюатора.

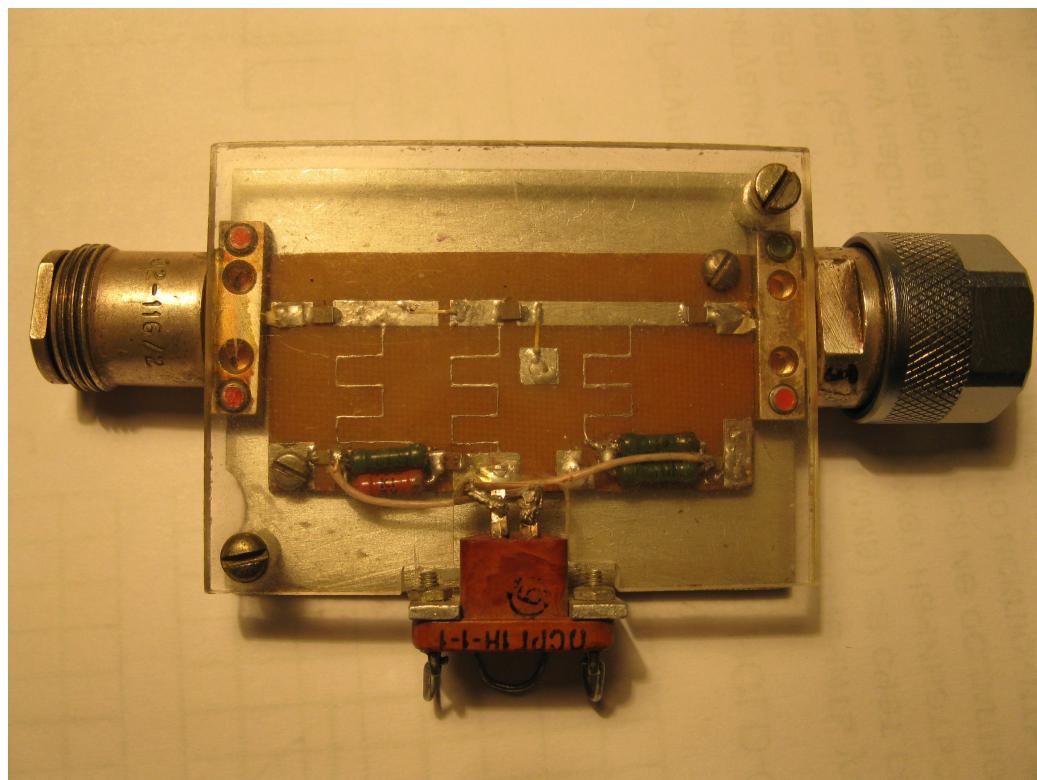


Рис. 3.44. Аттенюатор с двумя диодами

### **3.3. Задание и указания к выполнению лабораторной работы**

В лабораторной работе выполняется исследование частотных характеристик коэффициента передачи (ослабления) аттенюаторов СВЧ на полупроводниковых диодах. Исследуются три конструкции аттенюаторов – с последовательным включением диода, с параллельным диодом и комбинированная схема. Для измерения используется автоматический анализатор цепей СВЧ E5062A. Подробное описание прибора и методы его использования описаны в руководстве по лабораторной работе «Автоматический анализатор параметров СВЧ цепей Agilent E5062A»

#### *1. Подготовка установки к работе*

Включите прибор и установить максимальный диапазон качания частоты. Подключите соединительные кабели и проверьте калибровку прибора в максимальной полосе частот при прямом соединении портов.

Установите один канал измерений и два окна с горизонтальным разделением экрана. Выведите в одно окно модуль коэффициента передачи в логарифмическом масштабе (S21 Log Mag) и КСВН (S11 SWR) в другое. Проведите калибровку прибора по коэффициенту передачи (Thru). Затем подключите образцовые нагрузки КЗ (Short) и ХХ (Open) на порт 1 и проведите калибровку прибора по коэффициенту отражения. Прибор готов к проведению измерений.

#### *2. Измерение частотных характеристик СВЧ аттенюаторов*

Подключите к прибору аттенюатор с последовательно установленным диодом. Измерьте его частотные характеристики (ослабления и КСВН) при максимальном токе через диод (порядка 3 мА) - режим минимального ослабления. Сохраните данные частотных характеристик в файле и сделайте скриншот (в инверсном цвете – с белым фоном).

С помощью маркера измерьте вносимое ослабление на частоте 1 ГГц.

Меняя ток через диод в пределах 0-3 мА, измерьте зависимость ослабления (регулировочная характеристика) и КСВН на частоте 1 ГГц . Запишите данные измерений, по ним постройте регулировочную характеристику.

Используя модель аттенюатора в среде Microwave Office (файл Stripline\_PIN\_1\_ser.emp), рассчитайте и постройте частотные и регулировочные характеристики аттенюатора. Сравните их с измеренными.

Повторите измерения для аттенюатора с параллельным включением диода. Режим минимального ослабления в нем достигается при нулевом токе смещения, максимальное ослабление - при токе порядка 3 мА. Используя модель аттенюатора Stripline\_PIN\_1\_par.emp, рассчитайте и постройте частотные и регулировочные характеристики аттенюатора. Сравните их с измеренными.

В заключение измерьте параметры комбинированного аттенюатора - с параллельным и последовательным включением диодов. Подберите токи смещения так, чтобы получить минимальное и максимальное ослабление на частоте 1 ГГц. Зафиксируйте частотные характеристики для этих двух случаев.

### **Содержание отчета по лабораторной работе**

Отчет по лабораторной работе должен содержать описание последовательности действий при калибровке и измерении параметров СВЧ аттенюаторов, набор скриншотов и таблиц численных данных измерения и расчета в Microwave Office, краткие выводы.

## **4. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КСВ И ОСЛАБЛЕНИЯ ПАНОРАМНЫМ АНАЛИЗАТОРОМ Р2-61**

В лабораторной работе студенты знакомятся с устройством и принципом действия скалярного измерителя параметров СВЧ трактов Р2-61. Изучаются методы использования его для исследования частотных характеристик устройств СВЧ.

### **4.1.Краткие технические данные панорамного измерителя Р2-61 и его структурная схема**

Прибор Р2-61 предназначен для наблюдения на экране осциллографического индикатора частотных характеристик модулей параметров рассеяния волноводных двухполюсников и многополюсников СВЧ и измерения КСВ и ослабления.

Технические данные прибора:

1. Диапазон рабочих частот 8,24 ...12,05 ГГц (волновод 23 x 10 мм);
2. Полоса качания частоты от 120 МГц до полного частотного диапазона.
3. Выходная мощность не менее 1 мВт.
4. Метрологические параметры: диапазон измерения КСВ 1,05 ...5 с погрешностью  $\pm(5 \cdot KCB)\%$ . Диапазон измерения ослабления A 0 ...35 дБ с погрешностью  $\pm(0,05 \cdot A + 0,5)$ , дБ. Погрешность установки частоты не хуже 240 МГц.

Прибор состоит из блока генератора (ГКЧ 61) и измерителя-индикатора Я2Р-67. В состав прибора входит комплект направленных ответвителей с детекторами СВЧ (Рис.4.1)

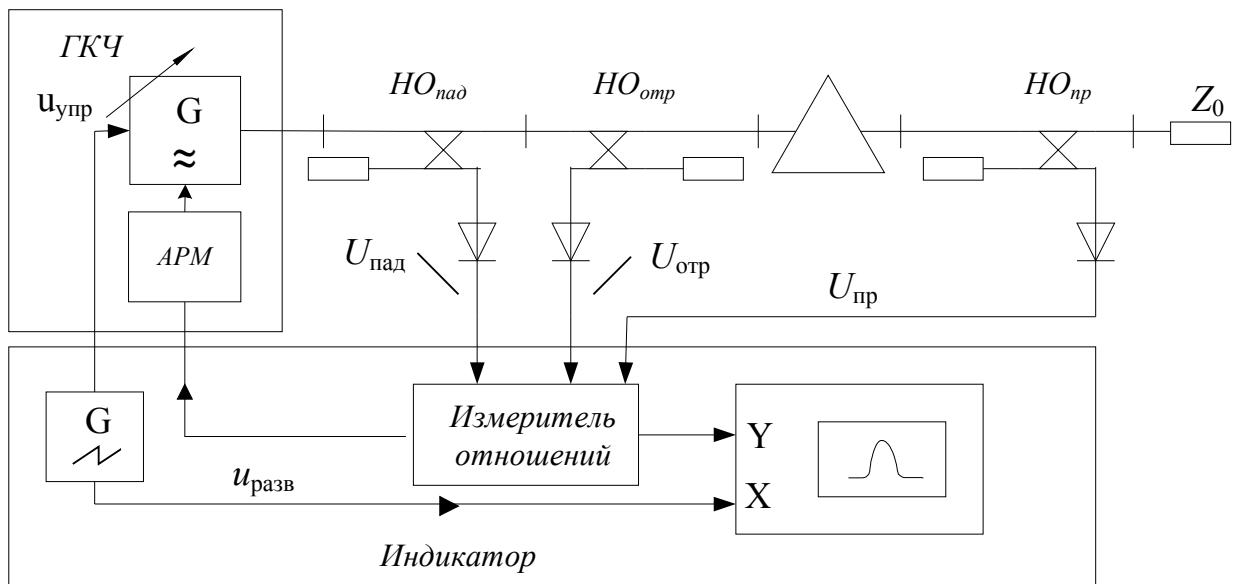


Рис. 4.45. Структурная схема панорамного измерителя Р2-61

Направленность ответвителей порядка 37-38 дБ, коэффициент преобразования детекторов 2 мВ/мВт (с учетом ослабления НО) при токе смещения 50 мА.

Генератор качающейся частоты (ГКЧ) обеспечивает ручную перестройку и автоматическое качание частоты в пределах установленных границ F1, F2. Главные требования к ГКЧ анализатора цепей СВЧ – широкий диапазон перестройки частоты при минимальной вариации амплитуды, уровень выходной мощности не менее нескольких мВт, отсутствие побочных колебаний и гармоник. Эти требования противоречивы и ограничивают диапазон перестройки частоты ГКЧ до 40-60% на частотах порядка 10 ГГц и выше. ГКЧ управляется по частоте пилообразным напряжением развертки, по амплитуде – системой автоматической регулировки мощности (АРМ).

Обычно генератор качающейся частоты совместно с элементами измерительного тракта (переходами, аттенюаторами, блоком питания и пр.) выполняют в виде отдельного блока (рис.4.2).

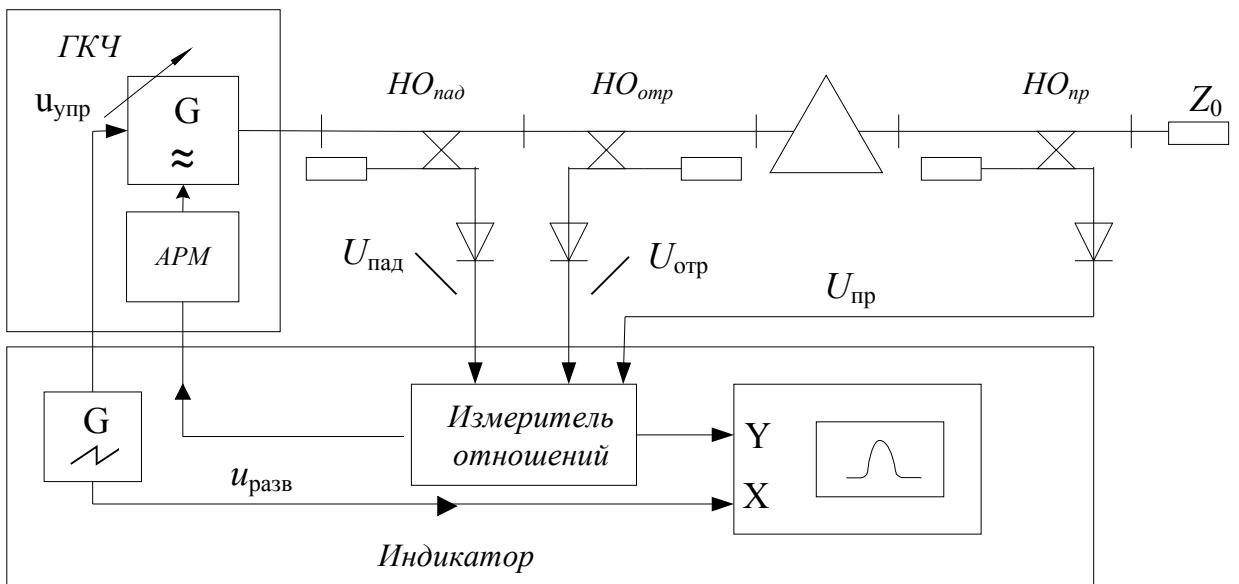


Рис. 4.46. Структурная схема генераторного блока измерителя КСВН и ослабления Р2-61

В качестве автогенератора ГКЧ использован диод Ганна, включенный в ферродиэлектрический резонатор (ЖИГ-сфера). Управление резонансной частотой ЖИГ-сферы производится изменением напряженности подмагничивающего поля, создаваемого пилообразным управляемым напряжением  $U_{\text{упр}}$ . Регулировка уровня выходного сигнала и стабилизация его амплитуды проводится системой автоматической регулировки мощности (АРМ). Сигнал ошибки для АРМ вырабатывается путем сравнения продетектированного сигнала падающей волны  $U_{\text{пад}}$  и опорного напряжения  $U_{\text{оп}}$ . Регулирующим элементом АРМ является электрически управляемый полупроводниковый аттенюатор, устанавливаемый на выходе генераторного блока.

Контроль работы системы АРМ проводят, подавая на индикатор сигнал падающей волны. В случае правильной работы АРМ на экране индикатора должна получаться горизонтальная линия. Однако надо помнить, что система АРМ получает информацию об амплитуде генерируемого сигнала с НО падающей волны. Поэтому при неравномерности АЧХ этого ответвителя появится частотная зависимость амплитуды выходного сигнала. Она будет соответствовать инвертированному виду АЧХ НО падающей волны - там, где переходное ослабление НО уменьшается, система АРМ увеличит амплитуду – и наоборот. Вид этой зависимости называют собственной АЧХ прибора. Для

компенсации ее неравномерности используют измерители отношений продетектированных сигналов падающей и отраженной волн, а также стремятся использовать направленные ответвители с одинаковыми параметрами.

Регулировкой опорного напряжения АРМ можно управлять средней мощностью генератора. Уровень мощности сигнала ГКЧ обычно регулируют выходным аттенюатором, который выполняет также функции устройства развязки. Для работы низкочастотного индикаторного блока (усилителей и измерителей отношений) используют амплитудную модуляцию (манипуляцию) СВЧ сигнала. При этом проще усиливать выходные измерительные сигналы и фильтровать их от помех. Частоту модуляции выбирают порядка десятков кГц, форму сигнала модуляции – прямоугольные импульсы (меандры). Модуляцию выполняют с помощью полупроводникового коммутатора, установленного в тракт выходного сигнала генератора.

Низкочастотная часть измерителя – это индикаторный блок (рис.4.3).

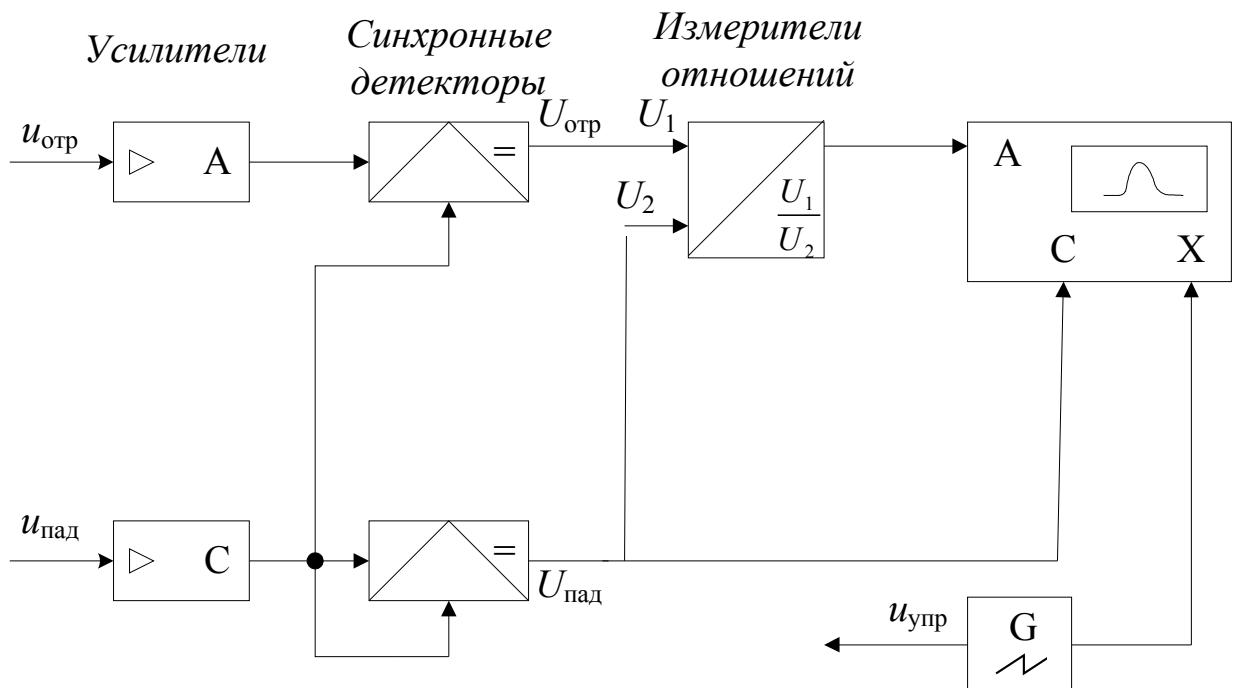


Рис. 4.47. Измерительный блок анализатора КСВН и ослабления Р2-61

Он имеет общий измерительный канал для сигналов отраженной и проходящей волн (А), которые подают от НО в зависимости от измеряемого параметра. Переключение режимов измерения тогда проводят перекоммутаци-

ей измерительного тракта. Дополнительный канал падающей волны (С) служит для контроля равномерности собственной АЧХ генератора и работы системы АРМ.

На измерительный блок подают продетектированные НЧ сигналы падающей, отраженной или проходящей волн. Эти сигналы поступают на узкополосные усилители и далее - на синхронные детекторы (СД). Последние позволяют получить постоянные напряжения, пропорциональные квадратам амплитуд (мощности) падающей  $U_{пад}$ - $R_{пад}$  и отраженной/проходящей волн ( $U_{отр}$ ,  $U_{пр}$ ). Синхронный детектор – это преобразователь частоты, в котором частота сигнала равна частоте гетеродина, а на выходе с помощью узкополосного ФНЧ выделяют сигнал разностной частоты - постоянное напряжение. Преимущество синхронных детекторов – их хорошие фильтрующие свойства и помехозащищенность. В качестве сигнала гетеродина СД используют усиленный сигнал падающей волны. Недостаток синхронных детекторов – зависимость выходного сигнала от фазового сдвига входных НЧ напряжений - в данном случае не сказывается.

Выделенное напряжение сигнала подают на измеритель отношения и - далее - на канал Y осциллографического индикатора. На канал X подают сигнал от генератора пилообразного напряжения, который обычно размещают также в индикаторном блоке. Длительность прямого хода пилообразного напряжения определяет время анализа частотной характеристики. В приборе используют стандартные значения 0,08с, 1 и 10 с. Выбор большего времени анализа осуществляют с целью исключения динамических погрешностей при исследовании узкополосных СВЧ устройств. Предусматривают режим работы от внешнего управляющего напряжения, а также режим ручной перестройки частоты. Последний превращает измеритель в одночастотный генератор со стабильной амплитудой и ручной перестройкой в диапазоне частот. Это дает возможность проводить особо точные измерения на фиксированных частотах с использованием внешних вольтметров и частотометров.

Для показа частотных зависимостей в панорамных аналоговых приборах используют осциллографический индикатор. Фактически это упрощенный осциллограф, в котором предусмотрены два канала (X – горизонтального отклонения и Y – вертикального отклонения) и электронно-лучевая трубка с увеличенным послесвечением. На канал X подают напряжение развертки, на канал Y – выходной сигнал с измерителя отношения, пропорциональный квадрату модуля коэффициента матрицы рассеяния. На канал Y также поступают сигналы частотных меток с блока управления ГКЧ. При этом на осциллограмме создаются их изображения в виде коротких импульсов. Частота ГКЧ каждой метки индицируется на цифровом табло (M1 или M2). Совместная метка с интересующей точкой исследуемой характеристики, по табло отчитывают ее частоту.

Вертикальная шкала осциллографического индикатора имеет размерность квадрата модуля коэффициента отражения/передачи. Это справедливо при нормировке амплитуды падающей волны к единице. Перед измерениями прибор калибруют по двум уровням. Первая калибровка – по нулевому уровню сигнала – обычно делается при настройке прибора. Совмещают осциллограмму в отсутствии измерительного сигнала (например, при установке согласованной нагрузки) с нулевой линией шкалы индикатора. Калибровка единичного уровня коэффициента отражения делается с короткозамыкателем. При этом совмещают кривую отраженной волны с линией единичного коэффициента отражения вертикальной шкалы индикатора (отметка KСВН=∞). Для проходных измерений калибровку делают по единичному коэффициенту передачи. Для этого соединяют НО падающей и проходящей волн напрямую и совмещают кривую проходящей волны с линией единичного коэффициента передачи (отметка А = 0 дБ). В англоязычной литературе такой вид калибровки обозначают аббревиатурой SLT –(Short - короткозамыкатель, Load – согласованная нагрузка, Through – прямое соединение). Вертикальная шкала измерителя после калибровки соответствует значениям  $|S_{11}|^2$  или  $|S_{21}|^2$ . Чтобы не пересчитывать вручную эти величины в рабочие параметры (KСВН и

ослабление) – используют электронный визир. Для того в индикаторе предусматривают дополнительные шкалы КСВН и ослабления (в дБ), связанные с управляемым вручную указателем – горизонтальной линией на экране (линейкой электронного визира). Совмещая его с выбранными точками частотной характеристики, по шкалам отсчитываем результат измерения КСВН или ослабления.

#### **4.2. Задание и указания к выполнению лабораторной работы**

##### *1. Подготовка установки к работе*

По указанию преподавателя в лабораторной работе выполняется исследование либо четырехполюсного устройства СВЧ, либо СВЧ нагрузки. Соберите измерительный тракт прибора, подключив направленный ответвитель для исследования частотных характеристик ослабления либо КСВ (см. рис.1).

Для измерения АЧХ ослабления соедините направленный ответвитель падающей волны и проходящей волны напрямую. При измерении КСВ нагрузки установите на НО отраженной волны короткозамыкающую нагрузку. При этом прибор должен показывать собственную АЧХ.

Установите исходное положение органов управления ГКЧ : АМ – ВНУТР., ВР.ПЕРЕСТРОЙКИ- 0,08, РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ – F1 F2, ВНЕШ.-АМ отжата. На индикаторном блоке: ПРЕДЕЛЫ - ПАД., КОРРЕКТ,ЛОГ, -10 дБ – отжаты, переключатель полосы индикатора - широкая полоса. Включите тумблеры СЕТЬ ВКЛ и дайте прибору прогреться в течение 5-10 мин.

##### *2. Исследование работы системы автоматической регулировки мощности (АРМ)*

Установите максимальную полосу качания частоты. Поставьте регуляторы УРОВЕНЬ и ПАД. в крайнее левое положение. При этом система АРМ не работает (слабый сигнал). Зарисуйте АЧХ сигнала в измерительном кан-

ле. Затем отрегулируйте этими ручками режим работы АРМ так, чтобы получить равномерный сигнал падающей волны.

Определите динамический диапазон АРМ следующим образом. Используя регулировки УРОВЕНЬ и ПАД., найдите минимальный и максимальный уровни мощности ГКЧ, при котором сохраняется равномерность сигнала падающей волны. Измерение уровня мощности производите совмещением линии электронного визира с линией АЧХ ручкой ОТСЧЕТ. По шкале отсчитайте значения напряжение на выходе детектора падающей волны и переведите его в величину мощности (2 мВ соответствует примерно 1 мВт выходной мощности). Отношение максимальной и минимальной мощностей, выраженной в дБ, является оценкой динамического диапазона АРМ. Для дальнейшей работы установите уровень мощности, соответствующий середине динамического диапазона.

### *3. Калибровка измерителя по образцовой нагрузке*

Калибровка ослабления производится при непосредственном соединении НО падающей и проходящих волн ( $A=0$  дБ). Поставьте переключатель ПРЕДЕЛЫ в положение 0 дБ. На экране воспроизводится вид АЧХ проходящей волны. Установите визир на отметку 0 дБ и ручкой КАЛИБР совместите АЧХ с линией визира.

Калибровка КСВ производится при короткозамыкающей заглушке ( $K_{CB}=\infty$ ) и положении переключателя ПРЕДЕЛЫ в положении 0 дБ. На экране будет воспроизводиться АЧХ, соответствующая мощности отраженной волны с учетом неидеальности АРМ и собственной АЧХ НО. Установите визир на отметку 0 дБ ( $K_{CB}=\infty$ ) и ручкой КАЛИБР отрегулируйте положение линии отраженной волны до примерного совпадения ее с линией визира.

В дальнейшем для сохранения калибровки прибора ручки ПАД., КАЛИБР., УРОВЕНЬ трогать нельзя. Измерьте неравномерность собственной АЧХ с помощью электронного визира по шкале дБ. Для уточнения отсчета

можно применить режим ручной перестройки частоты. Зарисуйте вид собственной АЧХ.

#### *4. Измерение диапазона перестройки частоты прибора в узкополосном режиме качания*

В этом режиме регулируется центральная частота рабочего диапазона  $F_0$  и полоса качания  $\Delta F$ . Для установки этого режима нажмите клавишу  $\Delta F$  переключателя РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ,  $F_2\Delta F$  на индикаторе и ручкой  $F_2\Delta F$  установите максимальную величину полосы качания. Аналогично ручкой  $F_0F_1$  установите центральную частоту качания  $F_0$ , равную 8,5 ГГц. Для ее вывода на табло надо нажать кнопку  $F_0\Delta F$ . С помощью меток M1 и M2 измерьте минимальную и максимальную частоты диапазона качания. Амплитуду меток регулируйте ручками АМПЛИТУДА M1 и M2 на генераторе и ручкой МЕТКА на индикаторе. Для этого ручками M1 и M2 разместите метки по краям экрана и, включая поочередно кнопки M1 и M2, отсчитайте на табло значения их частот. Измерьте полосу  $\Delta F$  и сравните полученные данные. Повторите измерения для частот 10 ГГц и 11,5 ГГц.

#### *5. Измерение частотных характеристик ослабления или КСВН исследуемого объекта*

Установите в измерительный тракт исследуемое устройство. Включите режим перестройки F1F2 и максимальную полосу качания частоты. Получите удобный вид АЧХ, выбирая масштаб по уровню ручкой ПРЕДЕЛЫ. Зарисуйте вид графика. Измерьте АЧХ по точкам (10-12 точек), для чего используйте метки генераторного блока и электронный визир индикатора. При необходимости для уточнения отсчетов используйте ручной режим перестройки и узкополосное качание частоты. Результаты сведите в таблицу, по данным которой постройте графики исследуемых АЧХ.

## **Содержание отчета по лабораторной работе**

Отчет должен содержать структурную схему установки, таблицы данных и графики измеренных АЧХ.

### **Контрольные вопросы**

1. Укажите назначение панорамных скалярных измерителей параметров цепей СВЧ типа Р2-.
2. Какие элементы входят в измерительный тракт СВЧ прибора Р2-61? Каких параметров влияют на точность измерения АЧХ?
3. Какие требования предъявляются к ГКЧ измерителя Р2-61?
4. Для какой цели сигнал ГКЧ модулируют по амплитуде НЧ сигналом? Какова форма сигнала модуляции? В каких случаях используют режим непрерывной генерации (НГ)?
5. Укажите назначение системы АРМ прибора Р2-61. Что такое динамический диапазон АРМ?
6. Что такая собственная АЧХ панорамного измерителя Р2-61? От чего зависит ее неравномерность?
7. Какие функции выполняет измерительный блок прибора Р2-61? Как он позволяет улучшить точность измерения АЧХ?
8. Для чего нужна калибровка прибора Р2-61? Как ее производят для измерения ослабления? для измерения КСВ?
9. Как производят оцифровку шкалы частот прибора Р2-61? Как устроен блок частотных меток?
10. В каком масштабе по вертикали выводится на экран график АЧХ? как производят отсчет измеренных значений ослабления и КСВ?

## **5. ИЗМЕРЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАЧИ СВЧ УСТРОЙСТВ ПРИБОРОМ Р4-11 (Р4-23)**

В лабораторной работе студенты знакомятся с устройством и принципом действия аналоговых векторных измерителей параметров СВЧ трактов типа Р4-11 ( Р4-23). Эти приборы построены по единой конструктивной схеме и отличаются диапазоном частот и измерительными трактами СВЧ. Изучаются методы их использования для исследования частотных характеристик параметров рассеяния устройств СВЧ.

### **5.1. Измерители комплексных коэффициентов передачи (векторные анализаторы параметров цепей СВЧ)**

В векторных анализаторах устройств СВЧ измеряют комплексные коэффициенты отражения и передачи. Для этого требуется определять отношение амплитуд сигналов, так и фазовый сдвиг между ними. Фазовые измерения непосредственно на частоте СВЧ сигнала в широкой полосе частот трудно реализовать. Поэтому в векторных анализаторах цепей СВЧ, как правило, используют гетеродинные методы - перенос измерительных сигналов в область промежуточных частот (ПЧ) или низких частот (НЧ) с сохранением информации об амплитуде и фазе. Это достигается двойным или тройным преобразованием частоты сигналов в каналах падающей и отраженной/проходящей волн. После преобразования измерение амплитуд проводят вольтметром или измерителем отношения, а фазовый сдвиг – НЧ фазометром. Обычно используют метод преобразования фазового сдвига во временной интервал. В цифровых векторных анализаторах производят аналого-цифровое преобразование НЧ сигналов с последующей обработкой и вычислением искомых комплексных коэффициентов рассеяния.

Векторные измерители должны обеспечивать более широкий спектр функциональных возможностей, чем скалярные. Кроме измерения модуля и фазы коэффициентов матрицы рассеяния, требуется обеспечить индикацию их частотных зависимостей в декартовой и полярной системах координат, рассчитать вывести частотные зависимости КСВН, модулей коэффициентов отражения и передачи, вносимого ослабления, группового времени запаздывания и пр.

## **5.2.Краткие технические данные панорамного измерителя Р4-11**

### **(Р4-23) и его структурная схема**

Эти приборы измеряют комплексные коэффициенты отражения и передачи СВЧ нагрузок, четырехполюсных и многополюсных устройств СВЧ в коаксиальном тракте.

Измеритель комплексных коэффициентов передачи Р4-11 имеет коаксиальный измерительный тракт 50 Ом - 16/6,95 мм или 75 Ом -16/4,61 мм и обеспечивает следующие технические и метрологические параметры:

- Частотный диапазон прибора (1...1250) МГц с разбивкой на два поддиапазона;
- Выходная мощность ГКЧ 1...10 мкВт;
- Пределы измерения ослабления: (-60 ÷ +10) дБ с абсолютной погрешностью в пределах  $\Delta A = \pm (0,05A_x + 0,5)$  дБ.
- Погрешность измерения фазового угла коэффициента передачи  $\Delta \phi = \pm (1 + 0,02\phi_x + 0,2A_x)$ ,  $^{\circ}$ .
- Измерение КСВН: 1,05 ÷ 2,0 с относительной погрешностью в пределах  $\delta KCBN = \pm (5KCBN + 3)\%$ ;
- Погрешность измерения угла коэффициента отражения отражения  $\Delta \phi_p = \pm (12/KCBN + 3)$ ,  $^{\circ}$ .
- Погрешность измерения рабочей частоты прибора в нормальных условиях при помощи встроенного частотомера не превышает

$\pm(0,015f + 0,5)$  МГц в I поддиапазоне и  $\pm0,5\%$  во II поддиапазоне,  
где  $f$  – измеряемое значение частоты в МГц.

Измеритель комплексных коэффициентов передачи Р4-23 имеет коаксиальный измерительный тракт – 50 Ом разъем 7/3 мм и обеспечивает следующие технические и метрологические параметры:

- Частотный диапазон прибора (1…4) ГГц;
- Пределы измерения ослабления: (-70 ÷ +10) дБ с абсолютной погрешностью в пределах  $\Delta A = \pm (0,03Ax + 0,7)$  дБ.
- Погрешность измерения фазового угла коэффициента передачи  $\Delta\phi = \pm (5 + 0,02\varphi_x + 0,1Ax)$ , °.
- Измерение КСВН: 1,05 ÷ 2,0 с относительной погрешностью в пределах  $\delta KCBN = \pm (5KCBN + 3)\%$ ;
- Погрешность измерения угла коэффициента отражения отражения  $\Delta\phi_r = \pm (12/KCBN + 4)$ , °.
- Точность измерения частоты  $\Delta f = \pm (0,015f + 0,5)$  МГц;

Приборы отличаются видами измерительного тракта и рабочим диапазоном частот. Индикатор и генераторный блок выполнены по единой схеме, поэтому в дальнейшем будем рассматривать прибор Р4-11. Структурная схема аналогового векторного анализатора Р4-11 представлена на рис. 5.1.

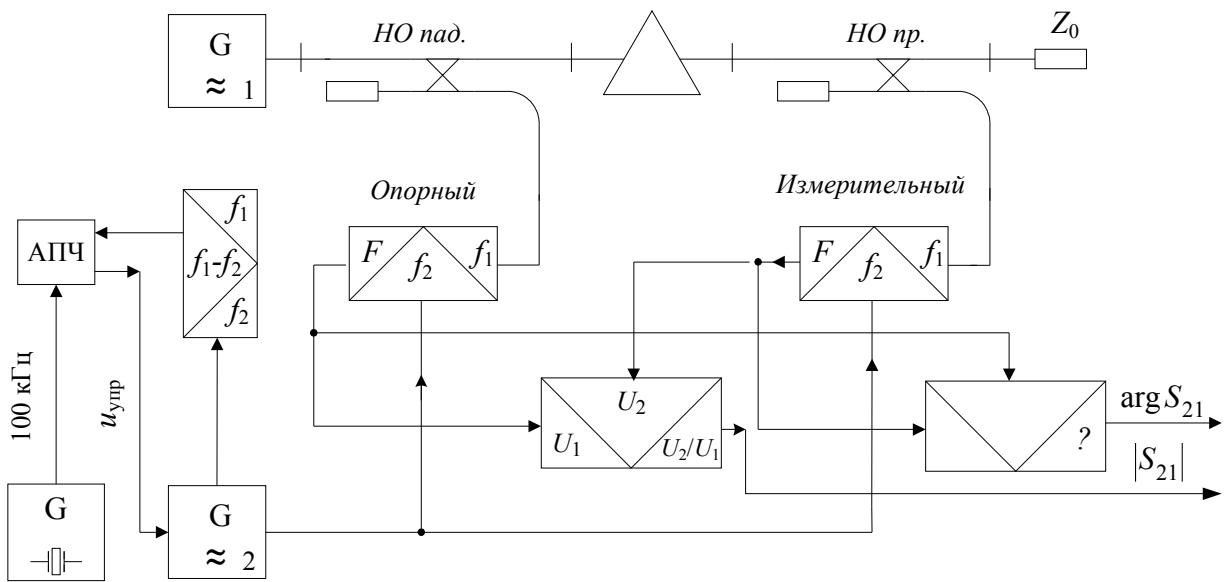


Рис. 5.48. Структурная схема векторного анализатора Р4-11 (Р4-23) в режиме измерения коэффициента передачи

ГКЧ состоит из двух генераторов СВЧ с электрической перестройкой по частоте. Первый генератор является источником сигнала для измерительного тракта. Второй генератор используется как гетеродин для преобразователей частоты в опорном и измерительном каналах. Амплитуды сигналов первого и второго генераторов при перестройке поддерживаются постоянными, а частоты отличаются на константу, равную заданной промежуточной частоте  $f_{\text{пп}}=100$  кГц. Точность поддержания разности частот обеспечивается системой автоподстройки частоты (АПЧ). Опорным сигналом для АПЧ является сигнал кварцевого генератора 100 кГц. Такой двухчастотный генератор позволяет упростить дальнейшее преобразование частоты измерительных сигналов. ГКЧ работает в двух диапазонах (1...640 МГц и 640...1250 МГц). Второй диапазон реализуется преобразованием частот первого диапазона вверх на 6439 МГц.

Оцифровка оси частот на экране прибора осуществляется с помощью градуированного перестраиваемого резонансного частотомера. С его детектором в момент совпадения частоты ГКЧ с частотой резонатора на индикаторный блок поступает импульс. При этом на экране создается частотная метка, ширина которой регулируется ручкой МЕТКА.

Сигнал с выхода ГКЧ поступает на широкополосный делитель мощности (СВЧ тройник), формирующий два канала – опорный и измерительный. В измерительный канал включается исследуемое устройство, опорный служит для выделения сигнала падающей волны. Напряжение опорного канала поступает на вход ОН преобразователя частоты, измерительного – на вход ИН. Эти сигналы в смесителях преобразуются в НЧ сигналы промежуточной частоты  $f_{\text{ПЧ}}=100$  кГц, которые сохраняют информацию об амплитуде и фазе падающей и проходящей (или отраженной) волны. Далее НЧ сигналы поступают на измеритель отношения, где выделяется модуль измеряемого параметра, и на фазовый детектор. Последний измеряет аргумент параметра – фазовый сдвиг между напряжениями в опорном и измерительном каналах.

Индикаторный блок прибора обеспечивает следующие функциональные возможности прибора:

- Вывод на экран частотных характеристик модуля и фазы коэффициентов передачи и отражения в декартовых координатах;
- Индикацию результата в полярных координатах (круговая диаграмма);
- Калибровку по модулю и фазе измеряемого параметра.
- Отсчет измеренных значений с помощью электронного визира

### **5.3. Задание и указания к выполнению лабораторной работы**

#### *1. Подготовка установки к работе*

По указанию преподавателя в лабораторной работе выполняется измерение комплексных параметров рассеяния четырехполюсного устройства СВЧ. Программа работы включает в себя калибровку прибора по модулю и по фазе, измерение частотных характеристик модуля и фазы заданного параметра рассеяния.

Соберите измерительный тракт прибора для исследования частотных характеристик коэффициента передачи (рис.5.2) без исследуемого устройства – вход ИН подключите к делителю мощности напрямую.



Рис. 5.49. Схема СВЧ тракта для измерения комплексного коэффициента передачи прибором Р4-11 (Р4-23)

Установите верхний диапазон частот 640 ...1250 МГц ( тумблер ДИАПАЗОНЫ в положение II) и максимальную полосу качания ( ручки МИНИМАЛЬНАЯ ЧАСТОТА в крайнее левое положение, КОНЕЧНАЯ ЧАСТОТА – в крайне правое). Включите прибор и дайте ему прогреться.

## 2. Калибровка прибора для измерения коэффициента передачи

Откалибруйте измерительный канал по нулевому ослаблению и нулевому фазовому сдвигу (на «проход»). Для этого поставьте переключатель МОДУЛЬ в положение 0 дБ, ДЕКАРТОВАЯ – МОДУЛЬ. Установите ручкой ОТСЧЕТ эле4ктронный визир на отметку 0 дБ по шкале индикатора. Ручкой УРОВЕНЬ добейтесь наиболее ровной АЧХ выходного сигнала. Регулировкой КАЛИБР совместите линию выходного сигнала с линией визира.

Зарисуйте АЧХ сигнала (собственную АЧХ прибора). С помощью визира измерьте неравномерность собственной АЧХ (отклонение АЧХ в большую и меньшую стороны). Прибор откалиброван по модлуко коэффициента передачи.

Откалибруйте прибор по фазе коэффициента передачи, для чего переведите переключатель ДЕКАРТОВАЯ –ФАЗА в положение  $\pm 270^\circ$ . Установи-

те визир на отметку  $0^\circ$  и ручками УСТ. И ВЫРАВНИВАНИЕ добейтесь совмещения линии калибровки с линией визира при минимальном наклоне ФЧХ. Повторите калибровку для поддиапазона ФАЗА  $\pm 27^\circ$ .

Прибор откалиброван и готов к измерениям.

### *3. Измерение АЧХ и ФЧХ четырехполюсников СВЧ*

Установите максимальную полосу качания , при которой выполнялась калибровка. Включите исследуемое устройство в измерительный канал между делителем мощности и входом ИН. Установите режим измерения модуля коэффициента передачи (ДЕКАРТОВАЯ-МОДУЛЬ). Зарисуйте АЧХ коэффициента передачи. Перейдите в режим ручной перестройки частоты (переключательРЕЖИМ РАБОТЫ в положение РУЧН.). Перестраивая частоту регулятором ручного режима, измерьте АЧХ по точкам. Для этого нажимайте кнопку ОТСЧЕТ и записывайте значение ослабления по шкале электронного визира. Частоту в точке измерьте с помощью частотомера ГКЧ. Перестраивая частотомер, добейтесь на экране появления частотной метки в точке измерения.

Результаты измерений занесите в таблицу.

Переключите прибор в режим измерения ФЧХ (ДЕКАРТОВАЯ – ФАЗА  $\pm 270^\circ$ ). И аналогичным образом измерьте по точкам частотную зависимость аргумента коэффициента передачи.

### **Содержание отчета по лабораторной работе**

Отчет должен содержать структурную схему установки, таблицы данных и графики измеренных частотных зависимостей.

### **Контрольные вопросы**

1. Укажите назначение аналоговых измерителей измерителей параметров цепей СВЧ типа Р4.

2. Какие элементы входят в измерительный тракт СВЧ прибора Р4-11? Каких параметров влияют на точность измерения коэффициента передачи?
3. Как устроен блок ГКЧ измерителя Р4-11? Для чего в нем применяют два генератора и систему АПЧ?
4. Для чего используют опорный канал прибора?
5. Какие функции выполняет измерительный блок прибора Р4-11? Какие меры увеличения точности предусмотрены в этом блоке?
6. Как производят калибровку прибора Р4-11 для измерения ослабления и фазы коэффициента передачи?
7. Что такое частотная метка прибора Р4-11? Как производят оцифровку шкалы индикатора?

## **6. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ СВЧ СИГНАЛОВ ПАНОРАМНЫМ АНАЛИЗАТОРОМ С4-27**

В лабораторной работе студенты знакомятся с гетеродинным анализатором спектра СВЧ диапазона, методикой его настройки и использования для исследования непрерывных и импульсных сигналов.

### **6.1. Анализаторы спектра СВЧ радиосигналов**

В диапазоне СВЧ наблюдение формы сигнала (зависимости его во времени) не позволяет получить полную информацию о нем. Так, осциллографма радиосигнала с частотной модуляцией практически мало отличим от синусоидального сигнала, наличие в составе сигнала дополнительных гармонических составляющих маскируется большой величиной гармоники несущей частоты и пр. Анализ спектральных характеристик радиосигналов в диапазоне СВЧ более информативен и позволяет измерить его мощность, частоту, коэффициент модуляции и пр. Практически анализатор спектра в СВЧ диапазоне является таким же универсальным прибором для исследования радиосигналов, каким на низких частотах является осциллограф.

Напомним спектральные характеристики радиосигнала. Для сигнала  $u(t)$  вводят *спектральную функцию* (или спектральную плотность), определяемую прямым преобразованием Фурье

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-i\omega t} dt.$$

Эта функция комплексная, имеет размерность В/Гц и представляет распределение амплитуд и фаз гармонических составляющих по частотной оси. Спектральная функция существует при абсолютной интегрируемости функции сигнала. Для реальных сигналов это условие обычно всегда выполняется.

Спектральная функция – это функционал уже закончившегося процесса (интеграл берется до «бесконечного» времени). В реальных условиях изменять можно только *текущий частотный спектр*

$$S(\omega, t) = \int_{-\infty}^t u(t)e^{-i\omega t} dt,$$

характеризующий незаконченный процесс. Чаще измеряют модуль этого выражения – его называют *амплитудной спектральной функцией* или *амплитудным спектром* сигнала. Фазу измерить сложнее, поэтому в стандартных измерительных задачах этого не делают.

Для периодических бесконечных сигналов спектральная функция представляет собой последовательность дельта-функций, смещенных друг относительно друга на частоту повторения сигнала. Для этого случая используют спектральное представление в виде ряда Фурье:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n \frac{2\pi}{T} t + \phi_n),$$

где Т – период повторения сигнала ( $u(t \pm kT) = u(t)$ ,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  ).

Ряд Фурье представляет собой совокупность гармонических колебаний с кратными частотами. Составляющая с нулевой частотой  $U_0$  является постоянной составляющей сигнала. Последовательности амплитуд  $U_n$  и начальных фаз  $\phi_n$  гармоник представляют собой *амплитудный* и *фазовый спектры* периодических сигналов.

Особый класс сигналов, который исследуется в спектральном представлении – это шумовые и случайные сигналы. Важной характеристикой шумового сигнала является его спектральная плотность мощности:

$$W(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|S(\omega, T)|^2}{T}.$$

Здесь  $S(\omega, T)$  – спектральная плотность реализации случайного процесса на интервале  $[-T/2, T/2]$ . Размерность спектральной плотности мощности  $[B^2 \cdot c]$  совпадает с размерностью энергии сигнала, поэтому иногда говорят об энергетическом спектре случайного сигнала. Фактически это характеристика распределения мощности случайного сигнала по частоте.

Сформулируем измерительные задачи спектрального анализа сигналов СВЧ. Это определение амплитуд и частот гармонических составляющих периодических сигналов, измерение амплитудной спектральной функции непе-

риодических сигналов и спектральной плотности мощности случайных сигналов.

Стандартные анализаторы спектра СВЧ диапазона строятся преимущественно по принципу последовательного анализа. Спектральные составляющие выделяют узкополосным фильтром. Фактически такой прибор является узкополосным селективным вольтметром с супергетеродинным принципом перестройки по частоте. Используют электронную перестройку частоты и панорамный принцип индикации результата. На выходе фильтра ставят измеритель уровня (квадратичный детектор). Результат измерения подают на отсчетное устройство - осциллографический индикатор.

Структурная схема прибора с последовательным методом анализа представлена на рис. 6.1.

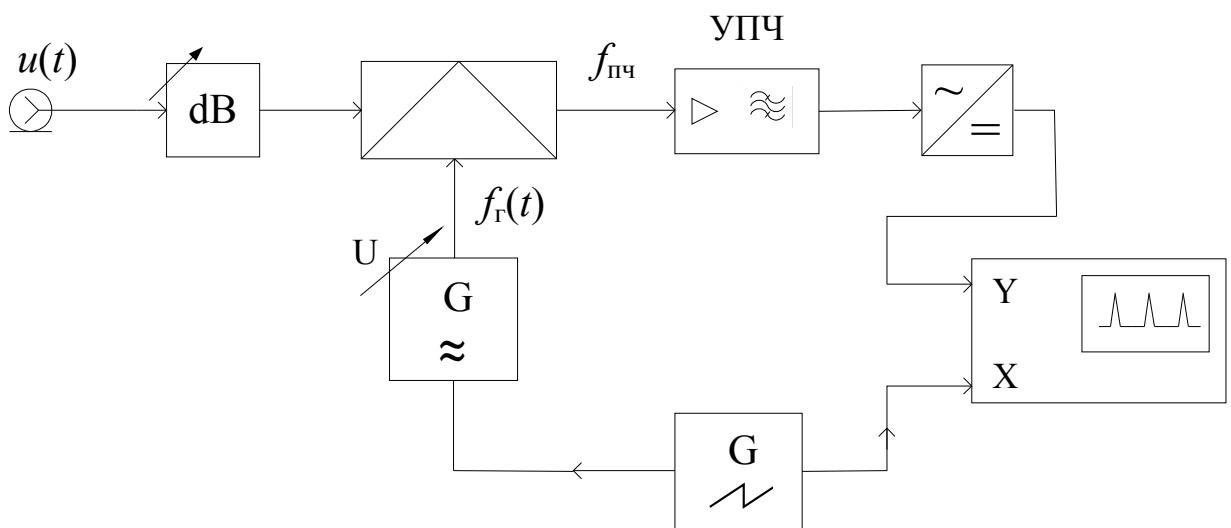


Рис. 6.50. Структурная схема анализатора спектра последовательного типа.

Она напоминает схему измерителя АЧХ (анализатора цепей СВЧ). Управление перестройкой частоты гетеродина производится генератором пилообразного напряжения  $u_{\text{упр}}(t)$ . Он задает время анализа  $T_a$ , то есть время, за которое анализатор сканирует заданный диапазон частот спектра (полосу анализа  $\Delta f_a$ ). Этим же напряжением производят горизонтальное отклонение луча осциллографического индикатора. Гетеродин является генератором ка-

чающейся частоты (ГКЧ) с постоянной амплитудой и меняющейся по линейному закону частотой:

$$f_e(t) = f_{e_n} + \Delta f_a \frac{u_{ynp}(t)}{U_{ynp \max}}.$$

Сигнал с ГКЧ поступает на смеситель. Предположим, что на вход анализатора подан синусоидальный сигнал с частотой  $f_c$ . Тогда на выходе смесителя возникают колебания с комбинационными частотами, в том числе с разностной частотой  $f_c - f_e(t)$ . Сигнал с разностной (и меняющейся во времени) частотой подают на вход узкополосного УПЧ, который и производит процедуру частотного анализа спектра. Закон изменения частоты от времени пока-

зан на графике рис.6.2, где для наглядности ось времени повернута вниз.

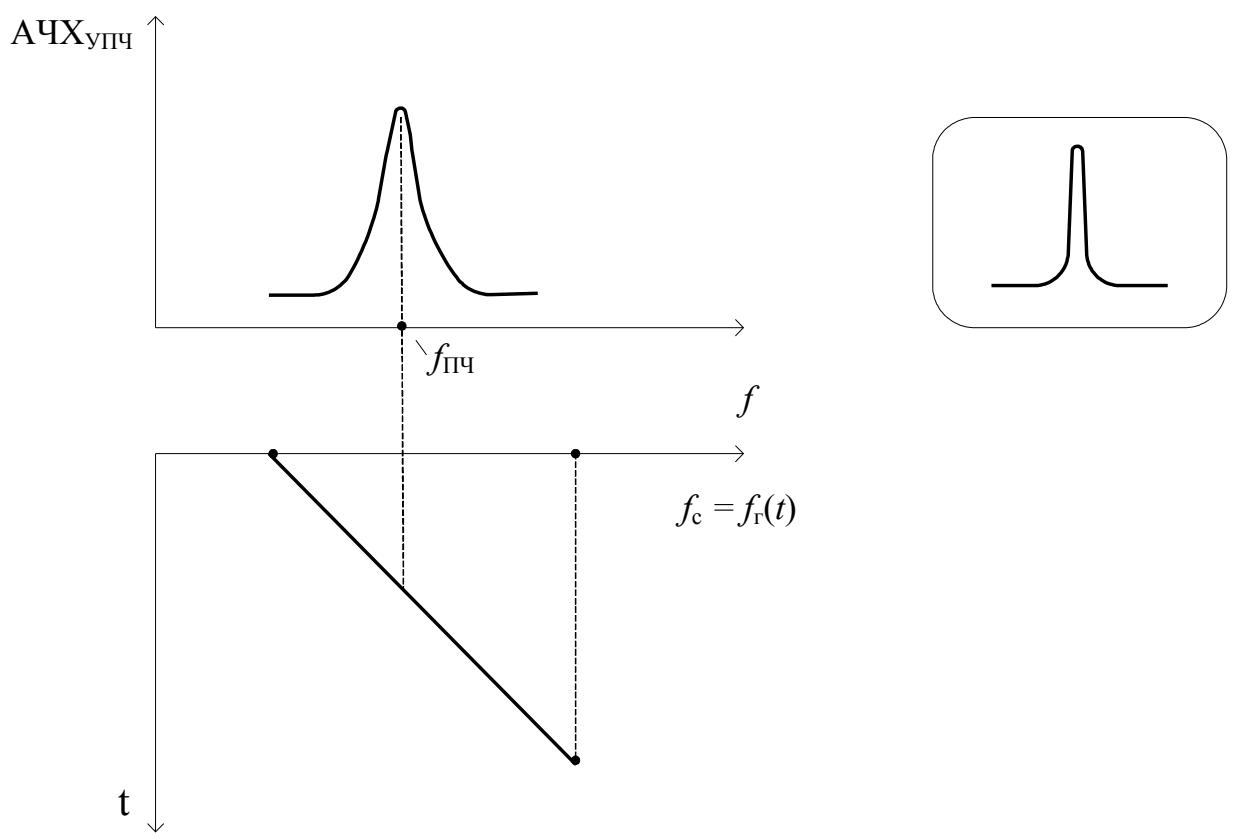


Рис. 6.51. Принцип действия последовательного анализатора спектра

В момент  $t_0$ , когда выполняется условие  $f_c - f_e(t_0) = f_{пч}$ , на выходе УПЧ появляется радиоимпульс. Его огибающая повторяет форму АЧХ фильтра УПЧ. Детектор выделяет напряжение (видеоимпульс), повторяющее его огибающую. Этот сигнал поступает на осциллографический индикатор. При наличии в составе спектра сигнала нескольких гармоник, процесс формирования видеоимпульса происходит аналогично, но в разные моменты врем-

мени. Совокупность откликов спектроанализатора на каждую гармоническую составляющую входного сигнала называют *спектрограммой*. Величины откликов пропорциональны амплитудам входных гармоник, расположение откликов на оси X соответствует частотам гармонических составляющих входного сигнала.

Полученная спектрограмма напоминает часто используемое графическое изображение амплитудного спектра периодического сигнала в виде вертикальных линий, длина которых равна амплитуде соответствующих гармонических составляющих сигнала.

Рассмотрим условия неискаженного воспроизведения спектрограммы. Отклик повторяет форму АЧХ УПЧ только в статическом режиме, когда изменение частоты происходит медленно по сравнению со скоростью переходных процессов в фильтре. На практике приходится учитывать искажение отклика за счет динамических искажений выходного напряжения фильтра из-за влияния переходных процессов (рис 6.3.):

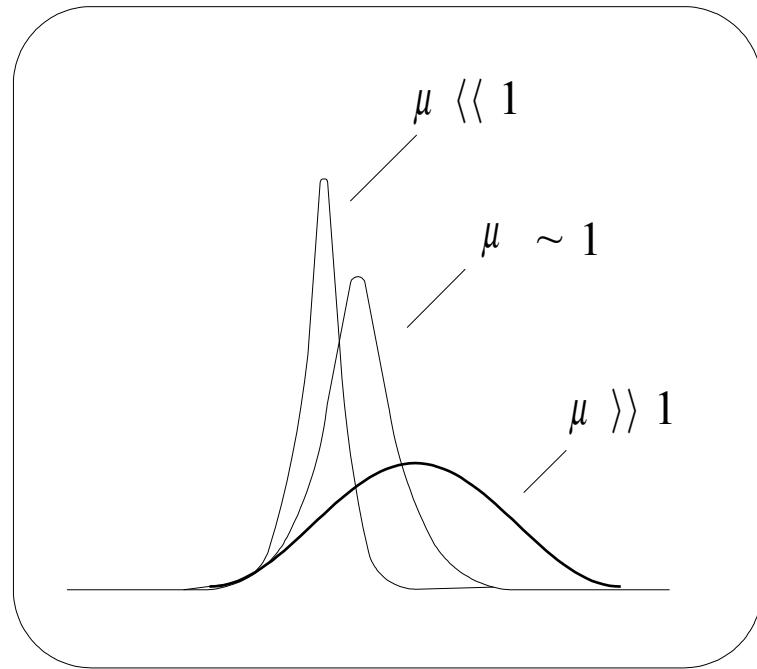


Рис. 6.52. Динамические искажения спектрограммы

Степень искажений описывают коэффициентом динамических искажений  $\mu$ , который равен отношению постоянной времени фильтра  $\tau_\phi$  к времени

$\tau_0$  пребывания частоты в пределах полосы пропускания фильтра  $\mu = \tau_\phi / \tau_0$ .

Постоянную времени можно оценить через полосу пропускания  $\Delta f_{УПЧ}$  фильтра

$$\tau_\phi = \frac{1}{A \cdot \Delta f_{УПЧ}},$$

где  $A = 1..2$  – коэффициент, зависящий от схемы фильтра УПЧ. Время пребывания частоты рассчитывается через скорость изменения частоты ГКЧ

$$v_f = \frac{\Delta f_a}{T_a}$$

и полосу УПЧ

$$\tau_0 = \frac{\Delta f_{УПЧ}}{v_f} = \frac{\Delta f_{УПЧ} T_a}{\Delta f_a}.$$

Коэффициент динамических искажений можно оценить следующим образом:

$$\mu = \frac{\Delta f_a}{A \cdot (\Delta f_{УПЧ})^2 T_a}.$$

Условие статического режима  $\mu << 1$  для анализатора спектра является слишком жестким. Вполне допустимо небольшое отклонение формы откликов от АЧХ УПЧ. Считают приемлемым режим работы анализатора с  $\mu \sim 1$ .

Отсюда вытекает важное условие неискаженной спектрограммы, устанавливающее связь между временем анализа, полосой анализа и полосой пропускания УПЧ:

$$T_a \geq \frac{\Delta f_a}{A \cdot (\Delta f_{УПЧ})^2}.$$

При широкой полосе анализа и узкой полосе пропускания требуемое время анализа может достигать десятков секунд. Поэтому в анализаторах спектра применяют запоминающие осциллографические трубки. Полоса пропускания УПЧ делается регулируемой, что позволяет подобрать оптимальное соотношение между временем анализа и формой отклика спектроанализатора.

Второе условие неискаженной спектрограммы - неизменность спектра сигнала за время анализа. Иными словами, в процессе сканирования спектр сигнала не должен меняться – это соответствует условию, когда период сигнала  $T \ll T_a$ . В каждой частотной точке сигнал должен рассматриваться как периодический. В противном случае возникают искажения спектрограммы.

Рассмотрим особый случай исследования импульсных сигналов с большой скважностью ( $\tau_i \ll T$ ). При этом период становится соизмеримым с временем анализа. Получить неискаженную спектрограмму в этом случае не удается. Однако, если постоянная времени фильтра много меньше периода сигнала, то процессы в узкополосном фильтре можно рассматривать как воздействие на него одиночных импульсов, описываемых спектральной функцией  $S(f)$  (рис.6.4):

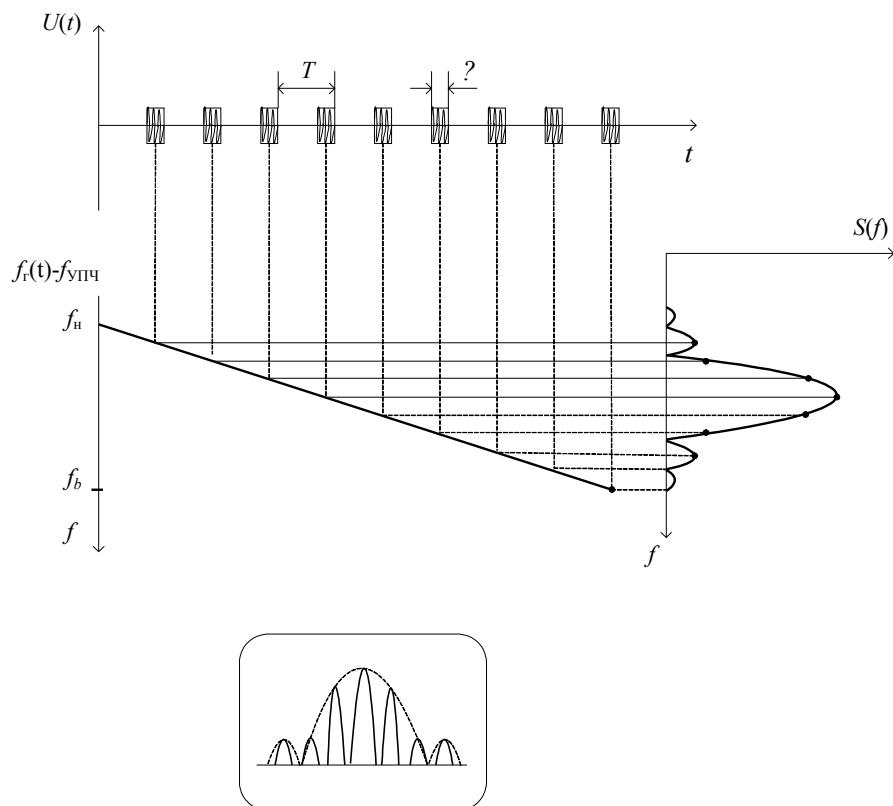


Рис. 6.53. Спектральный анализ импульсов с большой скважностью.

Каждому входному импульсу соответствует отклик на экране спектроанализатора. Поскольку в пределах полосы пропускания спектральную функ-

цию широкополосного импульса можно считать постоянной, то воздействие импульса на фильтр аналогично воздействию  $\delta$ -функции. Форма отклика тогда соответствует импульсной характеристике фильтра, а амплитуда отклика пропорциональна значению спектральной функции одиночного импульса на частоте  $f_c = f_r(t_i) + f_{\text{УПЧ}}$ , где  $t_i$  – момент прихода импульса. Например, если  $T_a=10T$ , то на экране будут наблюдаться 10 откликов, соответствующих 10 входным импульсам. Огибающая их соответствует форме спектральной функции одиночного импульса. Поскольку частота входного сигнала не синхронизирована с частотой развертки, эти отклики при повторном анализе будут перемещаться по экрану. Огибающая спектrogramмы дает информацию о спектральной функции одиночного импульса.

Искажают спектrogramму и помехи, которые попадают на выход анализатора по зеркальному каналу. Напомним, что для супергетеродинного способа преобразования частоты характерно наличие паразитного зеркального канала прохождения сигнала. Кроме полезного сигнала с разностной частотой  $f_c - f_r(t) = f_{\text{УПЧ}}$ , в полосу пропускания УПЧ попадает сигнал с частотой, ниже частоты гетеродина на значение промежуточной частоты  $f_r(t) - f_c = f_{\text{УПЧ}}$ . Этот канал называют «зеркальным»; гармоника, попадающая на эту частоту, будет преобразована и создаст паразитный отклик, накладывающийся на полезный. Возникнет искажение спектrogramмы. Для исключения паразитных сигналов необходимо осуществлять фильтрацию сигнала на входе анализатора. Это можно сделать электрически перестраиваемым фильтром, настроенным на частоту полезного сигнала (преселектор). В диапазоне СВЧ такой фильтр реализуют на ЖИГ-резонаторах с электронной перестройкой. Требования к таким фильтрам достаточно жесткие – синхронность перестройки с гетеродином, постоянство коэффициента передачи при перестройке, малый уровень шумов, высокая линейность.

Чаще используют неперестраиваемые полосовые фильтры, пропускающие весь рабочий диапазон частот спектроанализатора. При этом для лучшего частотного разделения полезного и зеркального каналов выбирают высо-

кое значение промежуточной частоты. Однако на высоких ПЧ трудно получить узкие полосы пропускания фильтра. Выход из этого противоречия - использование двойного или тройного преобразования частоты. Частота первой ПЧ выбирается, исходя их требований подавления зеркального канала, частота последней ПЧ – с точки зрения простоты реализации узкополосного фильтра.

Измерение параметров спектра производят по спектрограмме. Амплитуды (уровни) спектральных составляющих измеряют обычно методом калиброванных шкал (аналогично универсальному осциллографу). Вертикальная шкала перед измерениями калибруется в единицах напряжения по образцовому синусоидальному сигналу, подаваемому на вход прибора. Калибровку надо производить после установки полосы пропускания фильтра и скорости изменения частоты гетеродина, так как динамические искажения изменяют амплитуды откликов на экране. Для относительных измерений уровней гармоник применяют также метод замещения с использованием входного калиброванного аттенюатора.

Для точного измерения частоты гармоник метод калиброванных шкал не подходит из-за низкой стабильности установки частотного диапазона спектроанализатора. Вместо этого используют метод частотных меток . На вход анализатора вместе с исследуемым сигналом отстроенного или внешнего калибратора подают радиоимпульсы, частота повторения которых стабилизована кристаллом. Спектр импульсов содержит гармоники, расстояние между которыми равно образцовой частоте повторения. Отклики на эти гармоники образуют частотные метки на экране анализатора. Меняя частоту несущей радиосигнала, можно перемещать спектр сигнала калибратора в пределы полосы обзора. Сравнивая исследуемый и образцовый сигналы, по масштабной сетке проводят измерение частот гармоник. Другой способ – поставить на вход синусоидальный сигнал с известной частотой. На экране он создаст одиночную частотную метку. Перемещая ее по изображению, добиваются совпадения метки с исследуемыми гармониками сигналом.

Основные параметры последовательных спектроанализаторов:

- Рабочий диапазон частот - это тот частотный диапазон, в котором работает данный прибор. Рабочий диапазон может быть разбит на поддиапазоны.
- Полоса анализа – это диапазон частот, в котором производится обзор спектра сигнала за один ход развертки. Может регулироваться от максимальной полосы до нуля. В последнем случае спектроанализатор превращается в измерительный приемник с ручной перестройкой частоты.
- Время анализа  $T_a$  - это время обзора рабочей полосы частот. Регулируется в широких пределах и для последовательных спектроанализаторов может достигать десятков секунд. Предусматривают и ручной режим перестройки по частоте – его используют при узких полосах УПЧ в режиме запоминания изображения.
- Разрешающая способность - минимальная разность частот двух спектральных составляющих, при которых они фиксируются раздельно и могут быть измерены. Количественно задается разностью частот двух гармонических составляющих, которые на экране создают спектрограмму сливающихся на уровне 0,5 откликов (рис.6.5)

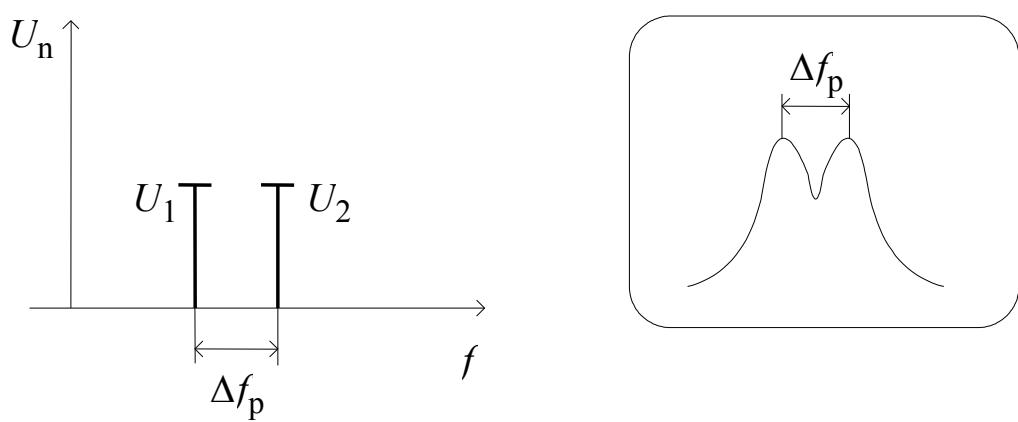


Рис. 6.54. Определение разрешающей способности анализатора спектра

Отметим, что разрешающая способность впрямую не определяет точность измерения амплитуд и частот гармоник – она показывает возможность визуально различить отклики от гармонических составляющих. Различают статическую и динамическую разрешающие способности. Статическая определяется шириной полосы пропускания УПЧ. Для типовой формы АЧХ УПЧ используют эмпирическую формулу

$$\Delta f_p \approx \sqrt{3} \Delta f_{\text{УПЧ}}$$

Динамическая разрешающая способность определяется степенью расширения отклика из-за динамических искажений в фильтре. Так, при коэффициенте динамических искажений  $\mu=10$  разрешающая способность ухудшается (увеличивается) более чем в 3 раза. Поэтому при исследовании сигналов с близкими гармониками используют увеличение времени анализа при минимально возможной полосе пропускания УПЧ.

- Чувствительность - это минимальный уровень входного синусоидального сигнала, который может быть измерен на экране спектроанализатора с заданной точностью. Она ограничена, как правило, внутренними шумами прибора. Количественно она оценивается как минимальное значение синусоидального сигнала, при котором его отклик превышает уровень шумов на экране прибора в заданное число раз (например, на 20 дБ). Иногда в паспорте прибора указывают уровень собственных шумов прибора, который позволяет оценить чувствительность по любому отношению сигнал/шум.
- Максимальный уровень входного сигнала определяется уровнем допустимых искажений исследуемого спектра при воздействии сигнала на входные активные блоки прибора. При перегрузках большим сигналом в спектрограмме могут появляться дополнительные паразитные составляющие, а амплитуды существующих могут измениться.
- Динамический диапазон - это соотношение максимального и минимального уровней гармоник, при котором искажения спектра пренебрежимо малы. Не следует путать это понятие с диапазоном измеряемых

амплитуда сигнала, который при наличии входного аттенюатора может быть шире, чем динамический диапазон. Наличие в реальных сигналах больших и малых уровней гармоник предъявляет жесткие требования к динамическому диапазону. Как правило, он определяется нелинейностью входных блоков спектроанализатора (смесителя, усилителя и пр.). Современные спектроанализаторы имеют широкий динамический диапазон (90 – 120 дБ)

- Амплитудно-частотная характеристика - это зависимость измеренной амплитуды гармоники при изменении ее частоты в пределах полосы обзора и постоянной амплитуде на входе. Она определяет систематические погрешности при измерении спектров в широком диапазоне частот.
- Метрологические параметры - это погрешность измерения уровня гармоник  $\Delta U$  и погрешность измерения частоты гармоники  $\Delta f$ . Погрешность измерения амплитуды включает погрешность калибровки на фиксированной частоте и погрешность неравномерности собственной АЧХ, погрешность калиброванного аттенюатора и пр. Погрешность измерения частоты определяется точностью калибровки шкалы.

## **6.2. Краткие технические данные анализатора спектра С4-27 и его структурная схема**

Анализатор спектра С4-27 предназначен для исследования спектров периодически повторяющихся радиоимпульсов и непрерывных сигналов. С его помощью можно проводить следующие виды измерений:

- Определение уровня и частоты гармонических сигналов;
- Наличие паразитных амплитудной и частотной модуляции;
- Определение соотношения гармонических составляющих в спектрах сигналов сложной формы;

- Для импульсных сигналов: измерение частоты несущей и ширины лепестков спектра, оценку длительности импульса и искажения его формы по виду спектра.

Прибор обеспечивает следующие технические и метрологические параметры:

- Частотный диапазон прибора 10 МГц...39,6 ГГц с разбивкой на 5 поддиапазонов;
- Полоса обзора регулируется в пределах 0,1 – 5 МГц и 2-80 МГц;
- Полоса пропускания УПЧ регулируется в пределах 3-70; имеются две фиксированные полосы 1 кГц и 300 кГц;
- Динамический диапазон (по уровню интермодуляционных искажений) 50 дБ;
- Чувствительность, измеряемая по синусоидальному сигналу 2 ГГц при максимальной полосе УПЧ не хуже 10 -3 мкВт.
- Погрешность установки частоты  $\pm (2 \cdot 10^{-2} f + 1)$ , МГц.
- Погрешность отсчета уровня по сетке 10%.
- Входное сопротивление коаксиального входа 50 Ом (разъем 7/3), волноводные входы 16 x 8, 11 x 5,5 и 7,2 x 3,4 мм.

Анализатор спектра С4-27 представляет собой супергетеродинный приемник с тройным преобразованием частоты и электронной перестройкой в пределах установленной полосы обзора. Он состоит из двух блоков СВЧ – СВЧ преобразователь и анализатор спектра на промежуточной частоте 160 МГц. Упрощенная структурная схема преобразователя СВЧ представлена на рис. 6.6.

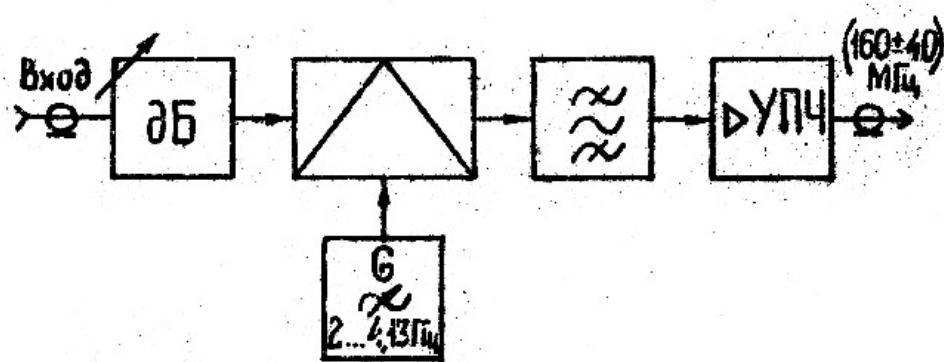


Рис. 6.55. Структурная схема СВЧ преобразователя прибора С4-27

Он представляет собой пятидиапазонный преобразователь, в котором производится перенос спектра исследуемого сигнала на частоты диапазона  $(160\pm40)$  МГц. Используется первая, вторая и третья гармоники триодного гетеродина, перекрывающего диапазон частот  $0,01 - 1,9$  ГГц. На частотах  $1,9 - 39,6$  ГГц используются первая, вторая, четвертая и десятая гармоники кристаллического гетеродина. Частота входного сигнала грубо оценивается по шкале гетеродина.

Особенностью СВЧ преобразователя является отсутствие дополнительной селекции входного сигнала. Это не позволяет подавлять паразитные каналы приема (зеркальный и побочные), что проявляется в виде ложных отметок сигнала на экране анализатора.

Анализатор спектра сигнала ПЧ (рис.6.7) представляет собой приемник на частоту 160 МГц.

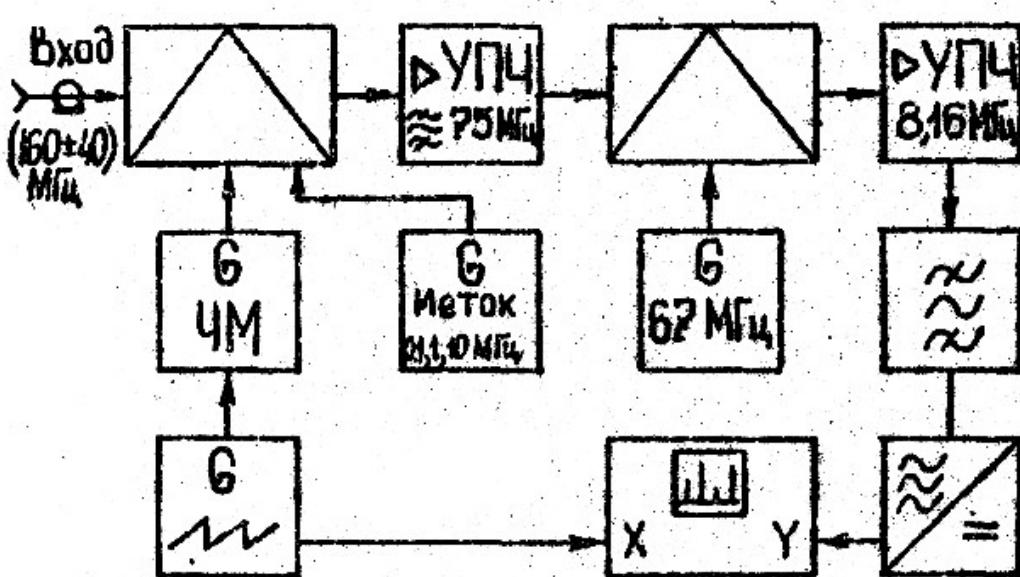


Рис. 6.56. Блок анализатора ПЧ прибора С4-27

Первое преобразование переносит исследуемый спектр на частоту 75,16 МГц. После фильтрации и усиления сигнал попадает на второй смеситель с фиксированной частотой гетеродина. Частота третьей ПЧ 8,16 МГц. На этой частоте производится окончательное усиление сигнала и узкополосная фильтрация, определяющая форму отклика на экране. Амплитуда отклика пропорциональна уровню гармоники на входе прибора. Ширина отклика связана с шириной полосы пропускания УПЧ, который содержит плавно перестраиваемый LC-фильтр, а также два кварцевых фильтра с полосами 1 и 300 кГц.

После детектирования огибающая выходного сигнала УПЧ подается на канал вертикального отклонения осциллографического индикатора. Разверт-

ка изображения осуществляется пилообразным напряжением, управляющим напряжением первого гетеродина блока ПЧ.

Для проведения частотных измерений предусмотрен калибратор. Он представляет собой генератор радиосигнала частотой 160 МГц, модулированного синусоидой с частотой 0.1 , 1 или 10 МГц. Это сигнал подается на вход анализатора и на экране появляется его спектр. Расстояние между откликами соответствует образцовой частоте сигнала модуляции. Такой спектр представляет собой частотные метки, которые позволяют откалибровать ось частот анализатора спектра.

Для калибровки оси амплитуд подают гармонический сигнал от внешнего генератора с известной амплитудой.

### **6.3. Задание и указания к выполнению лабораторной работы**

В лабораторной установке используется анализатор спектра С4-27, генератор СВЧ и модулирующий импульсный генератор.

#### *1. Подготовка установки к работе*

Перед началом работы включите питание приборов и дайте им прогреться 5-10 мин. Включите в анализаторе С4-27 частотный диапазон 1,9 -12 ГГц, полосу пропускания - минимальную (1 кГц), развертку – 0,3 с, постоянную времени 0,03 мс. Переключите вертикальный масштаб анализатора МОЩН, полосу обзора 2-80 МГц, плавная регулировка -максимальная. Включите в генераторе СВЧ режим непрерывной генерации (НГ), ослабление выходного аттенюатора 30дБ, частоту – 2 ГГц.

Поставьте переключатель МЕТКИ в положение НЕСУЩАЯ. Отрегулируйте размер изображения так, чтобы линия развертки совпадала бы с нижней линией шкалы индикатора, а метка занимала бы примерно 6-8 делений по вертикали.

Ручкой ЦЕНТР.ЧАСТОТА установите метку на центральную вертикальную линию шкалы. Переведите переключатель ОБЗОР в положение 0,1 – 5 МГц. Положение метки при этом должно сохраняться, в противном случае подстройте положение метки регулятором, выведенным под шлиц. Эта метка соответствует центральной частоте анализатора ПЧ, равной 160 МГц.

Определите реальную полосу обзора анализатора. Для этого переключите МЕТКИ в положение 1 МГц и измерьте узкую полосу качания (0.1-5 МГц). Затем измерьте широкую полосу качания 2 – 80 МГц, используя метки 10 МГц. Запишите полученные результаты.

### *2. Измерение частоты гармонических сигналов СВЧ*

Измерьте поданный на вход сигнал генератора СВЧ. Для этого на преобразователе частоты установите визир на отметку 2000 МГц по шкале частот 1,9 – 3,9 ГГц. Получите максимальную величину отклика сигнала генератора, регулируя режим преобразователя ручкой ТОК СМЕСИТЕЛЯ. Установите переключатель НЕСУЩАЯ. Расстояние между меткой и откликом сигнала по горизонтальной оси соответствует абсолютной погрешности градуировки шкалы генератора СВЧ. Измерьте ее, используя частотные метки 10, 1 и 0, 1 МГц. При необходимости регулируйте полосу обзора.

Повторите измерения погрешности установки на частотах 2100, 2200, 2300, 2400, 2500 МГц. Результаты измерений сведите в таблицу. Постройте график погрешности градуировки генератора СВЧ.

### *3. Измерение чувствительности анализатора С4-27*

Установите масштаб индикации МОЩН, полосу обзора – максимальную (80 МГц), полоса УПЧ – 1 кГц. Регулировкой выходной мощности генератора добейтесь совпадения отклика сигнала с 9 делениями шкалы при максимальном коэффициенте усиления ( ОТСЧЕТ АМПЛИТУД - 49 дБ, УСИЛЕНИЕ – крайнее правое положение). Запишите уровень выходной мощности генератора СВЧ – он равен чувствительности анализатора спектра при узкой полосе УПЧ. Установите полосу УПЧ 300 кГц и отрегулируйте усиление так,

чтобы размер собственных шумов составлял бы 4-5 делений. Повторите измерение чувствительности для случая максимальной полосы УПЧ.

#### *4. Измерение вертикального масштаба шкалы анализатора С4-27*

Установите максимальный уровень сигнала генератора (-27 дБ·Вт), квадратичный масштаб по вертикали (МОЩН). Отрегулируйте положение и высоту отклика сигнала так, чтобы он занимал 10 делений в центре экрана (используйте ручки УСИЛЕНИЕ, ОТСЧЕТ АМПЛИТУД). Плавно увеличивая ослабление аттенюатора генератора и - тем самым уменьшая уровень выходной мощности, - поочередно добейтесь совпадения отклика с каждым делением шкалы по вертикали. Запишите полученные при этом значения ослабления A, дБ. Рассчитайте абсолютную величину выходной мощности по формуле  $P = 10^{(3-A/10)}$ , мВт. Результаты сведите в таблицу. Повторите измерения для линейного масштаба по вертикали (переключатель в положении ЛИН).

Постройте графики полученных зависимостей. По оси Y отложите установленную мощность генератора, по оси X – число делений вертикальной шкалы.

#### *5. Исследование спектров узкополосного радиоимпульса СВЧ*

Для получения радиоимпульсов используется генератор СВЧ в режиме внешней импульсной модуляции. Подайте на генератор модулирующий сигнал от генератора импульсов положительной полярности с амплитудой порядка 5-10 В. Длительность импульса 10 мкс, частота повторения порядка 500 Гц.

С помощью ручек ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЧАСТОТА и ОБЗОР добейтесь появления спектра радиоимпульса в центре экрана. Для получения удобного масштаба по горизонтали используйте узкую полосу обзора 0,1 - 5 МГц.

Зарисуйте спектр и определите частотный масштаб изображения с помощью меток 0,1 МГц. Измерьте положение нулей огибающей спектра. По ширине главного лепестка оцените реальную длительность импульса и сравните ее с длительностью импульса модуляции.

Повторите измерение спектра, устанавливая длительность модулирующих импульсов 15 и 20 мкс.

### **Содержание отчета по лабораторной работе**

Отчет должен содержать структурную схему установки, таблицы данных и графики измеренных зависимостей.

### **Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте измерительные задачи, решаемые анализатором спектра последовательного типа.
2. Какие особенности имеет измерение спектров в СВЧ диапазоне?
3. Для чего в анализаторах спектра используют двойное или тройное преобразование частоты?
4. Поясните структурную схему последовательного анализатора спектра.  
Укажите назначение основных блоков прибора.
5. Как устроен анализатор спектра С4-27? Какие функции выполняет блок преобразователя частоты?
6. Что такое рабочий диапазон частот и полоса обзора спектроанализатора и чем они отличаются?
7. Что такое динамический диапазон анализатора спектра? Почему стремятся сделать его большим?
8. Как производят измерение амплитуд спектральных составляющих в спектроанализаторах последовательного типа?
9. Как выполняется измерение частоты гармоник в анализаторе спектра С4-27?
10. Какие параметры анализатора спектра определяет полоса пропускания УПЧ? В каких случаях ее необходимо подбирать?
11. Что такое прямой и зеркальный каналы спектроанализатора?

## 7. ИЗМЕРЕНИЕ АЧХ СВЧ УСТРОЙСТВ МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ ПРИБОРОМ Р2-78

В лабораторной работе студенты знакомятся с устройством и принципом действия микропроцессорных скалярных измерителей параметров СВЧ трактов типа Р2-73...Р2-82. Эти приборы построены по единой конструктивной схеме и отличаются диапазоном частот и измерительными трактами СВЧ. В работе их изучение проводится на примере прибора Р2-78, работающего в диапазоне частот 1,25 -5 ГГц. Изучаются методы их использования для исследования частотных характеристик устройств СВЧ.

### **7.1. Особенности микропроцессорных анализаторов цепей СВЧ**

Микропроцессорные автоматизированные скалярные анализаторы цепей СВЧ обеспечивают лучшую точность измерения сигналов после детекторов и дополнительные функциональные возможности их обработки и индикации. Они отличаются от аналоговых приборов цифровыми методами измерения и обработки НЧ сигналов, а также программным принципом управления работой прибора. СВЧ тракты таких приборов принципиально не отличаются от традиционных аналоговых измерителей.

Наиболее важной особенностью цифровых измерителей является возможность частотной калибровки прибора в каждой точке измерения с запоминанием результатов в памяти микропроцессора. Фактически при калибровке измеряется собственная АЧХ прибора. Данные калибровки в дальнейшем используют как поправочный множитель при выводе результатов измерений. Такая калибровка исключает систематическую погрешность из-за неидеальной собственной АЧХ измерителя. При этом не надо регулировать параметры измерительных каналов и жестко стабилизировать амплитуду сигнала ГКЧ.

Однако такая калибровка должна выполняться каждый раз при установке новой полосы качания частоты.

Цифровые анализаторы позволяют увеличить точность измерения уровней НЧ сигналов после детекторов, устранив субъективные погрешности и осуществить вывод результатов в цифровом виде. Каждый измерительный канал представляет собой селективный цифровой вольтметр, точность которого определяется разрядностью АЦП. При программном управлении прибором предусматривают цифровую систему установки и измерения частоты ГКЧ. Рабочий диапазон частот при этом дискретизируют, закон изменения частоты делают ступенчато – нарастающим. Каждая ступенька соответствует дискретной частотной точке, в пределах которой в течение небольшого интервала времени частота не меняется. За это время проводится аналого-цифровое преобразование сигналов, а встроенный или внешний электронно-счетный частотомер измеряет частоту ГКЧ. Данные с АЦП и ГКЧ запоминаются в памяти микропроцессорной системы и, после обработки, выводятся на экран цифрового дисплея.

Цифровые приборы позволяют снизить погрешности преобразования СВЧ детекторов. Для этого предусматривают режим предварительной калибровки их характеристики и корректировки данных измерения. При калибровке на детектор последовательно подают сигнал с различной амплитудой и измеряют коэффициент преобразования. Зависимость коэффициента преобразования от амплитуды сигнала учитывается при выводе результатов измерения КСВН и ослабления.

## **7.2.Краткие технические данные панорамного измерителя Р2-78 и его структурная схема**

Возможности микропроцессорных цифровых приборов проиллюстрируем на примере серии измерителей КСВН и ослабления Р2-78...82. Эти приборы измеряют КСВН и коэффициент передачи (ослабление) коаксиальных СВЧ-устройств с воспроизведением их частотных зависимостей на экране

не дисплея и цифровым отсчетом измеряемых величин. Приборы серии отличаются видами измерительного тракта (коаксиал 50 Ом - 3,5/1,5; 7/3; 16/6,95 мм, 75 Ом - 16/4,6), а индикатор и генераторный блок выполнены по единой схеме, поэтому в дальнейшем будем рассматривать измеритель Р2-78.

Генератор качающейся частоты прибора включает в себя задающий генератор (ЗГ), выполненный на транзисторах и работающий в диапазоне 1,25...2,5-ГГц (рис.7.1). Электрическая перестройка ЗГ обеспечивается варикапами. Стабилизация амплитуды осуществляется полупроводниковым аттенюатором. Управляющий сигнал на него поступает от усилителя автоматической регулировки мощности (АРМ). Амплитудная модуляция сигнала с частотой 100 кГц производится полупроводниковым коммутатором. Для перекрытия диапазона 2,5...5 ГГц используется удвоение частоты задающего генератора. Устройство управления ГКЧ преобразует код, поступающий от микропроцессорной системы, в напряжение, управляющее варикапами ЗГ. Кроме того, оно выбирает необходимый диапазон частот, включая или выключая удвоитель частоты. ГКЧ содержит также блок частотных меток, вырабатывающий импульсы опорной частоты (1248 МГц), а также импульсы сетки частот в диапазоне 1,25...2,5 ГТц с дискретом 8 МГц.. Эти импульсы используются для оцифровки шкалы частот на экране индикатора.

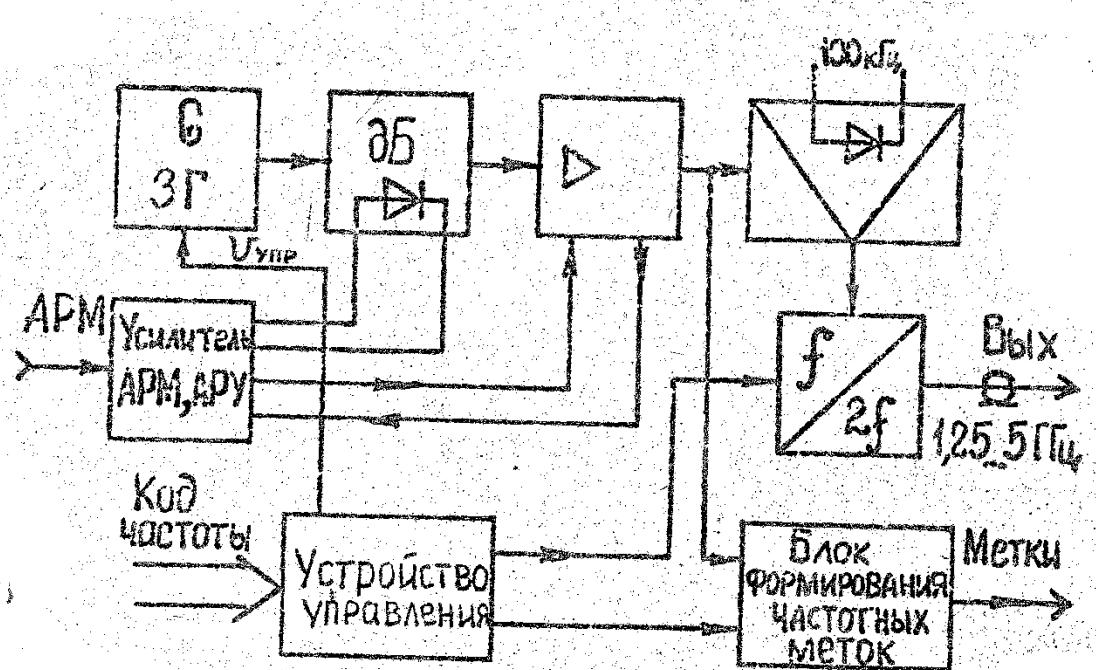


Рис. 7.57. Структурная схема ГКЧ измерителя Р2-78

Измерительный тракт прибора включает три канала – падающей (С), отраженной (А) и прошедшей (В) волн (рис.7.2).

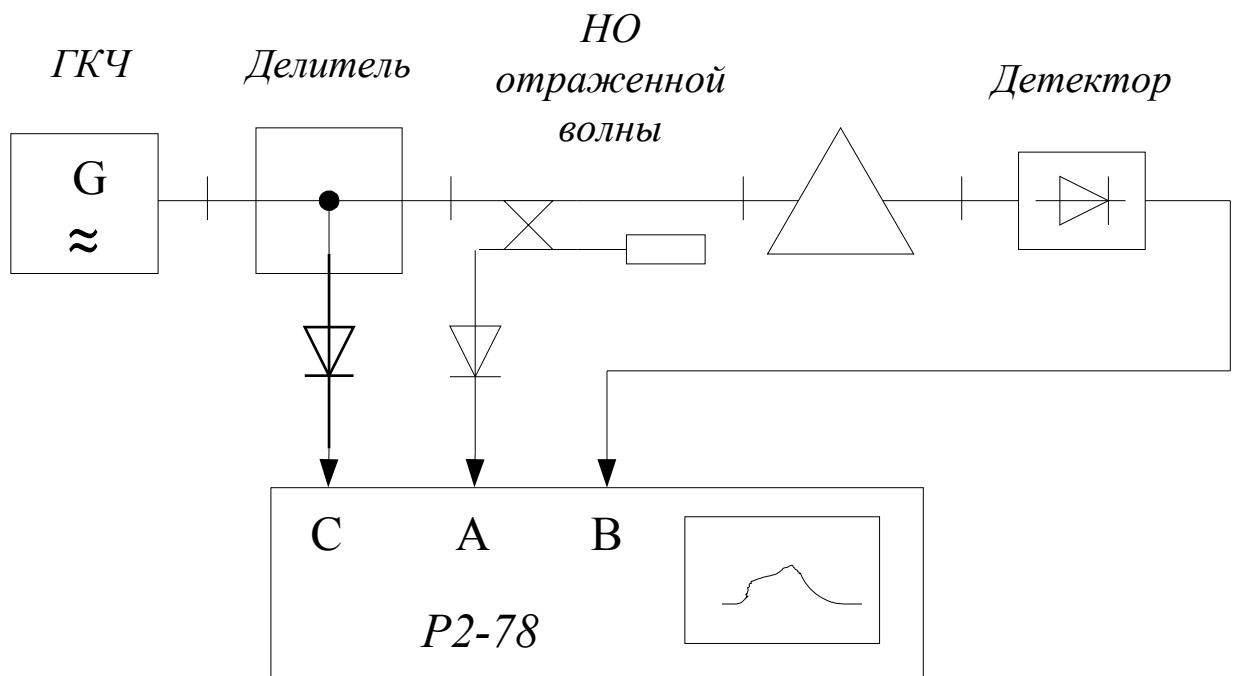


Рис. 7.58. СВЧ тракт измерителя Р2-78

Сигнал падающей волны выделяется с помощью широкополосного делителя мощности, установленного на выходе генератора. Сигнал отраженной волны в канале А формируется направленным ответвителем (использован гибридный мост), а сигнал проходящей волны в канале В – согласованной детекторной секцией. Сигналы поступают на индикаторный блок, который содержит аналоговые и цифровые блоки преобразования сигналов, а также микропроцессорную систему (МПС) (рис.7.3)

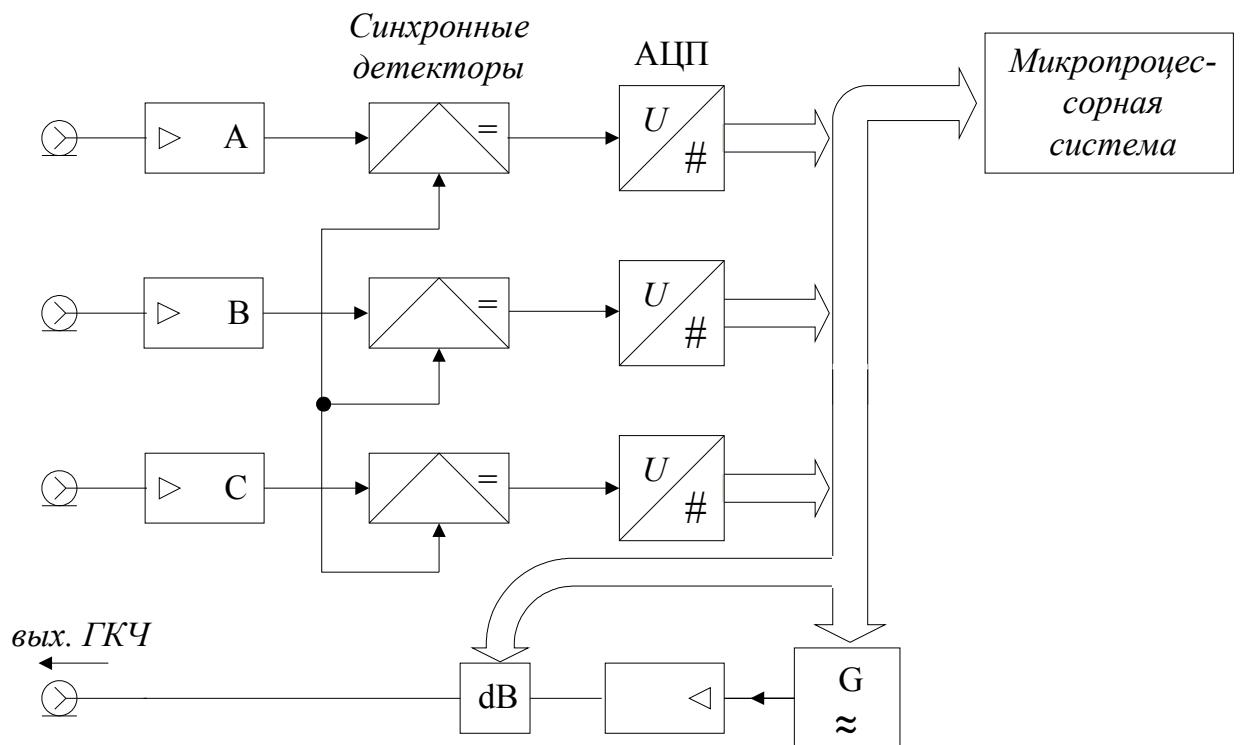


Рис. 7.59. Структурная схема измерителя КСВН и ослабления Р2-78

Прибор работает под управлением МПС по программам, хранящимся в ПЗУ емкостью 4Кслов (длина слова МПС – 12 бит). Результаты измерения размещаются в ОЗУ емкостью 8Кслов. Входной аналоговый преобразователь содержит усилители и синхронные детекторы. Кроме этого, предусмотрены электрически управляемые дискретные коммутаторы (шаг ослабления 5 дБ, управление как ручное, так и автоматическое – от МПС). Все управление прибором реализуется программным способом. Оператор переключает режимы работы с помощью кнопочного табло на передней панели прибора. На-

чальное состояние прибора устанавливают кнопкой ОБЩ. X (Сброс). Алгоритм управления прибором заложен в программное обеспечение МПС и включает в себя следующие этапы: установку частотного диапазона (нижней и верхней граничных частот), автоматическую разбивку диапазона на 512 частотных точек, калибровку прибора и измерение параметров исследуемого устройства в этих точках. Первым калибруется канал опорного сигнала С – при этом устанавливают рабочий уровень сигнала генератора. Затем калибруют каналы отраженной волны А (образцовые нагрузки КЗ, ХХ) и проходящей волны В (калибруют по прямому соединению генератора и входа В).

В процессе измерения микропроцессор подает на ГКЧ последовательность кодов частотных точек и получает информацию о реальной частоте ГКЧ от встроенного ЭСЧ. Одновременно производится аналого-цифровое преобразование всех трех сигналов, и результат записывается в оперативную память МПС. Там же хранится результат предварительно проведенной калибровки каналов. На индикатор подаются частотные зависимости КСВН,  $|r|$ , А (в дБ или в относительных единицах). Они рассчитываются по отношениям амплитуд сигналов в каналах с учетом калибровки. Цифровая информация АЧХ выводится на экран дисплея, причем выбор индицируемой точки осуществляется оператором с помощью частотной метки в виде перемещающейся вертикальной линии. Микропроцессорная система управляет также и выходным аттенюатором ГКЧ, регулируя уровень сигнала генератора.

#### Технические и метрологические параметры прибора:

- Частотный диапазон - 1,25 ...5,0 ГГц, 512 частотных точек;
- Установка ширины качания частоты в пределах 50 МГц ..3750 МГц с дискретом 5 МГц с разбивкой на 512 дискретов;
- Выходная нестабилизированная мощность ГКЧ 2...10 мВт, при стабилизации рабочий уровень мощности падающей волны можно устанавливать на малом ( $<10^{-2}$  мВт) и среднем (до 0.5 мВт) уровнях мощности; прибор имеет функцию измерения мощности падающей волны;

- АЦП и микропроцессорная система имеет 12 двоичных разрядов, что соответствует разрешающей способности измерения уровня порядка 0,025%;
- Измерение ослабления (-50 ÷ +30) дБ с абсолютной погрешностью в пределах  $\Delta A = \pm (0.03A_x + 0.2)$  дБ.
- Измерение КСВН в диапазоне 1,04 … 5,0 с относительной погрешностью  $\delta KCBN = \pm (3 \cdot KCBN + 1)\%$ ;
- Точность измерения частоты  $\delta f = \pm 0.2\%$ .
- Выходное сопротивление 50 Ом, коаксиальный СВЧ тракт с разъемом 7/3.

Микропроцессорная система обеспечивает следующие функциональные возможности прибора:

- Управление процессами калибровки, измерений и обработки измерительных данных;
- Автоматическую и ручную установку пределов измерения;
- Логарифмический масштаб по вертикали (кнопка **lg**);
- Использование двух контрольных уровней **K1** и **K2**;
- Запоминание исследуемых характеристик и проведение сравнительных измерений;
- Накопление результатов (усреднение по многократным измерениям) для фильтрации шумов при малых сигналах (кнопка  $\Sigma / N$ ). Этот режим используют при измерении больших ослаблений или малых КСВН;
- Коррекцию неквадратичности характеристик детекторов (калибровка характеристик преобразования);
- Контроль СВЧ-мощности генератора;
- Передачу результатов измерения АЧХ во внешний компьютер;
- Диалоговый режим при калибровке и измерениях, автоматическое обнаружение ошибок и неверных действий оператора.

Микропроцессорная система обеспечивает диагностику ошибок прибора. Тип ошибки выводится на экран в виде ОШИБКА №:

- 1 - сбой при вводе частоты. Необходимо нажать ОБЩ.Х и повторить ввод.
- 2 – сбой генератора СВЧ. Необходимо нажать кнопку X и можно продолжать работу.
- 3 - неверно введены частоты. Требуется повторить ввод частот.
- 5 – неверное положение аттенюаторов каналов в ручном режиме при калибровке. Нажать X и повторить калибровку.
- 6 – переполнение АЦП. Нажать X и повторить калибровку.

### **7.3. Задание и указания к выполнению лабораторной работы**

#### *1. Подготовка установки к работе*

По указанию преподавателя в лабораторной работе выполняется исследование частотных характеристик четырехполюсного устройства СВЧ (фильтры, коммутаторы на полупроводниковых диодах, направленных ответвителей и др.).

Программа работы включает в себя установку частотного диапазона измерения, калибровку опорного канала С и установку рабочего уровня мощности, калибровку каналов А и В, измерение АЧХ устройства.

Отметим, что управление прибором осуществляется достаточно длительным нажатием кнопок на передней панели. Время реакции прибора достигает в ряде случаев единиц секунд. Не следует хаотически нажимать кнопки – это приводит к сбою в работе прибора. Все ошибочные ситуации, как правило, приводят к необходимости сброса прибора и, к сожалению, повторения всех этапов заново. Отметим, что многие операции управления (ввод численных значений частот, подтверждения установки образцовой нагрузки и др.) завершаются нажатием кнопки # (ВВОД).

Соберите измерительный тракт прибора, для исследования частотных характеристик ослабления либо КСВ (см. рис.2).

Нажмите СБРОС (ОБЩ.Х) и включите канал С. Для установки полной полосы качания нажмите  $\Delta F_{\max}$ . (Если необходимо установить более узкую полосу, надо нажать кнопку F1, набрать требуемое значение частоты (в ГГц) и нажать ВВОД. Аналогично устанавливают верхнюю граничную частоту F2.)

В лабораторной работе используется малый уровень мощности. Установите ручкой УРОВЕНЬ на ГКЧ такое значение выходного напряжения, чтобы сигнал в канале С составлял 2 мВ. Просмотрите АЧХ сигнала падающей волны в канале С. Нажмите ВВОД. При этом АЧХ падающей волны запоминается в ОЗУ и в дальнейшем используется для коррекции измеряемых характеристик.

Прибор готов для калибровки каналов А и В.

## *2. Калибровка измерительных каналов А и В*

Откалибруйте канал А (канал отраженной волны) по сигналу холостого хода. На вход Zx ничего подключать не надо. Нажмите кнопку ▼ (КАЛИБРОВКА). В ответ на вопрос КАНАЛ? нажмите кнопку А. РЕЖИМ? – кнопку >|. Появится надпись КАЛИБР.ХХ. Нажмите ВВОД, просмотрите АЧХ ХХ и вторично нажмите ВВОД. Появится надпись КАЛИБР. К3. Подключите короткозамыкатель, нажмите ВВОД. Отключите канал, нажав кнопку А. Отедините К3 нагрузку. Канал отраженной волны откалиброван.

По аналогичной методике калибруют и канал проходящей волны. Нажмите кнопку ▼ (КАЛИБРОВКА). В ответ на вопрос КАНАЛ? нажмите кнопку В. РЕЖИМ? – кнопку +. Подключите детекторную головку канала В к разъему Zx и нажмите ВВОД. Отключите канал, нажав кнопку В. Канал проходящей волны откалиброван.

## *3. Измерение АЧХ четырехполюсников СВЧ*

Включите исследуемое устройство между разъемом Zx и детектором канала В. Нажмите кнопки А, В, и КСВН. При этом прибор работает в режиме одновременного измерения КСВН в канале А и ослабления в канале В.

Зарисуйте полученные графики АЧХ. Проведите измерение АЧХ КСВН и ослабления. Для этого перемещайте частотную метку по графику и записывайте частоту и измеренное значение в таблицу результатов. Значения КСВН (К) и ослабления А выводятся в верхнем левом углу экрана. Если график имеет области резкого изменения уровня, то использовать автоматический выбор масштаба по вертикали неудобно. В этом случае используйте ручной режим выбора масштаба (ручное управление аттенюаторами измерительного блока) или перевести индикатор в логарифмический масштаб по вертикали.

#### *4. Измерение фрагмента АЧХ устройства*

В случае узкополосного устройства для точного измерения АЧХ в полосе пропускания требуется изменить диапазон качания частоты. Для этого необходимо сбросить прибор в исходное состояние. Затем установите нижнюю F1 и верхнюю F2 частоты рабочего диапазона. Повторите процедуру калибровки прибора и измерьте фрагмент АЧХ для узкого диапазона качания частоты.

#### *5. Исследование частотных характеристик с использованием контрольных уровней*

Изучите работу с контрольными уровнями K1 и K2. При нажатии кнопок K1 или K2 на экране появляется плавно перемещающаяся горизонтальная линия уровня. Остановите линию в нужной точке, нажав кнопку ВВОД.

Измерьте полосу пропускания устройства по выбранному уровню (например, -3 дБ). Для этого, установив линию контрольного уровня, отсчитайте частоты точек пересечения его с АЧХ. Запишите результаты измерения.

## *6. Изучение режима сглаживания и накопления данных.*

Изучите режим накопления результатов, исследуя фрагмент графика АЧХ с повышенным уровнем шума. Включите режим сглаживания и зарисуйте изменение графика. Аналогично исследуйте режим накопления.

## **Содержание отчета по лабораторной работе**

Отчет должен содержать структурную схему установки, таблицы данных и графики измеренных АЧХ.

## **Контрольные вопросы**

1. Укажите назначение автоматизированных микропроцессорных измерителей параметров цепей СВЧ типа Р2.
2. какие элементы входят в измерительный тракт СВЧ прибора Р2-78: как их параметры влияют на точность измерения АЧХ?
3. Как устроен ГКЧ измерителя Р2-78? Как выполняется перестройка частоты в ГКЧ?
4. Для какой цели в ГКЧ установлен диодный модулятор НЧ? Какая частота модуляции в приборе Р2-78?
5. Укажите назначение системы АРМ прибора Р2-78. Как управляют мощностью выходного сигнала ГКЧ?
6. Для чего используют канал С прибора? Что выполняется в процессе его калибровки?
7. Какие функции выполняет измерительный блок прибора Р2-78? Какие меры увеличения точности предусмотрены в этом блоке?
8. Почему калибровка прибора Р2-78 является обязательным этапом измерений? Как ее производят для измерения ослабления? для измерения КСВ?
9. Что такое частотная метка микропроцессорного прибора Р2-78? Как производят оцифровку шкалы?
- 10.Какие виды масштабов по вертикали предусмотрены в приборе Р2-78? В каких случаях применяют тот или иной масштаб?

11. Какие дополнительные функциональные возможности реализованы в программном обеспечении прибора Р2-78?

## **8. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ СВЧ СИГНАЛОВ МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ ЭЛЕКТРОННО-СЧЕТНЫМ ЧАСТОТОМЕРОМ Ч3-66**

В лабораторной работе студенты знакомятся с микропроцессорным частотометром Ч3-66, устройством и режимами его работы, методикой измерения частоты сигналов СВЧ-диапазона.

### **8.1. Электронно-счетные частотомеры диапазона СВЧ.**

В диапазоне СВЧ наиболее распространены два метода измерения частоты. Традиционный резонансный метод в настоящее время имеет вспомогательный характер и применяется в основном в частотомерах измерительных генераторов СВЧ. Второй метод – метод дискретного счета – используется в электронно-счетных частотомерах СВЧ (ЭСЧ).

Его принцип заключается в подсчете за известный (образцовый) интервал времени  $T_{\text{сч}}$  (временные ворота) числа импульсов  $N$ , сформированных из входного сигнала неизвестной частоты  $f_x$ . Тогда измеряемую частоту (точнее, ее среднее значение за время  $T_{\text{сч}}$ ) можно определить по формуле  $f_x \approx N/T_{\text{сч}}$ . Метод дискретного счета является разновидностью метода сравнения - результат показывает, во сколько раз неизвестная частота больше известной эталонной, из которой формируют интервал  $T_{\text{сч}}$ . Значение  $N$  соответствует целому числу периодов  $T_x = 1/f_x$ , укладывающихся в интервале  $T_{\text{сч}}$ .

Приборы, основанные на методе дискретного счета, называют электронно-счетными частотомерами (ЭСЧ, electronic counters). Современные ЭСЧ — это многофункциональные приборы для измерения частотно-временных параметров сигналов (частоты, периода, числа импульсов, временных

интервалов и пр.). ЭСЧ различаются количеством измеряемых параметров, диапазоном и точностью измерений.

Обобщенная структурная схема ЭСЧ в режиме измерения частоты представлена на рис. 8.1.

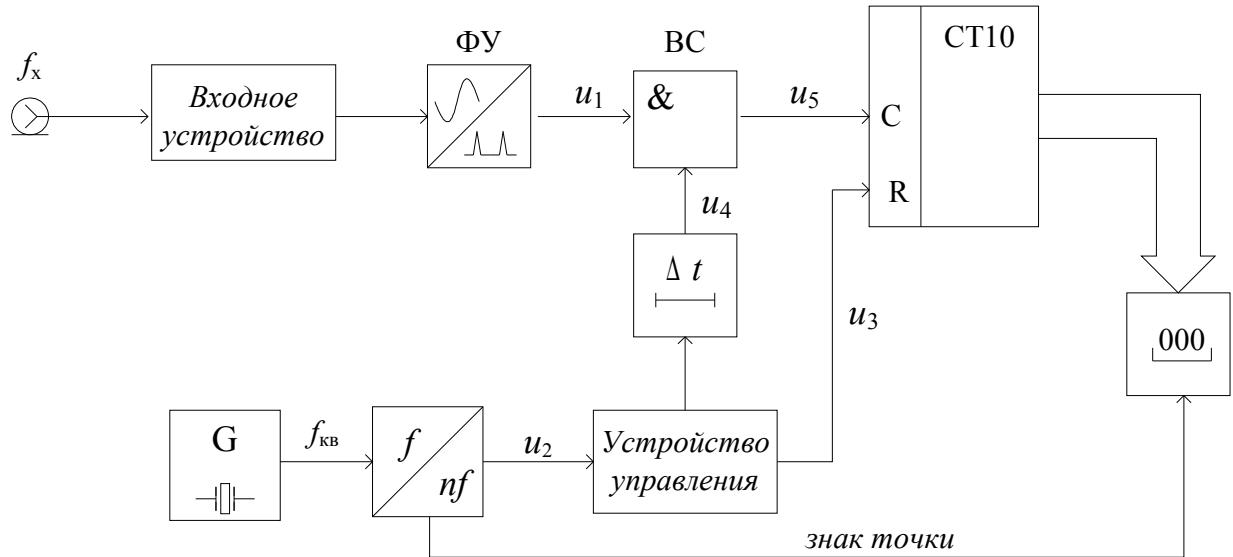


Рис. 8.60. Структурная схема электронно-счетного частотометра

Сигнал неизвестной частоты  $f_x$  подают на вход ЭСЧ. Сигнал образцовой частоты  $f_{\text{кв}} = 1/T_{\text{кв}}$  вырабатывается высокостабильным кварцевым генератором. Входное устройство содержит аттенюатор, схему автоматической регулировки усиления и подавитель внешних помех (сглаживающий фильтр). Обычно ЭСЧ имеет большое входное сопротивление (порядка 1 МОм), но для ВЧ-измерений используют стандартное входное сопротивление 50 или 75 Ом.

Формирующее устройство (ФУ) представляет собой преобразователь формы сигнала. Оно содержит усилитель-ограничитель с регулируемым порогом срабатывания, дифференцирующую цепочку и импульсный диодный ограничитель. Задача устройства — преобразовать входной сигнал синусоидальной или другой формы в короткие импульсы  $u_1$ , частота повторения которых равна частоте входного сигнала (рис. 8.2).

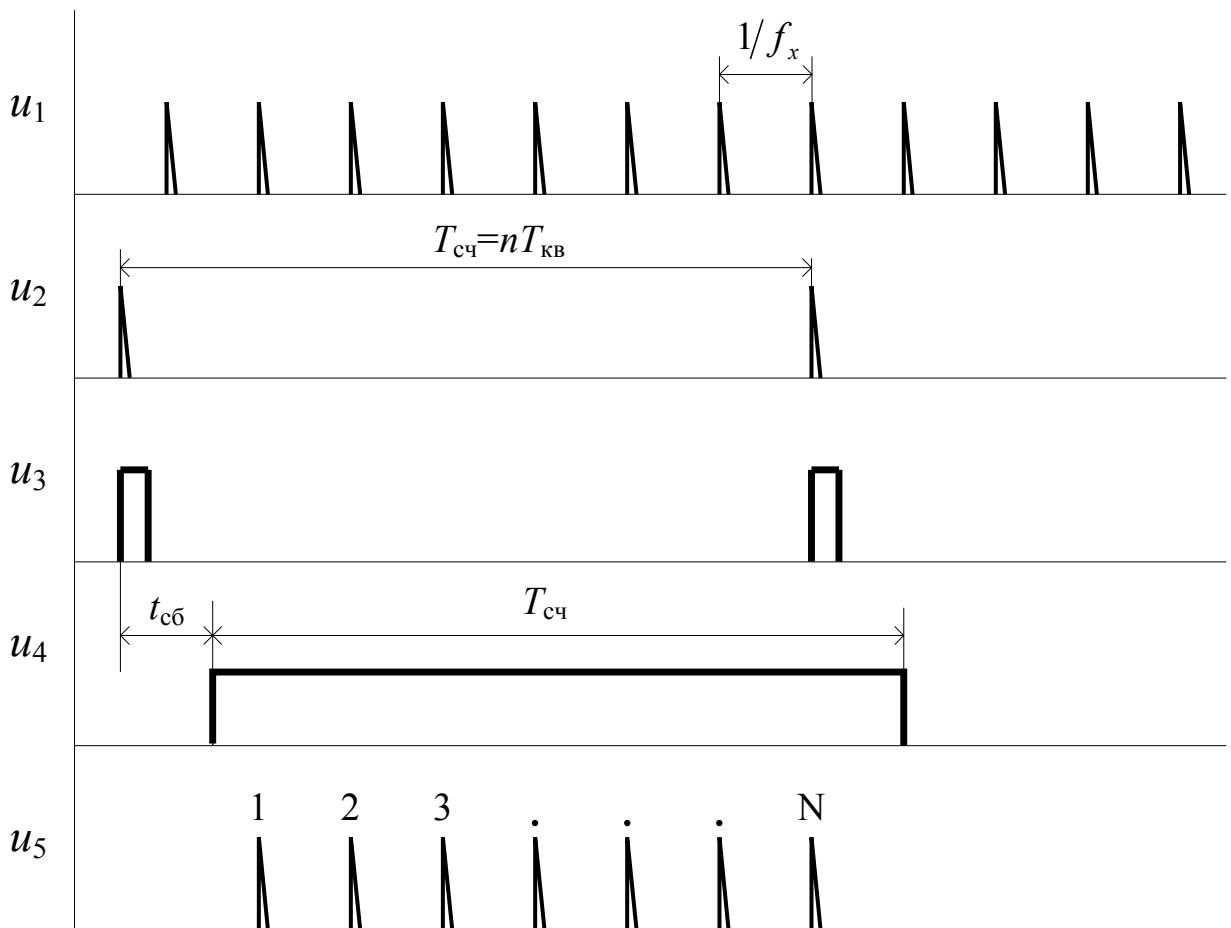


Рис. 8.61. Осциллографмы сигналов ЭСЧ в режиме измерения частоты

Так как именно эти импульсы в дальнейшем поступают на счетчик, то их называют счетными импульсами. Вид формирующего устройства определяет чувствительность ЭСЧ – минимальный уровень сигнала, частоту которого можно измерить без ошибок. Для повышения чувствительности в частотомерах иногда предусматривают входной широкополосный усилитель.

Временной селектор (ВС) — это логический элемент "И", который выделяет из входной последовательности пачку  $N$  импульсов, укладывающихся в образцовый интервал  $T_{сч}$  – временные ворота. Длительность ворот  $T_{сч}$  формируют делением частоты сигнала кварцевого генератора. В ЭСЧ используют термостатированные генераторы с кварцевой стабилизацией частоты. Работа термостата контролируется по индикатору на лицевой панели прибора. Установку  $T_{сч}$  производят делением частоты  $f_{кв}$  с помощью декадного делите-

ля частоты. Коэффициент деления выбирают из соотношения  $n = 10^k$ ,  $k = 0,1,2\dots$  При этом  $T_{\text{сч}} = \pi T_{\text{кв}} = T_{\text{кв}} 10^k$ .

Выбор временных ворот  $T_{\text{сч}}$  определяет интервал усреднения частоты, поскольку ЭСЧ измеряет среднюю частоту. Обычно применяют временные ворота в пределах 1 мс ... 10 с. Меньшее время увеличивает погрешность дискретности (см. ниже), а большее время (10 с и более) – снижает быстродействие измерений.

Устройство управления позволяет выбрать режим работы ЭСЧ. Типовым является режим периодического запуска, когда измерение повторяется через регулируемый интервал времени (иногда его называют временем индикации). В ряде случаев используют одиночный запуск - измерение выполняется при поступлении на вход внешнего запуска импульса. Ручной запуск осуществляют нажатием кнопки на приборе.

В начале измерения на счетчик из устройства управления посыпается импульс сброса  $u_3$ . Одновременно триггером устройства управления формируется прямоугольный строб-импульс длительностью  $T_{\text{сч}}$ . Этот импульс сдвигается во времени в устройстве задержки на время  $t_{\text{сб}}$ , необходимое для сброса счетчика. После задержки импульс  $u_4$  (временные ворота) подается на селектор и открывает его. Число импульсов  $u_5$ , проходящих через временной селектор на счетчик, равно:  $N = \text{int}[f_x T_{\text{сч}}]$ , где  $\text{int}[\cdot]$  означает целую часть числа.

Процесс измерения сводится к подсчету числа импульсов  $N$ , укладываемыхся во временные ворота  $T_{\text{сч}}$ , дешифрации показаний счетчика и индикации его состояния на цифровом табло. Если выбрать частоту кварцевого генератора в виде  $f_{\text{кв}} = 10^p$  [Гц], где  $p$  – целое число, то с учетом коэффициента деления  $n = 10^k$  получим  $f_x = 10^{(p-k)}N$  [Гц]. Таким образом, число сосчитанных импульсов пропорционально измеряемой частоте с коэффициентом, кратным 10. Это позволяет упростить масштабирование результатов измерения. На цифровом индикаторе предусматривают знак десятичной точки, положение которой связано с коэффициентом деления частоты кварцевого генератора.

Кроме этого на индикаторе высвечиваются обозначения производных единиц (кГц, МГц, ГГц). Таким образом, ЭСЧ дает прямые показания измеряемой частоты, выраженной в системных единицах.

Погрешность измерения частоты методом дискретного счета включает две составляющие: погрешность установки частоты кварцевого генератора  $\delta_{\text{кв}} = \pm \Delta f_{\text{кв}} / f_{\text{кв}}$  и погрешность дискретности счета  $\delta_d$

$$\delta f = \pm(\delta_{\text{кв}} + \delta_d).$$

Первая составляющая является погрешностью меры и определяется нестабильностью частоты кварцевого генератора, а также погрешностью его калибровки. Типовые значения нестабильности терmostатированного генератора ЭСЧ составляют  $\pm(1 \cdot 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-9})$  за сутки.

Погрешность дискретности является погрешностью сравнения. Она возникает из-за того, что длительность временных ворот  $T_{\text{сч}}$  в общем случае не совпадает с целым числом периодов измеряемого сигнала. Максимальная ошибка при подсчете количества периодов составляет  $\pm 1$ , что соответствует единице последнего разряда счетчика. Абсолютная погрешность дискретности равна  $\pm 1/T_{\text{сч}}$ , а относительная погрешность  $\delta_d = \pm 1/(f_x T_{\text{сч}}) = \pm 1/N$ . Таким образом, при фиксированном  $T_{\text{сч}}$  погрешность дискретности обратно пропорциональна измеряемой частоте и определяет разрешающую способность ЭСЧ (возможность различать близко расположенные значения измеряемой частоты). На низких частотах погрешность дискретности является основной составляющей, определяющей точность измерений частоты методом дискретного счета. На высоких частотах (более сотни МГц) она становится меньше нестабильности частоты опорного генератора и ею часто можно пренебречь.

Верхняя граница измеряемых частот определяется быстродействием основных элементов схемы, и прежде всего, счетчика. Для большинства ЭСЧ эта граница составляет несколько сотен МГц. Для расширения рабочего диапазона частот в область СВЧ применяют преобразование сигнала на более низкую частоту. Наиболее часто используются следующие типы преобразователей :

- Быстродействующие делители входной частоты. Они позволяют уменьшить частоту входного сигнала в целое (обычно от 2 до 16 раз). Расширение диапазона измерений в таких устройствах невелико (до нескольких ГГц). Достоинством такого способа является простота и надежность.
- Переносчики частоты с ФАПЧ.

В настоящее время чаще применяют автоматизированные переносчики частоты с фазовой автоподстройкой частоты (рис.8.3), аналогичные преобразователям частоты в векторных анализаторах цепей СВЧ .

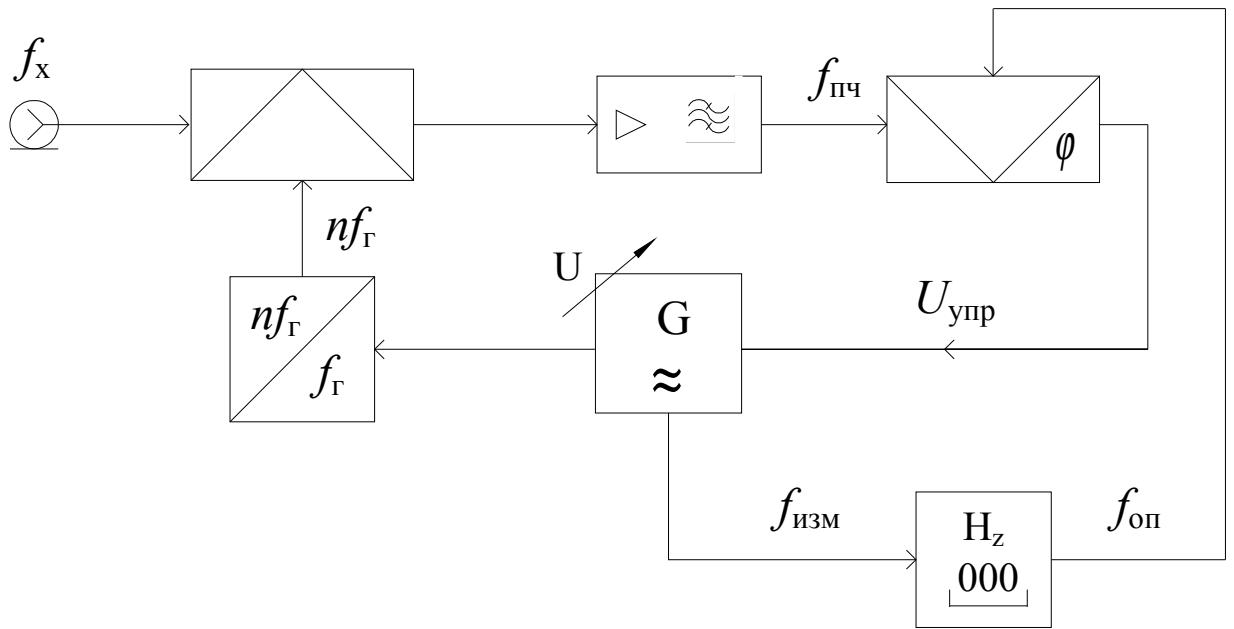


Рис. 8.62. Преобразователь частоты СВЧ с ФАПЧ

Гетеродин, управляемый напряжением, вырабатывает сигнал с частотой  $f_\Gamma$ . Генератор гармоник создает на выходе набор гармонических составляющих этого сигнала, которые селектируются узкополосным фильтром. Смеситель преобразует входной сигнал и  $n$ -ную гармонику гетеродина в гармонический сигнал промежуточной частоты  $f_{\text{пч}}$ . Он поступает на фазовый детектор, на который подают также сигнал опорной частоты с кварцевого генератора ЭСЧ. На выходе фазового детектора вырабатывается управляющее напряжение системы ФАПЧ, которое подстраивает гетеродин до наступления

синхронизации (захвата частоты) по какой - либо гармонике гетеродина. При захвате выполняется условие  $f_x - nf_{\varepsilon} = f_{on}$ , где  $f_{on}$  – известная опорная частота, а частота гетеродина  $f_{\varepsilon} = f_{изм}$  измеряется с помощью ЭСЧ.

Если ориентировочное значение измеряемой частоты неизвестно, то номер используемой гармоники требуется определить по двум измерениям. Для этого ручной перестройкой гетеродина добиваются захвата частоты по двум соседним гармоникам с номерами  $n$  и  $n+1$ . Получают два значения частоты гетеродина  $f_x - nf_{\varepsilon 1} = f_{on}$  и  $f_x - (n+1)f_{\varepsilon 2} = f_{on}$ . Отсюда определяют номер

$$n = \frac{f_{\varepsilon 2}}{(f_{\varepsilon 1} - f_{\varepsilon 2})}$$

номер гармоники. Входная частота тогда равна

$$f_x = \frac{f_{\varepsilon em1} f_{\varepsilon em2}}{(f_{\varepsilon em1} - f_{\varepsilon em2})}$$

Другой способ состоит в измерении неизвестной частоты на прямом ( $f_x - nf_{\varepsilon 1} = f_{on}$ ) и зеркальном ( $nf_{\varepsilon 2} - f_x = f_{on}$ ) каналах переносчика. В этом случае номер гармоники рассчитывается по формуле:

$$f_x = \frac{2f_{on}}{(f_{\varepsilon 1} - f_{\varepsilon 2})}$$

Такие процедуры устранения неоднозначности выбора номера гармоники могут быть реализованы как в ручном, так и в автоматическом режимах работы переносчика.

Достоинством переносчиков частоты является возможность измерения несущей частоты импульсно-модулированных (ИМ) сигналов. Система ФАПЧ обладает инерционностью и позволяет сохранить синхронизацию гетеродина в промежутках между импульсами. При этом на ЭСЧ подается сигнал гетеродина постоянной частоты. В случае коротких импульсов, когда захват ФАПЧ в автоматическом режиме настройки затруднен, используют ручной режим поиска гармоники по осциллографическому или стрелочному индикатору, включенному на выходе фазового детектора. Для этого при разомкнутой петле ФАПЧ перестраивают гетеродин до тех пор, пока на осцилло-

графе не получится картина нулевых биений несущей частоты импульса с частотой гармоники гетеродина.

Преимуществом преобразователей частоты по сравнению с обычным ЭСЧ является довольно высокая чувствительность (-30...-35 дБм). Она определяется большим коэффициентом усиления УПЧ в петле ФАПЧ. Динамический диапазон преобразователя определяется линейностью входного смесителя и достигает 40-50 дБ. Частотный диапазон современных частотомеров СВЧ с преобразователями частоты достигает 40 ГГц и выше.

## **8.2.Краткие технические данные частотомера ЧЗ-66 и его структурная схема**

Прибор предназначен для автоматического измерения частоты СВЧ сигналов как без модуляции (непрерывная генерация - НГ), так и с импульсной модуляцией (ИМ). Прибор имеет три диапазона работы и соответствующие им три входа (А, Б, В). Вход А имеет частотный диапазон 10 Гц...120 МГц. По этому входу прибор измеряет частоту НГ сигналов методом дискретного счета (рис.4.1-4.2) напрямую, без преобразования частоты. Второй вход Б предназначен для сигналов 120 МГц ...2 ГГц. В схеме по входу Б используется преобразователь частоты, поэтому прибор может измерять НГ и ИМ сигналы. Вход В содержит специальный разъем для подключения внешних смесителей и предусматривает коаксиальный вход для диапазона частот 2 ...12,5 ГГц и волноводные – для диапазонов 12,5..17,44 ГГц, 17, 44...25, 95 ГГц и 25, 95...37, 5 ГГц. В этом режиме осуществляется тройное преобразование частоты входного сигнала с НГ и ИМ.

Частотомер ЧЗ-66 обеспечивает следующие технические и метрологические параметры:

- Частотный диапазон прибора 10 Гц...37,5 ГГц с разбивкой на указанные выше поддиапазоны;

- Входной минимальный уровень сигнала по входу А – 50 мВ, максимальный – 1 В.
- Минимальная мощность сигнала на входе Б – 0,02 мВт (0,1 мВт в ИМ режиме), максимальный уровень 1 мВт;
- Минимальная мощность сигнала на входе В – 0,02..0,1 мВт (0,1 .. 0,2 мВт ИМ режиме), максимальный уровень 1 мВт;
- Пределы допускаемой относительной погрешности измерения

НГ сигналов  $\delta_{IA} = \pm \left( |\delta_0| + \frac{1}{f_x T_{\tilde{n}\ddot{\nu}}} \right)$ , где  $\delta_0$  – относительная нестабильность генератора опорных частот (не превышает  $\pm 5 \cdot 10^{-7}$ ),  $T_{\text{сч}}$  – время счета  $= 10^{-n}$  с,  $n = 0,1,2,3..$

- Пределы допускаемой относительной погрешности измерения ИМ сигналов при их длительности  $\geq 0,3$  мкс

$\delta_{EI} = \pm \left( |\delta_0| + \frac{1}{f_x T_{\tilde{n}\ddot{\nu}}} + |\delta_{\text{адд}}| + \frac{\Delta f_{\text{нс}}}{f_x} \right)$ , где  $\delta_{\text{ген}}$  – относительная нестабильность внутреннего гетеродина (не превышает  $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ ),  $\Delta f_{\text{сл}}$  – погрешность сличения частот по нулевым биениям (10...100 кГц).

Упрощенная структурная схема СВЧ частотомера ЧЗ-66 представлена на рис. 8.4.

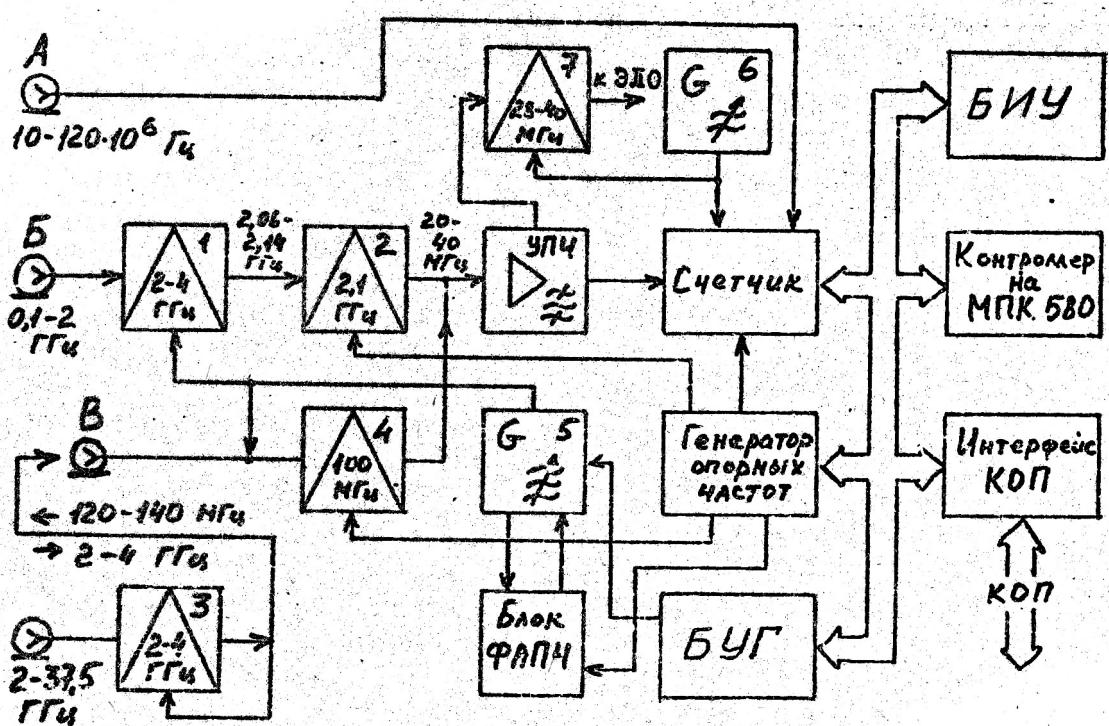


Рис. 8.63. Структурная схема частотомер ЧЗ-66

Схема работы прибора по входу А не отличается от рис.4.1 – сигнал после преобразования в импульсы подается на счетчик, данные с которого поступают в микропроцессорную систему (МПС). Стробирование входных импульсов осуществляется временным селектором в счетчике. Импульс времени счета формируется из сигнала генератора опорных частот (ГОЧ). Время счета (и обратное ему величину – разрешающую способность прибора по частоте) устанавливают в пределах  $10^n$ ,  $n=0, -1, -2, -3$  с. Для этого используют кнопку разрешающей способности прибора « $10^n$  Hz» и цифровые клавиши 0, 1, 2, 3.

При работе по входу Б в приборе предусмотрено двойное преобразование входной частоты 0, 12 ..2 ГГц. Используется два кольцевых смесителя, обозначенные на схеме 1 и 2. Первый смеситель использует сигнала от гетеродина, перестраиваемого в пределах 2-4 ГГц системой ФАПЧ . На выходе смесителя выделяется сигнал первой ПЧ в диапазоне 2,06 ...2,14 ГГц. То есть первое преобразование частоты делается вверх. Это позволяет эфек-

тивно подавить зеркальный канал приема паразитных сигналов. Второй смеситель использует постоянный сигнал гетеродина 2,1 ГГц, подаваемого с ГОЧ . Вторая ПЧ составляет 20..40 МГц. Сигнал с этой частотой фильтруется, усиливается и подается на счетчик, где и производится измерение. МПС обрабатывает результат измерения  $f_{\text{изм}}$  по формуле преобразования частоты  $f_B$  входного сигнала

$$f_A = f_5 \cdot 10^6 - 2,1 \cdot 10^9 + f_{\text{изм}}, \text{ Гц},$$

где  $f_5$  – частота первого гетеродина, МГц. Этот гетеродин в режиме НГ с помощью МПС перестраивается в диапазоне 2-4- ГГц с дискретом 1 МГц до тех пор, пока сигнал второго ПЧ не попадет в область 20 -30 МГц. После этого осуществляется поддержание частоты гетеродина системой ФАПЧ. Значение  $f_5$  при этом сохраняется в МПС и используется при расчете и выводе результата измерения.

В диапазоне частот от 2 до 37 ГГц измеряемый сигнал подают на выносной смеситель 3, подключаемый к входу В. Через разъем Б на смеситель поступает сигнал гетеродина (от генератора 5). Выходной сигнал промежуточной частоты поступает через тот же вход на второй преобразователь частоты. Преобразование входного сигнала в смесителе 3 производится в диапазоне 2.., 4 ГГц на основной гармонике перестраиваемого генератора 5. В диапазоне 4..8 ГГц используется вторая гармоника, третья – в диапазоне 8..12 ГГц и т.д., вплоть до десятой – на частотах 36...37, 5 ГГц. Преобразованный сигнал промежуточной частоты в диапазоне 120..140 МГц подают на смеситель 4. На него поступает от ГОЧ сигнал гетеродина 100 МГц. На выходе формируется сигнал ПЧ в диапазоне 20... 40 МГц, который затем поступает на счетчик. Номер гармоники вводят либо вручную (кнопка ГАРМОНИКА и набор номера на цифровой панели), либо он определяется автоматически. В этом режиме НГ осуществляется быстрая линейная перестройка частоты генератора 5 последовательно с несколькими скоростями  $\Delta f / \Delta t = V_0, V_0 / 2, V_0 / 4, \dots, V_0 / 10$ . В результате преобразования входного сигнала на выходе узкополосного УПЧ (частота 30 МГц) образуются два отклика, соответствующих прямому и

зеркальному каналам  $f_{изм} - N \cdot f_{5-1} = f_{пч0} = 30$  МГц и  $N \cdot f_{5-2} - f_{изм} = f_{пч0}$ . Здесь  $f_{5-1}$  и  $f_{5-2}$  – частоты генератора 5 при настройке на прямом и зеркальном каналах,  $N$  – номер определяемой гармоники.

Временной интервал между откликами зависит от скорости перестройки частоты и номера гармоники  $2 \cdot f_{изм} / (N \cdot V_0)$ . Это время сравнивается со временем, равным  $2 \cdot f_{изм} / V_0$ . В момент равенства времени скорость перестройки равна  $\Delta f / \Delta t = V_0 / N$  перестройка останавливается. Частота генератора 5 уменьшается до значения  $f_{5-1}$ , соответствующей настройке на прямой канал, и захватывается системой ФАПЧ. Номер гармоники индицируется на цифровом табло и учитывается при обработке результатов измерения по формуле

$$f_x = N \cdot f_5 \cdot 10^6 + f_{эчи}$$

где  $f_5$  – частота генератора 5, представляющая собой целое (2000-4000) число МГц,  $f_{изм}$  – измеренное счетчиком значение промежуточной частоты.

В режиме измерения частоты коротких радиоимпульсов (ИМ) по входам Б и В возникают трудности в работе системы ФАПЧ. Захват системы подстройки частоты за время импульса оказывается невозможным. В этом случае используется ручная перестройка частоты генератора 5. Ручкой ▼ грубой перестройки с дискретом 1 МГц добиваются попадания выходного сигнала преобразователя в диапазон частот 20 -40 МГц. Затем используют дополнительный генератор 6, который перестраивают меняя частоту генератора, добиваются появления на стрелочном индикаторе и на подключенном осциллографе сигнала нулевых биений на выходе смесителя 7. При этом наблюдается характерный вид сигнала, близкого по частоте к нулю.

Момент появление нулевых биений соответствует следующему соотношению частот

$$f_x = f_5 \cdot 10^6 - 2,1 \cdot 10^9 + f_{эчи} \quad \text{для измерения по входу Б и}$$

$$f_x = N \cdot f_5 \cdot 10^6 + 100 \cdot 10^6 + f_{эчи} \quad \text{для измерения по входу В}$$

Здесь  $f_{изм}$  - частота перестраиваемого генератора 6, которая измеряется счетчиком. Номер гармоники определяют при последовательном измерении частоты на соседних гармониках или задают вручную.

### **8.3. Задание и указания к выполнению лабораторной работы**

В лабораторной установке используется частотомер Ч3-66 со сменным коаксиальным смесителем на входе В для диапазона 2-12,5 ГГц, генератор СВЧ (например, Г4-83), импульсный генератор и электронно-лучевой осциллограф.

#### *1. Подготовка установки к работе*

Установите в генераторе СВЧ режим непрерывной генерации (НГ), ослабление выходного аттенюатора 40-50 дБ, частота - в середине рабочего диапазона генератора.

Установите на частотомере ручки ВРЕМЯ ИНД. И «►» (усиление в тракте ПЧ) в крайнее левое положение. Подключите коаксиальным кабелем калибранный выход генератора ко входу смесителя входа В. Включите генератор и частотомер тумблерами СЕТЬ.

Через несколько секунд после включения частотомер автоматически переходит в режим самотестирования. Его завершение индицируется выводом на цифровой табло результата измерения опорной частоты 1 МГц. На индикаторе ТЕСТ загорается цифра 5, индикатор ПЧ должен мигать. Нажмите кнопку калибровки «▲». Прибор переходит в режим самоконтроля и на табло должно индицироваться значение частоты кварцевого генератора 5 МГц (5 000 000 Гц).

Лабораторная установка готова к измерению частоты.

#### *2. Измерение частоты НГ сигнала СВЧ*

Включите вход В соответствующей кнопкой. При этом включится подсветка кнопок В и НГ, загорится индикатор «≠». Табло должно погаснуть, а

индикатор ГАРМОНИКА - циклически высвечивать номер гармоники от 1 до 9. Поворачивайте ручку до тех пор, пока не зажжется индикатор и не погаснет индикатор « ≠ ». Это означает, что номер гармоники гетеродина 5 автоматически определен (он выводится на индикатор ГАРМОНИКА). На табло выводится результат измерения частоты входного сигнала. Если по каким-либо причинам автоматический поиск результатов не дает, можно использовать ручной ввод номера гармоники (кнопка ГАРМОНИКА и цифровые кнопки 1-9) , исходя из приблизительной оценки измеряемой частоты.

Произведите градуировку по частоте генератора СВЧ, взяв не менее 10 частотных точек по его шкале. В каждой точке проведите измерение выходной частоты (отметьте номер используемой гармоники). Рассчитайте абсолютную погрешность градуировки как разность измеренного значения и указателя шкалы. Результаты сведите в таблицу..

### *3. Измерение средней частоты сигнала генератора СВЧ.*

Установите выбранное значение частоты генератора в его рабочем диапазоне. Измерьте частоту по приведенной выше методике.

Включите режим усреднения частоты, для чего нажмите кнопку включения звуковой сигнализации , кнопку ТЕСТ и цифровую кнопку 8. Показания на табло должны зафиксироваться.

Нажмите кнопку 3, что соответствует вводу усреднения результата по выборке из  $2^3=8$  опытов. После этого должна зажечься цифра 8 на индикаторе ТЕСТ. Прибор переходит в режим усреднения. Каждое измерение частоты сопровождается кратковременным звуковым сигналом и миганием индикаторов, а после завершения серии опытов на табло появляется результат измерения – среднее за 8 опытов, сопровожданное продолжительным звуковым сигналом. Запишите 20 последовательных результатов измерения и усреднения по 8 опытам.

Проведите аналогичные измерения по выборке из 32 ( $2^5$ ) опытов. Для этого последовательно нажмите кнопки «▲», В, ТЕСТ, 8,5. Запишите 5 последовательно появляющихся результатов измерения.

Постройте графики временной нестабильности генератора СВЧ. Для этого учитите, что время одного опыта (единичное измерения частоты) прибора ЧЗ-66 составляет примерно 2 с для разрешающей способности 1 Гц ( 2 с при разрешении 1000 Гц).

Выключите режим усреднения нажатием кнопки «▲» и выключите звуковую индикацию.

#### *4. Измерение частоты заполнения импульсно-модулированного (ИМ) сигнала СВЧ*

Для получения радиоимпульсов используется генератора СВЧ в режиме внешней импульсной модуляции. Подайте на генератор модулирующий сигнал от генератора импульсов положительной полярности с амплитудой порядка 5-10 В. Длительность импульса 20 мкс, частота повторения порядка 10 кГц.

Оцените ожидаемый номер гармоники генератора 5, на котором будет производиться измерения несущей по результатам измерений частоты в предыдущем пункте работы. Установите номер гармоники вручную (кнопка ГАРМОНИКА и необходимая цифровая клавиша) и режим импульсных измерений (кнопка «▲» - ИМ). Установите ручку дискретной перестройки генератора 5 «▼» в крайнее левое положение, ручку ручной регулировки частоты генератора 6 «▼▼» в среднее положение, ручку усиления ПЧ «▶» – в крайнее правое положение.

Медленно вращайте ручку «▼» вправо до получения отклонения стрелочного прибора ИНД НАСТР не менее 10 мкА . Это соответствует попаданию промежуточной частоты второго преобразователя частоты в диапазон 20 – 40 МГц. Запишите результат измерения частоты  $f_1$ . Проверьте, является этот результат измерением по прямому каналу. Для этого перестраивая ге-

нератор 5 вручную вверх по частоте (вправо ручкой «▼»), получите результат измерения по зеркальному каналу, который должен быть на 330...370 МГц больше полученного значения  $f_1$ . Далее медленно поворачивайте ручку влево и добейтесь отклонения стрелки индикатора не менее 10 мкА. Запишите значение результат измерения по зеркальному каналу  $f_2$ . Рассчитайте разность частот  $f_2 - f_1$ . Если она находится в пределах 256...290 МГц, то  $f_1$  - частота прямого канала,  $f_2$  – зеркального. Тогда надо вернуть руку перестройки частоты в положение, при котором измеряется частота по прямому каналу. Если получить указанную разность частот не удается, то проведите повторный поиск частот  $f_2$  и  $f_1$ , разность которых будет находиться в указанных пределах.

Произведите точную настройку прибора. Нажмите кнопку - ИМ. Вращением ручек «▼» и «▼▼» добейтесь максимального отклонения стрелки ИНД НАСТР, которое должно быть не менее 10 мкА. Если индикатор зашкаливает, можно уменьшить усиление ПЧ ручкой «►». Подключите к частотометру (выход «N») электронно-лучевой осциллограф. Получите на нем изображение низкочастотного сигнала разностной частоты. Медленным вращением ручки «▼▼» получите изображение нулевых биений на экране осциллографа и (или) максимального отклонения стрелочного индикатора.

На табло индицируется значение частоты заполнения радиоимпульса. Если генератор имеет заметную нестабильность частоты, то нулевые биения могут пропасть в процессе измерения. В этом случае следует повторить подстройку генератора 6 ручкой «▼▼», а – при сильном уходе частоты – и генератора 5 ручкой «▼».

Проведите измерение частоты заполнения радиоимпульсов с длительностью 1, 20 , 50 мкс. Для каждой длительности установите три значения частот генератора в пределах его рабочего диапазона. Результаты запишите. Рассчитайте погрешность установки частоты.

## **Содержание отчета по лабораторной работе**

Отчет должен содержать структурную схему установки, таблицы данных и графики измеренных зависимостей.

### **Контрольные вопросы**

1. Укажите назначение автоматизированного частотомера ЧЗ-66. Для чего прибор имеет три входа?
2. Какие элементы входят в структурную схему частотомера? Для чего используются преобразователи частоты входов Б и В?
3. Как производится автоматическое определение номера гармоники гетеродина, на которой проводится измерение?
4. В каких случаях используют ручную установку номера гармоники?
5. В чем отличие работы прибора ЧЗ-66 по входам Б и В?
6. Опишите методику измерения частоты заполнения радиоимпульсов.
7. Для чего в приборе используется дополнительных перестраиваемый генератор 6?
8. Для чего в частотомере используют усреднение показаний?
9. Что такое прямой и зеркальный каналы измерения частоты? Как их различить?

## **9. ИЗМЕРЕНИЕ МОДУЛЯ И ФАЗЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАЧИ СВЧ УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ФК2-18**

В данной лабораторной работе студенты знакомятся с комбинированным измерителем параметров устройств СВЧ диапазона ФК2-18 и его использованием для измерения комплексных коэффициентов передачи. Изучается методика работы с прибором, его настройка и калибровка. В состав лабораторной установки входят также СВЧ генератор диапазона 8 -12 ГГц, коаксиально-волноводный переход и исследуемые волноводные устройства.

### **9.1.Краткое описание и основные технические данные измерителя разности фаз ФК2-18.**

Комбинированный измеритель разности фаз ФК2-18 является многофункциональным прибором для измерения модуля и фазы комплексных коэффициентов передачи СВЧ устройств на фиксированных частотах. При наличии внешнего генератора качающейся частоты (ГКЧ) и осциллографического индикатора прибор можно использовать для панорамного измерения АЧХ и ФЧХ СВЧ устройств в диапазоне частот.

Краткие технические данные прибора:

- диапазон рабочих частот – 0,11...12 ГГц;
- пределы измерения разности фаз  $0^\circ \dots \pm 180^\circ$  с разбивкой на поддиапазоны  $\pm 6^\circ, \pm 18^\circ, \pm 60^\circ, \pm 180^\circ$ ;
- пределы измерения модуля коэффициента передачи (ослабления) 0 – 60 дБ при мощности входного сигнала  $10^{-3} \dots 10^{-11}$  Вт;
- Основная погрешность измерения разности фаз не превышает  $\pm (1+0,036\phi_k+0,075A_x)$ , град, где  $\phi_k$  - конечное значение шкалы

установленного поддиапазона,  $A_x$  - ослабление исследуемого устройства.

- Основная погрешность измерения ослабления не более  $\pm(0,5+0,02A_k+0,03A_x)$ , дБ, где  $A_k$  - предел шкалы измерения ослабления,  $A_x$  - измеряемое значение ослабления.
- Предел качания частоты в panoramicном режиме (с внешним ГКЧ) не более 500 МГц при периоде качания не менее 0,08 с;
- Собственная неравномерность АЧХ и ФЧХ в полосе качания 500 МГц соответственно не более  $\pm 0,5$  дБ и  $\pm 2,5^\circ$  на частотах 0,11...4 ГГц,  $\pm 1$  дБ и  $+5^\circ$  на частотах 4...12,05 ГГц.

Измеритель разности фаз ФК2-18 представляет собой двухканальный супергетеродинный СВЧ приемник-преобразователь с измерительным блоком. Принцип работы прибора - перенос сигнала СВЧ на более низкие частоты и определение его параметров относительно низкочастотным измерительным блоком. Структурная схема СВЧ тракта прибора представлена на рис.9.1.

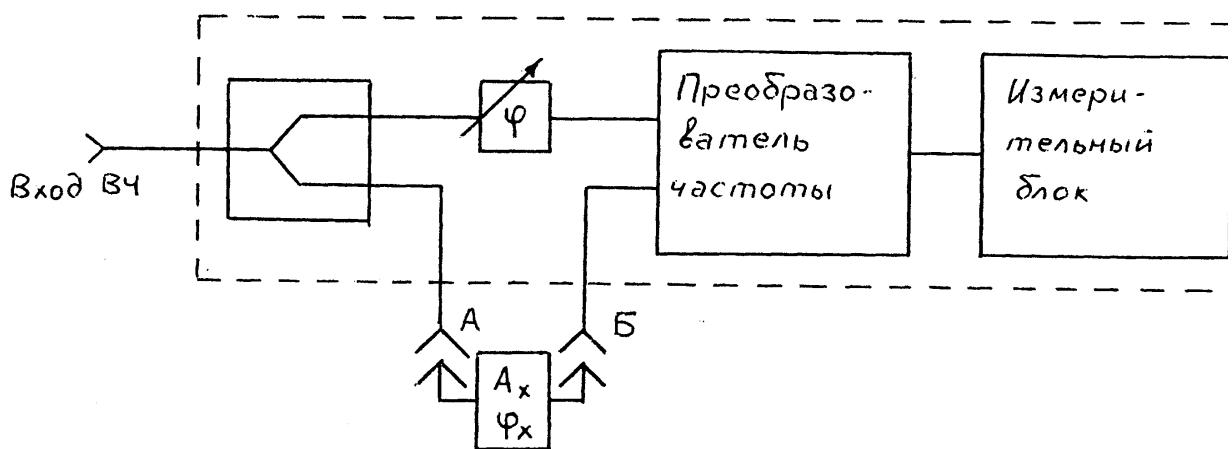


Рис. 9.64. Структурная схема измерителя разности фаз ФК2-18

Сигнал, подаваемый на вход ВЧ прибора от внешнего генератора, делится на два в полосковом делителе мощности. Один из сигналов является опорным, другой поступает в измерительный канал. В этот канал через разъемы, обозначенные, соответственно, А и Б, включают исследуемое устройство. Для калибровки прибора по фазе в опорном канале предусмотрен образцовый фазовращатель (ФВ), представляющий собой коаксиальную линию переменной длины (тромбонный ФВ). Градуировка фазовращателя выполнена в единицах длины L (см), что позволяет вычислить вносимый им фазовый сдвиг на любой частоте  $f$  (при длине волны  $\lambda = 3 \cdot 10^8 / f$ ):

$$\Delta\phi = kL = 360^\circ \cdot L \cdot f \cdot (3 \cdot 10^{-8}) = kL = 2\pi L/\lambda = 2\pi Lf \cdot (3 \cdot 10^{-8}).$$

Структурная схема преобразователя частоты представлена на рис. 9.2.

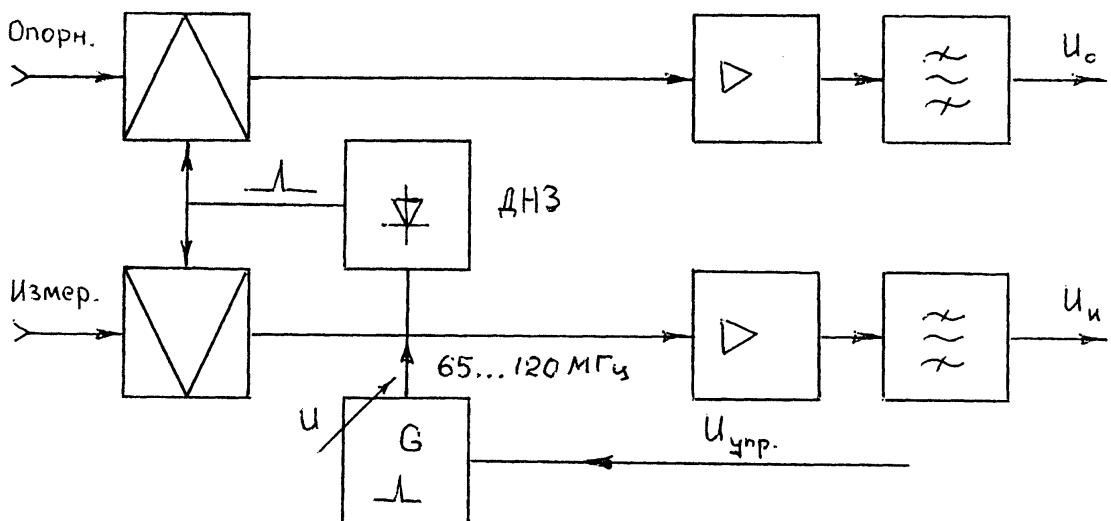


Рис. 9.65. Структурная схема преобразователя частоты

Опорный и измерительный сигналы подают на идентичные смесители стробоскопического типа. Стробоскопический смеситель представляет собой электронный быстродействующий ключ, управляемый коротким строб-импульсом. Импульс вырабатывают путем дифференцирования перепада напряжения с малой ( $< 0,1 \text{ нс}$ ) длительностью нарастания. Этот перепад фор-

мируют подачей управляющего импульса на СВЧ диод с накоплением заряда.

Генератор управляющих импульсов перестраивается напряжением по частоте  $f_r$  в пределах 65...120 МГц так, чтобы выполнялось условие:

$$f_{\text{вх}} - nf_r = f_{\text{пч1}} = 19,722 \text{ МГц}.$$

где  $n$  - номер одной из гармоник стробимпульса,  $f_{\text{пч1}}$  = промежуточная частота. Выходной сигнал со смесителя фильтруют, усиливают и подают на низкочастотный измерительный блок, структурная схема которого представлена на рис.9.3.

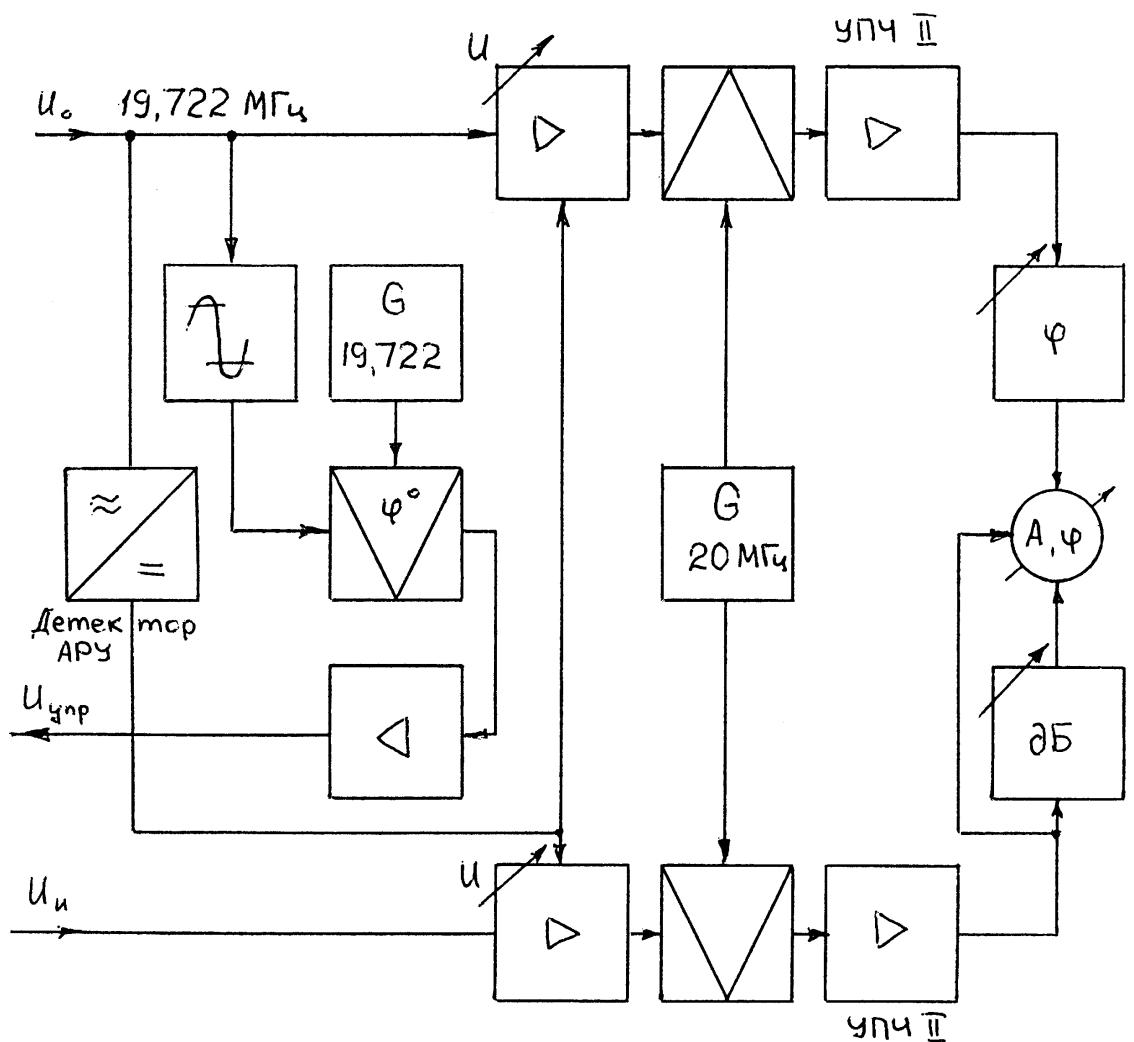


Рис. 9.66. Структурная схема НЧ измерительного блока

Опорный сигнал поступает на систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), управляющую частотой генератора стробимпульсов. Система ФАПЧ включает в себя ограничитель сигнала, опорный кварцевый генератор

частоты 19,722 МГц, фазовый детектор и усилитель постоянного тока (УПТ). Если уравнение (1) не выполняется ни для какого номера гармоники стробимпульса (отсутствует захват частоты генератора), то на вход управления генератора подается пилообразное напряжение, которое перестраивает генератор до вхождения системы ФАПЧ в синхронизм (режим поиска). В дальнейшем система ФАПЧ автоматически удерживает частоту генератора, сохраняя условие захвата частоты (1). Диапазон частот генератора переключают дискретно путем ступенчатого изменения крутизны пилообразного напряжения.

Сигналы опорного и измерительного каналов поступают на входы усилителей ПЧ1, охваченных цепью автоматической регулировки усиления (АРУ). Управляющий сигнал АРУ вырабатывается детектированием опорного сигнала, его величину можно контролировать по индикатору уровня опорного сигнала. Второе частотное преобразование опорного и измерительного сигналов осуществляют двумя смесителями, на которые подают сигнал фиксированного гетеродина 20 МГц. Вторая промежуточная частота  $f_{\text{ПЧ}2}$  равна 278 кГц. Преобразованный сигнал опорного канала поступает на плавный фазовращатель, позволяющий регулировать фазу в пределах  $\pm 40^\circ$  для установки нуля индикатора (калибровка по фазе). В измерительном канале сигнал разделяют на два. Один сигнал проходит через ступенчатый аттенюатор (дискрет 1 дБ, перестройка в пределах 0...60 дБ). Этот аттенюатор применяют в качестве образцового для измерения уровня сигнала методом замещения, что позволяет повысить точность. Второй сигнал подают на индикатор помимо аттенюатора и используют при измерении фазового сдвига.

Индикатор представляет собой комбинацию низкочастотного фазометра и амплитудного детектора (амплифазометр). Фазометр построен по принципу преобразования фазового сдвига во временной интервал; отсчет фазы ведут по стрелочному прибору. Амплитудный детектор преобразует сигнал измерительного канала в постоянное напряжение, поступающее на лога-

рифмический усилитель и стрелочный прибор. По прибору уровень сигнала отсчитывают в дБ.

В приборе предусмотрен вывод преобразованных аналоговых напряжений (с масштабом 10 мВ/град и 50 мВ/дБ) на внешние регистрирующие приборы, (цифровой вольтметр, самописец). При работе в режиме качания частоты (с внешним ГКЧ) эти напряжения, поданные на осциллографический индикатор, позволяют получить на экране кривые АЧХ и ФЧХ исследуемого устройства.

## **9.2. Задание и указания к выполнению лабораторной работы**

В установку входят измеритель разности фаз ФК2-18 и внешний СВЧ генератор с диапазоном частот, соответствующим рабочему диапазону волновода 23 x 10 мм (8 -12 ГГц). Удобно использовать блок ГКЧ54, входящий в панорамный измеритель КСВ Р2-61. При работе с другими типами генераторов необходимо контролировать уровень их выходной мощности, которая не должна превышать 5 мВт. В состав установки входит также исследуемые устройства - плавный волноводный фазовращатель и поглощающий переменный аттенюатор.

### *1. Подготовка установки к работе*

Для работы в режиме фиксированной частоты органы управления блока ГКЧ54 должны быть установлены в следующие положения: РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ – F0, на индикаторе частоты – F0F1. АМ - НГ, на блоке СВЧ ВНЕШН. – НГ. Генератор СВЧ должен быть соединен о разъемом ВЧ на задней панели прибора ФК2-18 через фиксированный аттенюатор 20 дБ, обеспечивающий необходимую развязку.

Включите прибор ФК2-18 и генератор СВЧ, дайте им прогреться в течение 15-20 мин. Переключатель ДИАПАЗОН ЧАСТОТ GHz установите в положение, соответствующее используемому диапазону частот. Ручкой F0F1 установите на генераторе рабочую частоту, на которой будут выполняться

измерения (по указанию преподавателя). Отрегулируйте уровень выходного сигнала так, чтобы индикатор ОПОРНЫЙ УРОВЕНЬ прибора ФК2-18 показывал бы ток в пределах 50...80 мА (этим обеспечивается оптимальный режим работы системы ФАПЧ). Установка.

Лабораторная установка готова к работе.

## *2. Калибровка прибора ФК2-18*

Задача калибровки - устранение систематической погрешности, связанной с наличием фазовых сдвигов в измерительном тракте и неодинаковыми коэффициентами передачи в опорном и измерительном каналах. Калибровку проводят на каждой рабочей частоте. Соедините разъемы А и Б отрезком жесткой коаксиальной линии с фиксированной длиной из комплекта прибора. Проведите калибровку уровня нулевого ослабления. Для этого установите следующее положение органов управления:

- Переключатели ОСЛАБЛЕНИЕ dB – 20 dB;
- Кнопочный переключатель «dB-ф» – в положение 30 dB;
- Переключатель ФАЗА φ - в положение 0.

Затем переключателем ОСЛАБЛЕНИЕ dB (единицы) и ручкой АМПЛИТУДА измерителя прибора ФК2-18 установите нулевое показание стрелочного индикатора. Повторите установку нуля на пределах 10 dB и 3 dB переключателя «dB-ф». Запишите калибровочное значение ослабления аттенюатора  $A_k$  (положение переключателя ОСЛАБЛЕНИЕ dB). Прибор откалиброван для измерения модуля коэффициента передачи (ослабления).

Проведите калибровку нулевого фазового сдвига. На переключателе «dB-ф» нажмите кнопку  $180^\circ$ . Ручками ДЛИНА ОПОРНОГО КАНАЛА (Cm) блока СВЧ и "ФАЗА" измерителя установите нулевое показание стрелочного индикатора. Повторите операцию и уточните калибровку на пределах 600, 180 и 60 переключателе «dB-ф». После этого прибор откалиброван для проведения фазовых измерений.

### *3. Измерение длины волны и частоты сигнала СВЧ*

Наличие плавного калиброванного фазовращателя - линии переменной длины с равномерной ФЧХ - позволяет измерить длину волны и расчетным путем - частоту входного сигнала.

Запишите показания шкалы фазовращателя **ДЛИНА ОПОРНОГО КАНАЛА (См)**, установленного при калибровке прибора по нулевому фазовому сдвигу. Затем на переключателе «дБ-ф» установите предел  $180^\circ$ . Вращая ручку **ДЛИНА ОПОРНОГО КАНАЛА** в одну сторону, контролируйте положение стрелки индикатора (она должна монотонно отклоняться в одну сторону до предела шкалы, затем скачком перейти к другому пределу и плавно перейти к нулевому показанию).

Последовательно переходя на более узкие пределы (до  $6^\circ$ ), установите точное положение фазовращателя, соответствующее нулевому фазовому сдвигу. Запишите второе показание **ДЛИНА ОПОРНОГО КАНАЛА (См)**. Разность зафиксированных показаний соответствует длине линии, обеспечивающей на рабочей частоте фазовый сдвиг  $360^\circ$ . Эта разность и есть длина волны  $\lambda$  входного колебания в свободном пространстве. Рассчитайте значение рабочей частоты  $f$  по формуле

$$f [\text{ГГц}] = 29,98 / \lambda [\text{см}].$$

Сравните полученный результат с установленным значением частоты на генераторе и рассчитайте погрешность установки.

### *4. Измерение модуля и фазы коэффициента передачи волноводного фазовращателя СВЧ.*

Измерьте модуль и фазу коэффициента передачи волноводного фазовращателя. Он представляет собой диэлектрическую пластину, положение которой относительно узкой стенки волновода плавно регулируется. Подключите фазовращатель через коаксиально - волноводные переходы к разъ-

емам А и Б измерителя ФК2 -18. Указатель шкалы поставьте в положение "0".

Проведите измерение начального фазового сдвига, вносимого фазовращателем. Для этого используйте минимальный диапазон измерения (предел – 6<sup>0</sup> установите переключателем «дБ-ф» ). Если стрелка индикатора не вышла за пределы шкалы, то искомый фазовый сдвиг  $\phi_x$  отсчитывается непосредственно по шкале ( $\phi_x = \phi_{шк}$ ). В противном случае поставьте тумблер индикатора "±" в положение, соответствующее направлению "зашкаливания" стрелочного прибора. Затем переключением встроенного фазовращателя «ФАЗА ф» добейтесь возвращения стрелки в пределы шкалы. Измеряемый фазовый сдвиг равен  $\phi_x = \phi_{шк} + \phi_{фв}$ , где  $\phi_{шк}$  - показания стрелочного индикатора (с учетом знака),  $\phi_{фв}$  - показание переключателя "ФАЗА Ф" с учетом знака тумблера "±". После измерения верните переключатель "ФАЗА Ф" в исходное (нулевое) положение. Проведите градуировку фазовращателя па рабочей частоте, повторяя описанные выше измерения фазы на отметках шкалы 10, 20, 30 ...200 делений. Результаты сведите в таблицу.

Измерьте начальные потери фазовращателя, для чего поставьте переключатель «дБ-ф» в положение 30 дБ и отсчитайте значение модуля коэффициента передачи (в дБ) по шкале прибора с учетом знака.

Повторите измерения на двух частотах в диапазоне 8 ... 12 ГГц.

##### *5. Измерение ослабления и вносимого фазового сдвига волноводного аттенюатора*

Подключите с помощью волноводно-коаксиальных переходов аттенюатор к разъемам А и Б прибора. Указатель шкалы аттенюатора установите па отметку "0". Измерьте модуль коэффициента передачи (ослабление) аттенюатора. Для этого установите минимальный предел измерения ослабления 3 дБ (переключатель «дБ-ф») и отсчитайте искомое значение непосредственно по шкале с учетом знака  $m A_x = A_{шк}$  (дБ). Если же прибор «зашкаливает», то

следует увеличивать затухание  $A_{OTC}$  аттенюатора «ОСЛАБЛЕНИЕ dB» блока СВЧ до тех пор, пока стрелка не установится в пределах шкалы.

В этом случае величина модуля коэффициента передачи  $A_x$  определяется выражением  $A_x = A_x - A_{OTC} + A_{ШК}$  (дБ), где  $A_x$  – калибровочное показание аттенюатора «ОСЛАБЛЕНИЕ dB», установленное при калибровке;  $A_{OTC}$  – показание аттенюатора «ОСЛАБЛЕНИЕ dB»;  $A_{ШК}$  – показание стрелочного индикатора (с учетом знака).

После измерения модуля коэффициента передачи установите на аттенюаторе «ОСЛАБЛЕНИЕ dB» величину калибровочного затухания  $A_k$ .

Измерьте фазовый сдвиг, вносимый аттенюатором. Для этого следует на переключателе «дБ-φ» установить шкалу 1800 и определить фазовый сдвиг непосредственно по шкале индикатора (с учетом знака).

Повторите измерения на двух частотах в диапазоне 8 … 12 ГГц. Результаты сведите в таблицу.

### **Содержание отчета по лабораторной работе**

Отчет должен содержать структурную схему установки, таблицы данных и графики измеренных зависимостей. По результатам измерений постройте семейство калибровочных графиков фазовращателя и аттенюатора для разных частот.

### **Контрольные вопросы**

1. Укажите назначение фазометра ФК2-18. Какие измерительные задачи можно решать с его помощью?
2. Для чего в состав фазометра включен плавный фазовращатель? Как с его помощью измеряют частоту входного сигнала?
3. Как производится калибровка фазометра по модулю и фазе коэффициента передачи?

4. Для чего в приборе используют стробоскопическое преобразование частоты? В чем преимущества такого способа по сравнению с традиционным?
  5. Какие методом производят измерение фазового сдвига после преобразования частоты на НЧ?
  6. В каких случаях используют метод замещения при измерении ослабления и фазового сдвига прибором ФК2-18?
  7. Чем отличается фазометр СВЧ от измерителя комплексных коэффициентов передачи СВЧ устройств?
  8. Чем определяется точность измерения фазового сдвига в приборе ФК2-18?
- Проведите анализ погрешности измерения.

## **Список литературы**

1. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ: Учеб. пособие для вузов.- М.: Радиотехника, 2008.-184с
2. Дворяшин Б.В. Метрология и радиоизмерения / Учеб. Пособие для студентов ВУЗов, -М: Издательский центр «Академия», 2005. - 304с
3. Метрология и радиоизмерения / Учебник для ВУЗов. /Под ред. В.И.Недедова, -М: Высшая школа, 2003.
4. Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электрорадиоизмерения. - М.: Высш. шк., 1986.
5. Измерения в электронике. Справочник /Под ред. В.А. Кузнецова. - М.: Энергоатомиздат, 1987.-512 с.
6. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине “Измерения на СВЧ”.А.А.Данилин, В.Н.Малышев, М.Л.Тылевич. -ЛЭТИ.-Л.:1990.- 28с.