

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

---

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

---

Д. М. ВОСКРЕСЕНСКИЙ    А. А. ДАНИЛИН    В. А. СОСНОВСКИЙ

## **ИЗМЕРЕНИЯ НА СВЧ**

Лабораторный практикум

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
2021

УДК 621.317(075)

ББК 3 842-5я7

В76

**Воскресенский Д. М., Данилин А. А., Сосновский В. А.**

В76 Измерения на СВЧ: лаб. практикум / под ред. А. А. Данилина. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. 112 с.

ISBN 978-5-7629-2899-1

Содержит описание лабораторных работ, входящих в программу дисциплины «Измерения на СВЧ», которая посвящена изучению принципов построения современных радиоизмерительных средств диапазона СВЧ, измерению характеристик и параметров микроволновых устройств. Лабораторные работы предназначены для получения студентами практических навыков проведения наиболее часто встречающихся видов измерений в технике СВЧ.

Предназначен для магистров, обучающихся по направлениям 11.04.01 «Радиотехника», 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и специалистов по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы». Может быть использован также для подготовки аспирантов по направлению 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи».

УДК 621.317(075)

ББК 3 842-5я7

Рецензенты: кафедра конструирования и технологий электронных и лазерных средств СПбГУАП; канд. тех. наук А. С. Подстригаев (НИЛ АО «НИИ “Вектор”»).

Утверждено

редакционно-издательским советом университета

в качестве учебного пособия

ISBN 978-5-7629-2899-1

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021

## Список сокращений и их англоязычные эквиваленты

- АМ – амплитудная модуляция (AM – Amplitude Modulation)
- АРМ – автоматическая регулировка мощности (APC – Automatic Power Control)
- АРУ – автоматическая регулировка усиления (AGC – Automatic Gain Control)
- АС – анализатор спектра
- АХ – амплитудная характеристика
- АЧХ – амплитудно-частотная характеристика (frequency response curve)
- ВАХ – вольт-амперная характеристика
- ВЧ – высокие частоты (RF – radio Frequencies)
- ВФ – видеофильтр
- ГВЗ – групповое время запаздывания
- ГКЧ – генератор качающейся частоты (sweep generator)
- ГУН – генератор, управляемый напряжением (VCO – Voltage-Controlled Oscillator)
- ДПКД – делитель частоты с переменным коэффициентом деления
- ДШ – диод Шотки
- ЖИГ – железо-иттриевый гранат (YIG – Yttrium Iron Garnet)
- ИС – интегральная схема
- КЗ – короткое замыкание (SC – short circuit)
- КСВ – коэффициент стоячей волны
- КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению (VSWR – Voltage Standing Wave Ratio)
- МПЛ – микрополосковая линия
- МШУ – малошумящий усилитель
- НО – направленный ответвитель (DC – Directional Coupler)
- НЧ – низкие частоты (LF – Low Frequencies)
- МОП – металл–оксид–полупроводник
- ОД – обращенный диод
- ПЗФ – полосно-заграждающий фильтр (BSF – Band Stop Filter)
- ППФ – полосно-пропускающий фильтр (BPF – Band Pass Filter)
- ПЦС – прямой цифровой синтез
- ПЧ – промежуточная частота (intermediate frequency)
- СД – синхронный детектор
- СВЧ – сверхвысокие частоты (MW – MicroWaves)

СН – согласованная нагрузка (matched load)  
СЦ – согласующая цепь  
ТКД – точечно-контактный диод  
УПТ – усилитель постоянного тока  
УПЧ – усилитель промежуточной частоты  
ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты (PLL – Phase-Locked Loop)  
ФВ – фазовращатель  
ФВЧ – фильтр высоких частот (HPF – High Pass Filter)  
ФНЧ – фильтр нижних частот (LPF – Low Pass Filter)  
ФЧХ – фазочастотная характеристика  
ХХ – холостой ход (ОС – Open Circuit)  
ЦАП – цифроаналоговый преобразователь (DAC – Digital to Analog Converter)  
ЧМ – частотная модуляция (FM – Frequency Modulation)  
ЭСЧ – электронно-счетный частотомер (frequency counter)

# 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ СВЧ

В лабораторной работе студенты знакомятся с фильтрами сверхвысоких частот (СВЧ) различного назначения, реализованными в микрополосковом варианте. Изучаются общие методы их проектирования и методы измерения параметров фильтров с помощью автоматизированного анализатора СВЧ-цепей Agilent E5062A.

## 1.1. Общие сведения о фильтрах СВЧ-диапазона

Фильтры СВЧ в радиотехнике применяются для частотной селекции сигналов. Особенностью фильтров СВЧ является их реализация в виде распределенных структур (отрезков линий передачи). Этим они отличаются от обычных электрических фильтров, в которых используются сосредоточенные  $LC$ -элементы. Основная характеристика фильтра СВЧ – это частотная зависимость вносимого *ослабления* (затухания)  $A[\text{дБ}] = L[\text{дБ}] = -20 \lg(|S_{21}|)$  в СВЧ-тракт. Область частот с малым ослаблением принято называть *полосой пропускания* (bandpass), область с большим ослаблением – *полосой заграждения* (bandstop). По взаимному расположению этих полос принято различать следующие типы фильтров (рис. 1.1):

- фильтры нижних частот (ФНЧ, Low Pass Filters – LPF);
- фильтры верхних частот (ФВЧ, High Pass Filters – HPF);
- полóсно-пропускающие фильтры (ППФ, Band Pass Filters – BPF);
- полóсно-заграждающие (режекторные) фильтры (ПЗФ, Band Stop Filters – BSF).

При проектировании фильтров обычно задают среднюю частоту и ширину *рабочей полосы частот* (BandWidth – BW) для определенного уровня потерь в полосе. Например, полоса пропускания для ППФ по умолчанию устанавливается на уровне 3 дБ (Passband – BW3dB), а полоса заграждения – по уровню 40 дБ (Stopband – BW40dB).

Важными параметрами реальных фильтров являются допустимое ослабление в полосе пропускания (Passband Insertion Loss) и требуемое ослабление в полосе заграждения (Stopband Insertion Loss), уровень неравномерности (пульсации) коэффициента передачи (ослабления) в полосе пропускания (Passband Ripple) и (или) в полосе заграждения (Stopband Ripple), коэффициенты стоячей волны по напряжению (КСВН, Voltage Standing Wave Ratio – VSWR) по входу и выходу фильтра в рабочем диапазоне частот.

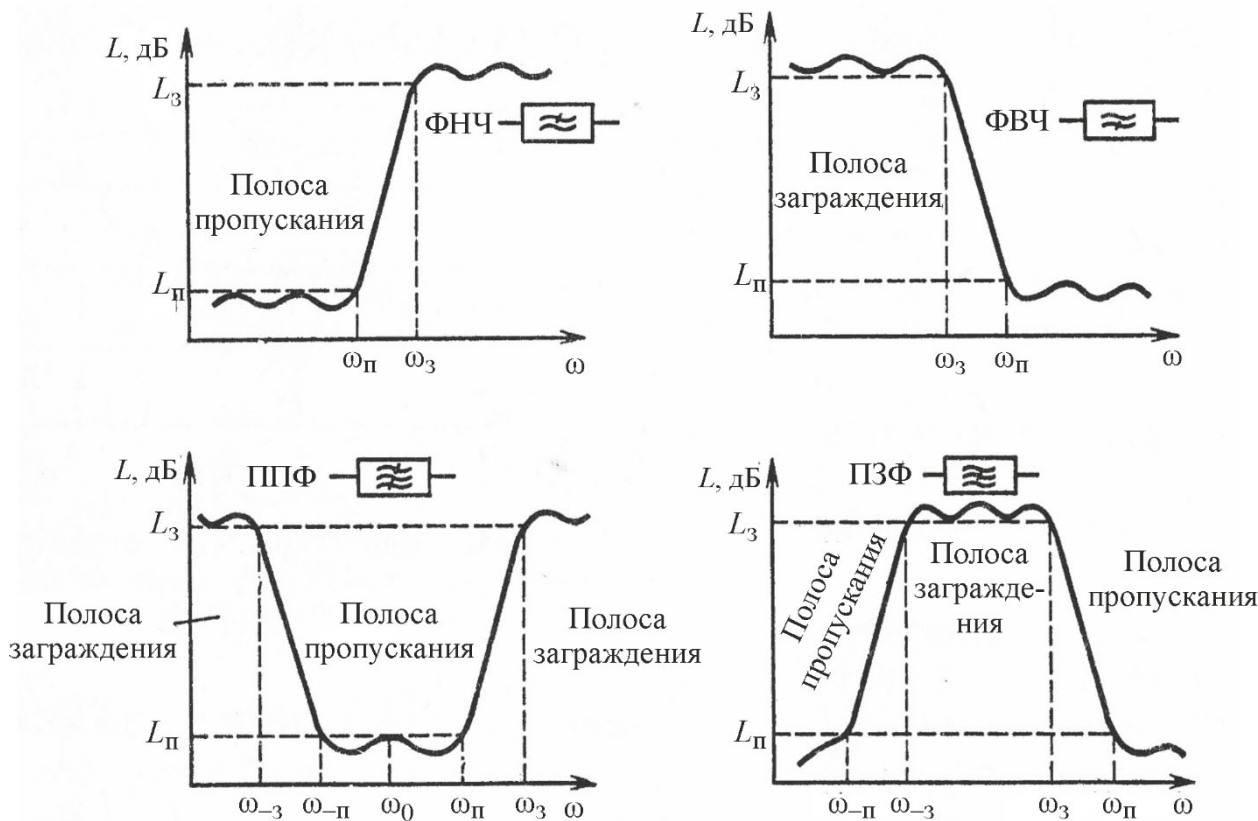


Рис. 1.1. Типы частотных характеристик ослабления фильтров СВЧ

В широкополосных системах передачи информации большое значение имеет вид фазочастотной характеристики фильтра (ФЧХ). Отклонение ее от линейной функции в полосе пропускания приводит к неравномерности ЧХ группового времени запаздывания (ГВЗ). Это может вызвать искажение формы сигналов, проходящих через фильтр.

Фильтры СВЧ часто строят как соединение простых элементов – резонаторов, шлейфов, отрезков линий передачи и пр. Частотные характеристики этих узлов на СВЧ достаточно сложны, что затрудняет синтез фильтра по заданным параметрам. Поэтому проектирование фильтров СВЧ в большинстве случаев осуществляют *методом низкочастотных (НЧ) прототипов*. Он основан на представлении схемы замещения реального фильтра в виде нормированной лестничной LC-схемы ФНЧ, для которого задана аппроксимация амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в виде физически реализуемой функции передачи. Эту функцию описывают полиномами разного вида. Степень полинома соответствует числу элементов прототипа. Чем выше степень полинома, тем больше приближение АЧХ фильтра к идеальной (прямоугольной) форме.

В СВЧ-технике применяют несколько видов частотных характеристик фильтров (рис. 1.2).

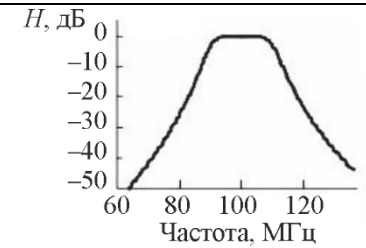
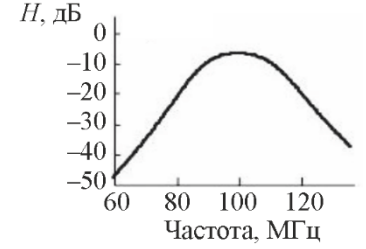
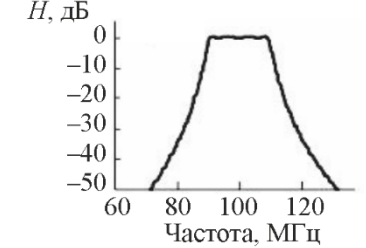
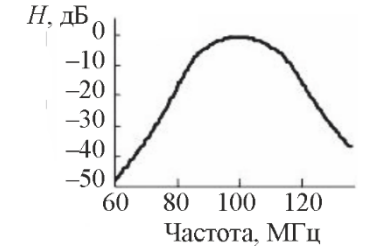
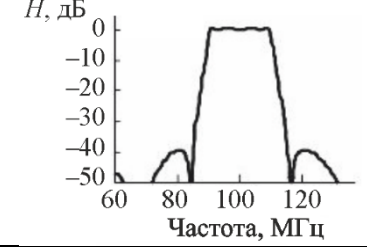
Тип фильтра	Особенности	Вид АЧХ
Баттерворта	Монотонная и наиболее плоская АЧХ; монотонная ФЧХ по всей полосе частот при высокой избирательности; большая неравномерность ГВЗ	
Бесселя	Монотонная АЧХ при низкой избирательности; гладкая ФЧХ; наименьшее изменение ГВЗ в полосе пропускания	
Чебышева-1	Равноволновые пульсации АЧХ в полосе пропускания, монотонное изменение АЧХ в полосе заграждения; гладкая ФЧХ; значительная неравномерность ГВЗ	
Линейная ФЧХ	Гладкая АЧХ при невысокой избирательности; высокая линейность ФЧХ в полосе пропускания; небольшие пульсации ГВЗ	
Эллиптический (фильтр Кауэра, SELF)	Задаваемые уровни равноволновых пульсаций АЧХ в полосах пропускания и заграждения; значительные нелинейность ФЧХ и неравномерность ГВЗ	

Рис. 1.2. Виды аппроксимации АЧХ фильтров

Наиболее распространенные виды характеристик – это максимально плоская АЧХ (Баттерворта) и равномерно-колебательная АЧХ (Чебышева) (рис. 1.3). В ряде случаев используют эллиптическую характеристику фильтра Кауэра, которая отличается повышенным ослаблением на отдельных частотах в полосе заграждения (нулях коэффициента передачи).

Характеристика вносимого затухания для фильтра Баттерворта задается полиномом  $L(\Omega) = 10 \lg (1 + \gamma^2 \Omega^{2n})$ , где  $\Omega = \omega / \omega_c$  – частота, нормированная к заданной границе полосы пропускания ( $\omega_c$  – частота среза фильтра). Величина

ослабления на частоте среза  $L_c$  определяется коэффициентом  $\gamma$  полинома  $L_c = 10 \lg(1 + \gamma^2)$ . Фильтры с максимально плоской характеристикой используют в случае, когда требования к ослаблению в полосе записания не слишком велики, а к свойствам фильтра в полосе пропускания (малые потери, равномерность АЧХ и ФЧХ) достаточно жесткие.

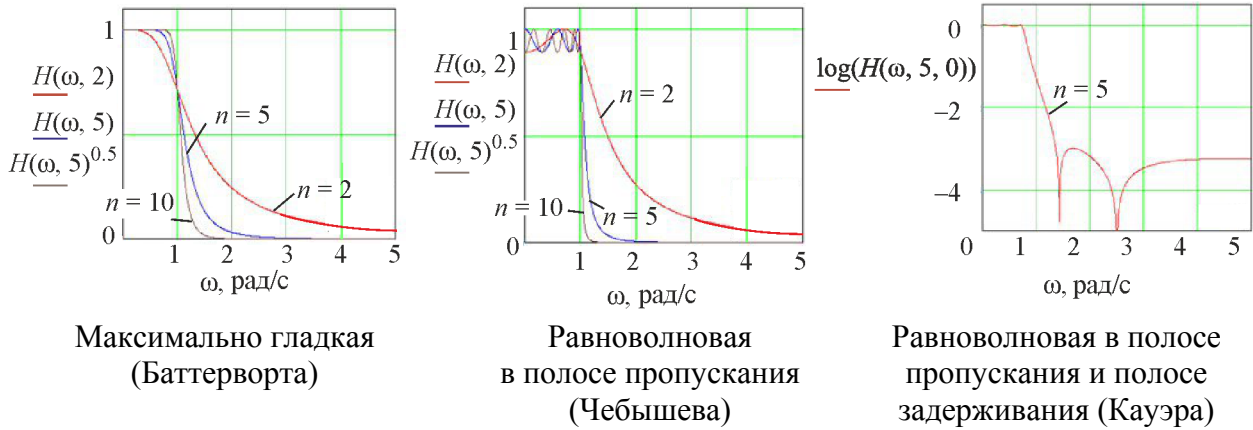


Рис. 1.3. Основные типы частотных характеристик прототипов СВЧ-фильтров

Равноволновая характеристика Чебышева позволяет получить лучшее ослабление в полосе записания и более крутой наклон АЧХ. Она описывается выражением  $L(\Omega) = 10 \lg(1 + \gamma^2 T_n^2(\Omega))$ , где

$$T_n(\Omega) = \begin{cases} \cos(n \cdot \arccos \Omega), & 0 \leq \Omega \leq 1; \\ \text{ch}(n \cdot \text{arch } \Omega), & \Omega > 1 \end{cases}$$

– полином Чебышева  $n$ -й степени:

Степень полинома, а следовательно, и число звеньев прототипа  $n$  выбирают, исходя из требований к крутизне

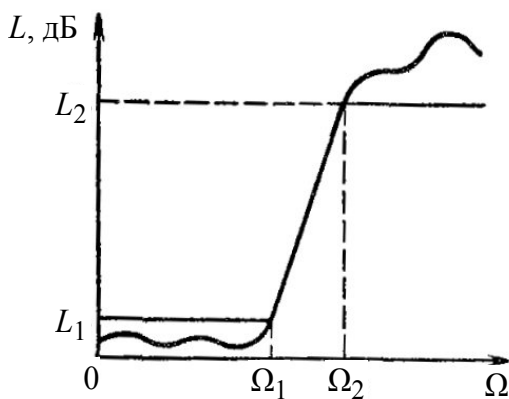


Рис. 1.4. Нормированная АЧХ прототипа фильтра Чебышева

склона АЧХ фильтра (рис. 1.4).

Если задать два уровня ослабления  $L_1$  и  $L_2$  на частотах  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ , то для характеристики Баттерворта количество звеньев определится по формуле

$$n \geq \frac{\lg \sqrt{(L_2 - 1) / (L_1 - 1)}}{\lg(\Omega_2 / \Omega_1)}, \quad L_{1,2} = 10^{(L_{1,2}, \text{ дБ}/10)}$$

Аналогичное соотношение для фильтра Чебышева имеет вид

$$n \geq \frac{\text{arch} \sqrt{(L_2 - 1) / (L_1 - 1)}}{\text{arch}(\Omega_2 / \Omega_1)}, \quad L_{1,2} = 10^{(L_{1,2}, \text{ дБ}/10)}$$



Реализация как максимально-плоской, так и чебышевской характеристик приводит к лестничной схеме прототипа (рис. 1.5).

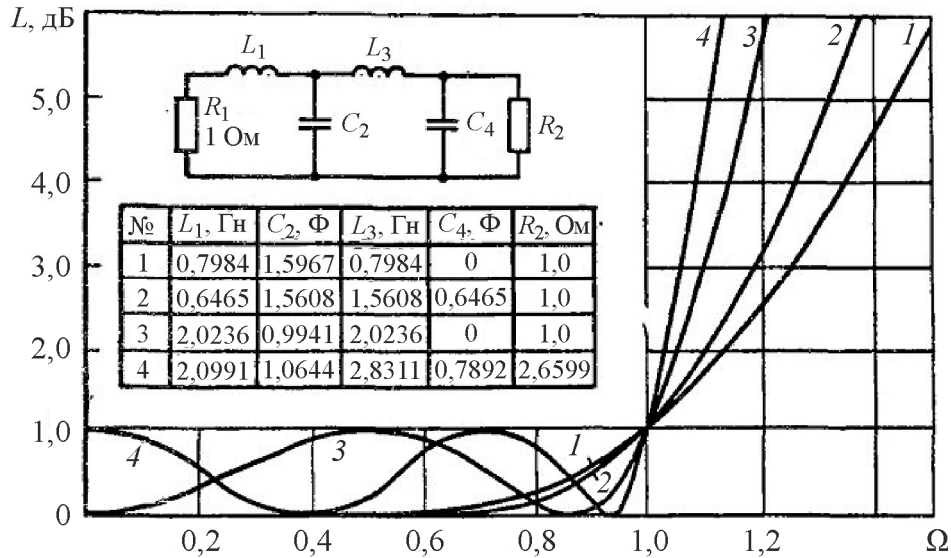


Рис. 1.5. Вид лестничного прототипа фильтра СВЧ:  
1, 2 – Баттерворта 3-го и 4-го порядка; 3, 4 – Чебышева 3-го и 4-го порядка

Параметры прототипа задают в формате справочных таблиц для нормированной частоты и единичных сопротивлений генератора  $R_1$  и нагрузки  $R_2$ . Отметим особенность чебышевского прототипа четной степени, большей 2: для него на нулевой частоте необходимо обеспечить ненулевое ослабление  $L_1$  (рис. 1.5). Для этого сопротивление нагрузки  $R_2$  прототипа должно быть от- лично от единицы.

Схему прототипа реального фильтра получают заменой частотной пере-менной. Для ФНЧ заменяют нормированную частоту на действительную ча-стоту  $\Omega = \frac{\omega}{\omega_c}$  через реальную частоту среза  $\omega_c$ . При этом все реактивные эле-менты  $L$  и  $C$  должны быть денормированы:

$$L' = \frac{Z_0 \Omega_1}{R_1 \omega_c} L = \frac{Z_0}{\omega_c} L; \quad C' = \frac{R_1 \Omega_1}{Z_0 \omega_c} C = \frac{1}{Z_0 \omega_c} C;$$

$$R_2' = \frac{Z_0}{R_1} R_2 = Z_0 R_2.$$

Здесь  $Z_0$  – волновое сопротивление источника;  $\Omega_1 = 1$  рад – нормированная частота среза;  $R_1 = 1$  Ом – нормированное сопротивление источника;  $\omega_c$  – ис-тинная частота среза ФНЧ;  $R_2$  – нормированное сопротивление нагрузки.

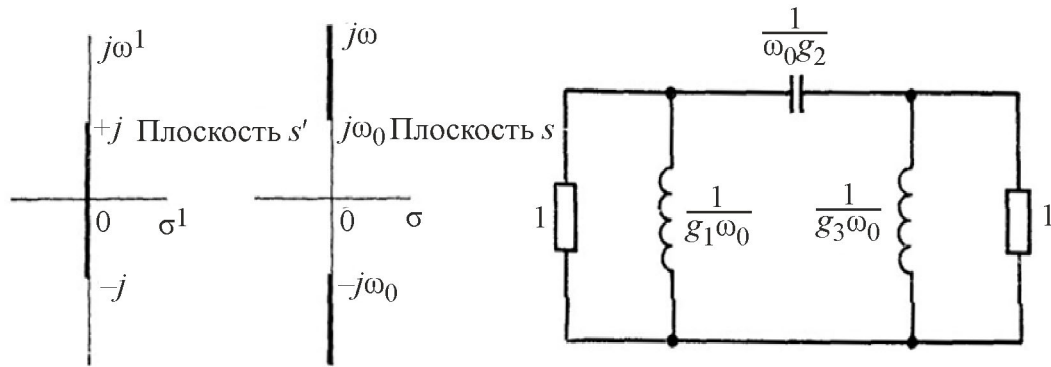


Рис. 1.6. Частотное преобразование ФНЧ => ФВЧ

Для ФВЧ замена частотной переменной  $\Omega = -\frac{\omega_c}{\omega}$  эквивалентна замене местами начала координат и бесконечно удаленной точки на частотной оси. Частотная характеристика прототипа преобразуется в АЧХ ФВЧ с той же частотой среза, реактивные элементы в прототипе заменяются на дуальные (рис. 1.6):

$$L' = \frac{1}{\omega_c C}; \quad C' = \frac{1}{\omega_c L}.$$

Если границы полосы пропускания ППФ обозначить  $\omega_1$  и  $\omega_2$  и  $\omega_2 - \omega_1 = 2\Delta\omega$ ;  $\omega_2\omega_1 = \omega_0^2$ , то замена частотной переменной

$$\Omega = \frac{1}{2\Delta\omega} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$$

преобразует частотную характеристику ФНЧ-прототипа в АЧХ полосно-пропускающего фильтра, симметричную относительно центральной частоты  $\omega_0$  (рис. 1.7). Индуктивность в ФНЧ-прототипе после замены превращается в последовательный колебательный контур с элементами

$$L' = \frac{L}{2\Delta\omega}; \quad C' = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0^2 L}.$$

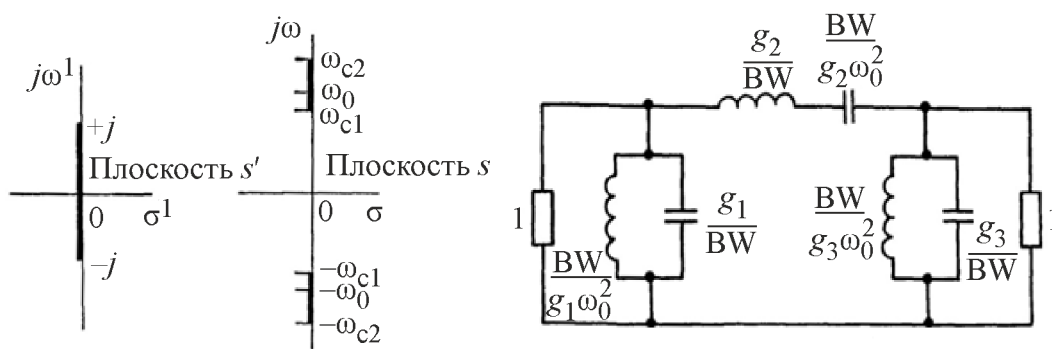


Рис. 1.7. Частотное преобразование ФНЧ => ППФ

Емкость прототипа превращается в параллельный колебательный контур с элементами

$$C' = \frac{C}{2\Delta\omega}; \quad L' = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0^2 C}$$

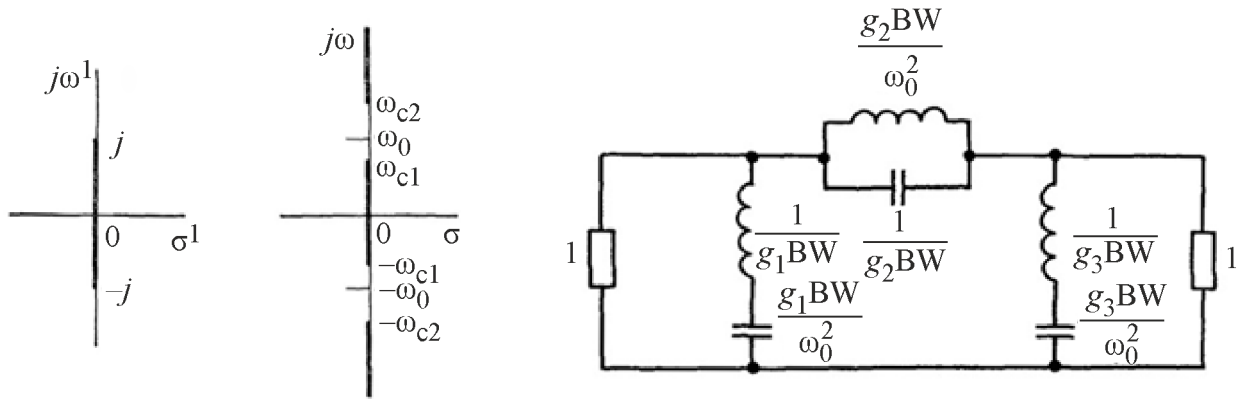


Рис. 1.8. Частотное преобразование ФНЧ => ПЗФ

Для ПЗФ осуществляется аналогичное преобразование, но в качестве прототипа используется фильтр высокой частоты (т. е. частотное преобразование осуществляют 2 раза: ФНЧ => ФВЧ => ПЗФ). При этом параллельные индуктивности исходного ФНЧ-прототипа преобразуются в последовательные контуры, последовательные емкости – в параллельные резонансные контуры (рис. 1.8).

## 1.2. Реализация микрополосковых фильтров СВЧ

При конструировании фильтра требуется заменить индуктивности и емкости схемы его прототипа реальными элементами. На относительно низких частотах удается это сделать, используя квазисосредоточенные микрополосковые индуктивности и конденсаторы. На более высоких частотах используют замену реактивных элементов схемы фильтра отрезками линий передачи. Их длины и волновые сопротивления подбирают так, чтобы в пределах полосы пропускания фильтра входной импеданс отрезка линии приближенно соответствовал бы требуемому значению реактивности.

Рассмотрим реализацию ФНЧ, используемого в лабораторной работе. Он строится на основе чебышевского прототипа 7-го порядка (рис. 1.9, а).

Последовательные индуктивности в реальной конструкции фильтра реализованы отрезками линий длиной  $l$  с большим волновым сопротивлением  $Z_1 \gg Z_0$  (рис. 1.10).

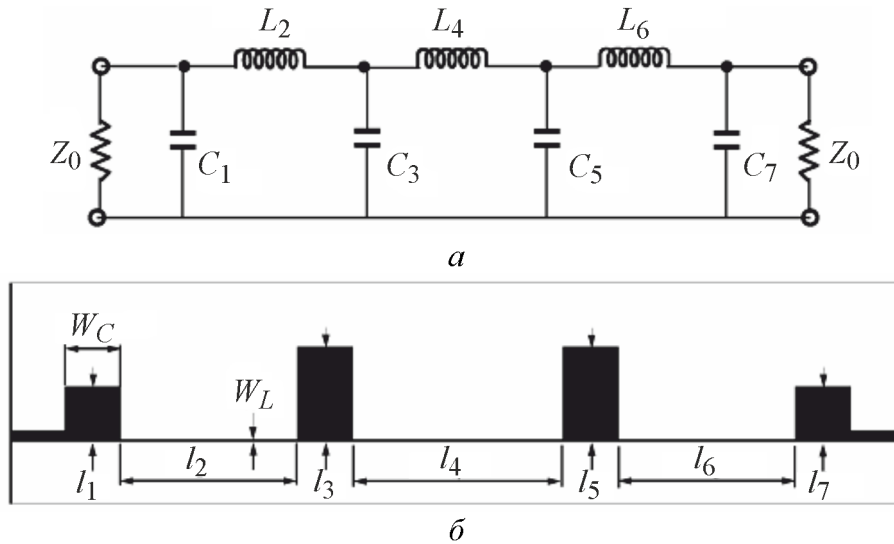


Рис. 1.9. Реализация ФНЧ с разомкнутыми шлейфами (open-ended stubs filter)

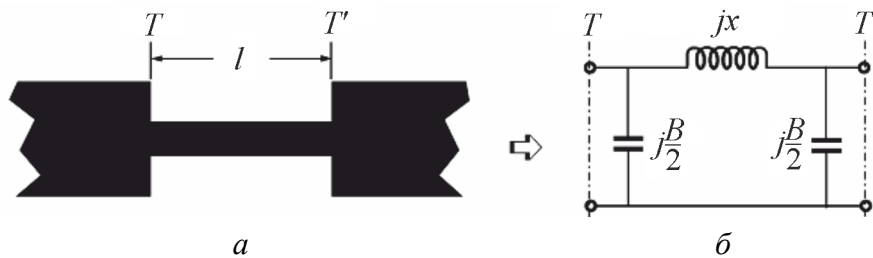


Рис. 1.10. Реализация последовательных индуктивностей в ФНЧ

Приближенно при  $l \leq \frac{\Lambda}{8}$  индуктивность можно представить в виде  $L = \frac{2\pi Z_1 l}{\omega \Lambda}$ , где  $\Lambda$  – длина волны в линии.

Параллельные емкости схемы реализованы в виде разомкнутых шлейфов с волновым сопротивлением  $Z_1 \ll Z_0$ . При длине шлейфа  $l \leq \frac{\Lambda}{8}$  входную емкость разомкнутого шлейфа можно записать в виде  $C = \frac{2\pi l}{\omega \Lambda Z_1}$ . Отметим, что

при малой длине шлейфов такой элемент проще реализовать скачком волнового сопротивления основной микрополосковой линии (МПЛ) (рис. 1.11).

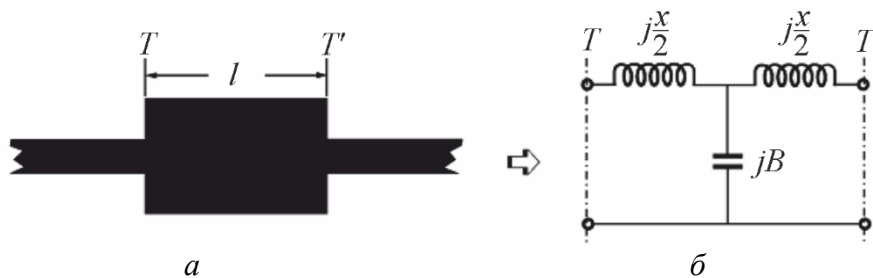


Рис. 1.11. Реализация параллельных емкостей в схеме ФНЧ

Он эквивалентен параллельной емкости, рассчитываемой по приближенной формуле  $C = \frac{\Delta l}{2\pi Z_1}$ , где  $Z_1$  – волновое сопротивление отрезка линии  $\langle T - T' \rangle$  длиной  $l$ . ФНЧ с такой реализацией схемы прототипа представляет собой набор отрезков линий передачи с разным волновым сопротивлением.

Используемая в лабораторной работе реализация ФВЧ представляет собой 6 короткозамкнутых шлейфов, включенных в МПЛ с волновым сопротивлением 50 Ом (рис. 1.12).

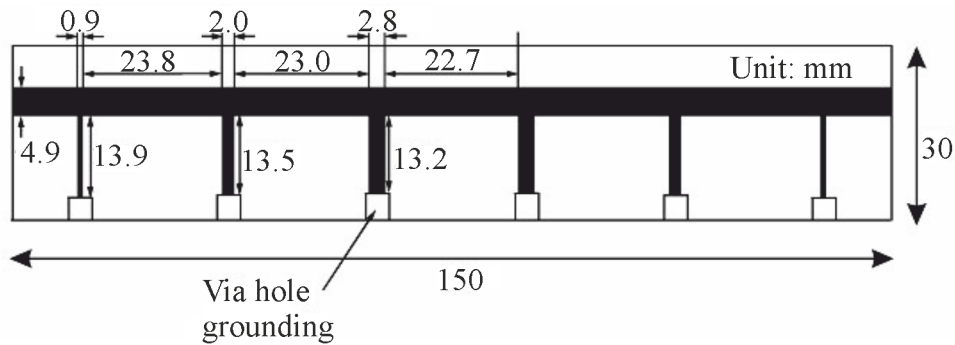


Рис. 1.12. ФВЧ на короткозамкнутых шлейфах (short-circuit stubs filter)

Расстояния между шлейфами выбраны практически одинаковыми, длины шлейфов примерно в 2 раза меньше. Реализация элементов схемы прототипа фильтра осуществляется подбором волновых сопротивлений шлейфов. Структура фильтра имеет периодический характер, поэтому АЧХ фильтра имеет повторяющиеся полосы заграждения в области высоких частот.

Для полосковых ППФ и ПЗФ часто используют четверть- и полуволновые резонаторы на отрезках МПЛ. Резонаторы соединяют либо непосредственно (например, через торцовые емкости), либо через отрезки связанных полосковых линий. В лабораторной работе исследуется ППФ Чебышева 5-го порядка, включающий набор полуволновых резонаторов, свернутых в виде буквы «U» так, что они похожи на «шпильки для волос» (Hairpin). Подобные «шпилечные» конструкции обладают малыми габаритами как в длину, так и в ширину (рис. 1.13).

Резонаторы фильтра взаимодействуют между собой через отрезки связанных МПЛ. Подводящая линия подключается к крайним резонаторам на расстоянии от края так, чтобы обеспечить входное сопротивление фильтра 50 Ом. Типичная АЧХ такого фильтра представлена на рис. 1.14.

Для полосно-заграждающего фильтра удобно использовать конструкцию с разомкнутыми четвертьволновыми шлейфами (рис. 1.15).

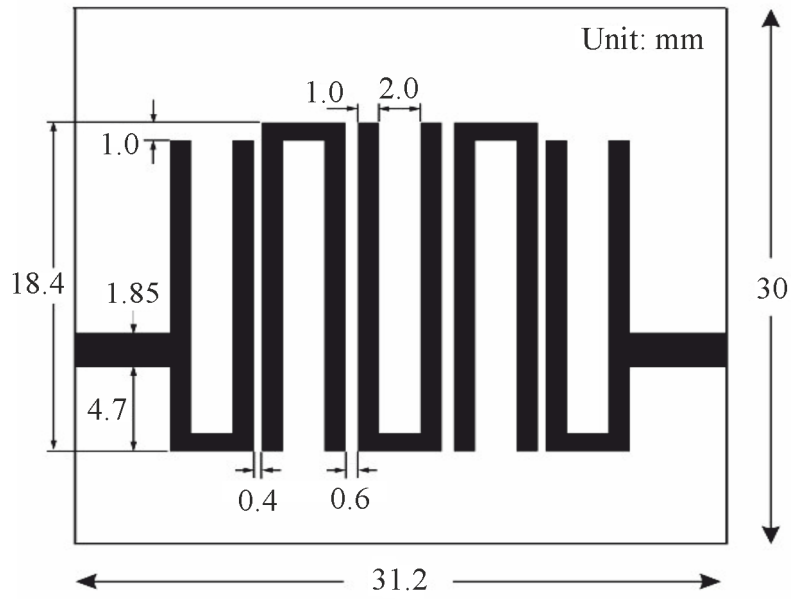


Рис. 1.13. ППФ шпилечного типа (Hairpin-line filter)

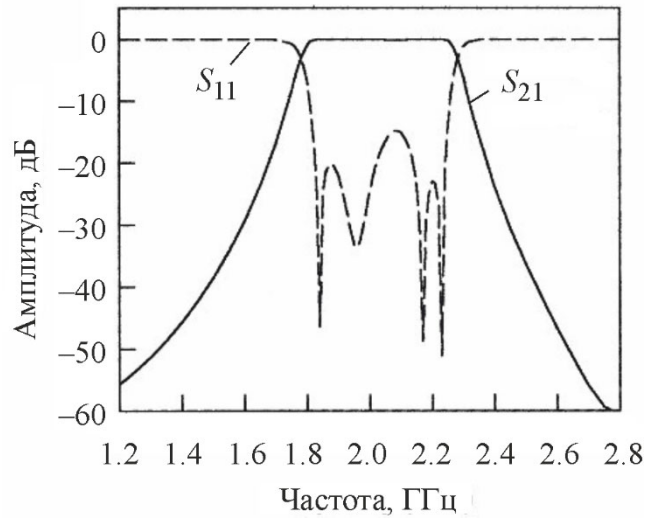


Рис. 1.14. АЧХ ППФ шпилечного типа

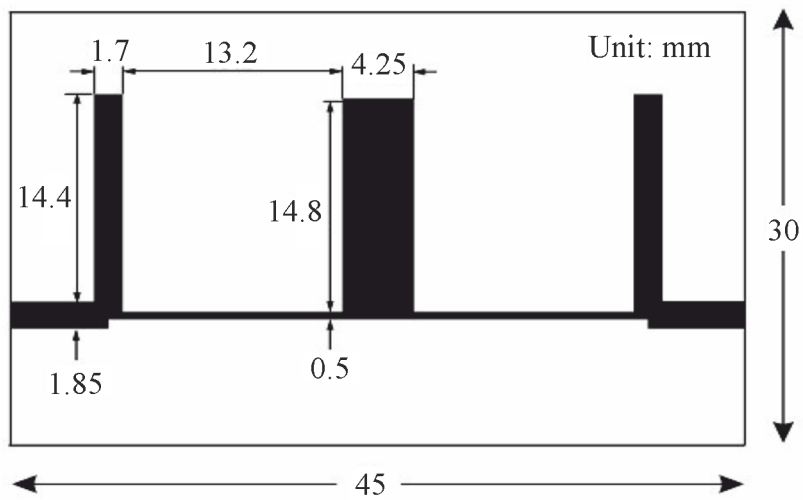


Рис. 1.15. ПЗФ с четвертьволновыми шлейфами

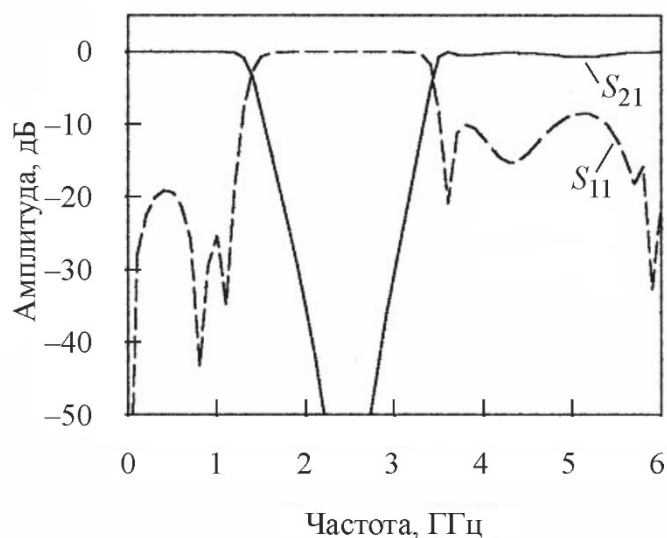


Рис. 1.16. АЧХ ПЗФ с четвертьволновыми шлейфами

Шлейфы соединены между собой четвертьволновыми отрезками линии большего волнового сопротивления, чем у шлейфов. Примерная частотная характеристика такого фильтра приведена на рис. 1.16.

### 1.3. Описание лабораторной установки

В лабораторной работе используется векторный анализатор цепей Agilent E5062A, позволяющий одновременно получить частотные зависимости модулей и аргументов коэффициентов  $S_{11}$  и  $S_{21}$  исследуемого фильтра. При измерении параметров фильтров используют следующие режимы работы прибора:

1. Калибровка прибора в полном частотном диапазоне.
2. Определение частотного диапазона измерения параметров конкретного фильтра и установка удобного масштаба по оси частот и уровню АЧХ.
3. Измерение АЧХ коэффициентов  $S_{11}$  и  $S_{21}$  в полном масштабе по уровню.
4. Использование режима электронных меток для определения параметров фильтра.
5. Измерение АЧХ в полосе пропускания (или заграждения) в крупном масштабе.
6. Сохранение полученных результатов в текстовом файле для дальнейшего использования в среде Microwave Office.

В лабораторной работе исследуются микрополосковые фильтры СВЧ четырех типов: ФНЧ – фильтр с разомкнутыми шлейфами; ФВЧ – фильтр с короткозамкнутыми (КЗ) шлейфами; ППФ – фильтр со связанными полуволновыми резонаторами типа Hairpin; ПЗФ – фильтр с полуволновыми шлейфами (рис. 1.17).

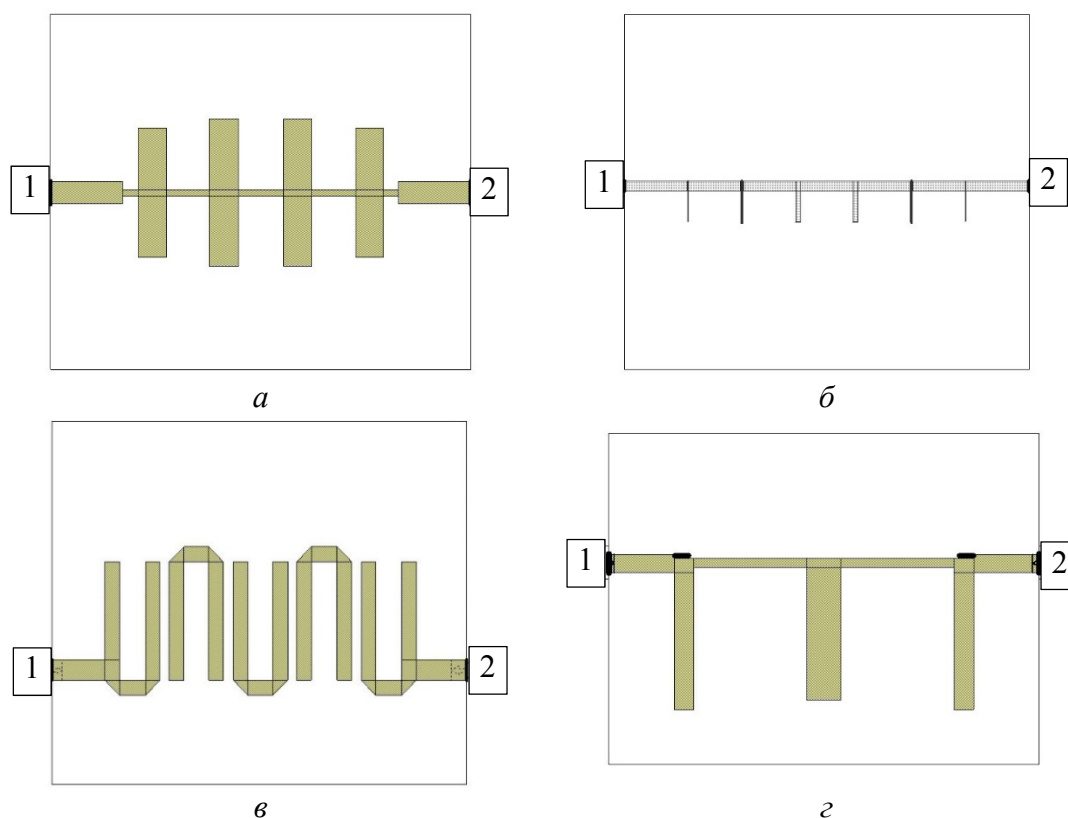


Рис. 1.17. Топология фильтров, исследуемых в лабораторной работе:  
*а* – ФНЧ (LPF); *б* – ФВЧ (HPF); *в* – ППФ (BPF); *г* – ПЗФ (BSF)

Фильтры выполнены на подложке ПТФЕ (политетрафторэтилен) и смонтированы в металлических корпусах с прозрачной крышкой. Входы фильтров снабжены переходами с МПЛ на разъем типа SMA-F. Анализатор цепей СВЧ Agilent E5062A соединен с фильтром короткими отрезками коаксиального кабеля.

В процессе работы исследуются два из четырех фильтров (по указанию преподавателя). Электромагнитное и схемотехническое моделирование и расчет характеристик фильтров осуществляются в среде компьютерного проектирования Microwave Office (MWO 10). Используются две модели фильтров: схемотехническая и электромагнитная. Для сравнения с экспериментальными результатами в среду MWO вводятся данные частотной характеристики, сохраненные в текстовом виде и вручную преобразованные в стандартный формат результатов измерения Touchstone.

## 1.4. Задание и указания к выполнению работы

### 1.4.1. Калибровка и подготовка прибора к работе

Для выполнения задания потребуются **USB-накопитель, отформатированный в формате FAT, FAT32 или NTFS. Накопитель с файловой системой ExFAT не поддерживается прибором.**



*Подготовка прибора к работе:*

1. Включите анализатор цепей E5062 и дождитесь загрузки программного обеспечения.

2. Установите полный рабочий диапазон 300 кГц ... 3ГГц. Это можно сделать, например, указав вручную начальную и конечную частоту работы прибора (раздел приборной панели **Stimulus** / кнопки **Start, Stop**).

*Однопортовая калибровка прибора* выполняется вместе с соединительными кабелями с помощью четырех образцовых элементов: меры XX (или открытого конца коаксиальной линии), короткозамыкателя (КЗ), согласованной нагрузки (СН) 50 Ом и соединителя – отрезка линии (используется переход F-F – Female-Female).

Для исследования АЧХ фильтров достаточно провести 1-портовую калибровку и калибровку Thru – «на проход» следующим образом:

1. Выберите тип калибровки **Calibration** => **Calibrate** => **1-Port Cal**. В меню **Calibration** можно также попасть нажатием кнопки **CAL** на передней панели прибора. Подключите через кабель и соединитель F-F нагрузку XX к измерительному порту 1 (можно использовать открытый конец коаксиального разъема вместо нагрузки XX). Нажмите **Open**.

2. Подключите нагрузку КЗ и нажмите **Short**. Отключите нагрузку КЗ.

3. Подключите согласованную нагрузку к порту и нажмите **Load**. Сохраните данные нажатием кнопки **Done**. Отключите нагрузку.

*Калибровка «на проход»* ведется по параметру  $S_{21}$ :

4. В подменю **Calibrate** выберите пункт **Response (THRU)**.

5. Соедините кабели портов 1 и 2 с помощью перемычки типа F-F.

6. Нажмите **Thru** для начала калибровки.

7. Нажмите **Done** для завершения калибровки.

8. Вернитесь в главное меню нажатием кнопки **Return**. Отключите соединитель F-F и положите все элементы калибровочного набора в коробку.

В заключение проверьте, включена ли калибровка (подменю **Calibrate/Correction** => **ON**) для всех каналов, если используется несколько каналов измерения. Для переключения каналов используйте кнопку **Channel Next**. Прибор готов для измерений в полном частотном диапазоне.

#### ***1.4.2. Установка оптимального частотного диапазона для исследования фильтров и измерение их АЧХ***

1. Подключите исследуемый фильтр к портам прибора.

2. Установите число отображаемых графиков (**Display** => **Number of Traces**) равным 3, формат вывода графиков на экран дисплея – один над другим (**Display** => **Allocate Traces** => выбрать из списка необходимый способ отображения – один над другим) (рис. 1.18).



Рис. 1.18. Варианты расположения графиков

( $S_{11}$  или  $S_{21}$ ).

Для выбора формата отображения необходимо:

- указать активный график (кнопками или мышью);
- нажать **Format** и с помощью программируемой клавиши выбрать требуемый формат вывода данных **Log Mag** (прямоугольная система координат, логарифмическая шкала) или **SWR** (прямоугольная система координат, КСВН).

4. Установите удобный масштаб по вертикали в режиме автоподстройки, для чего необходимо:

- выбрать требуемый график;
- нажать **Scale** => **Auto Scale**.

Если необходимо провести автоподстройку для всех графиков в канале, то надо выбрать требуемый канал и нажать **Scale** => **Auto Scale All**.

Для улучшения вида графиков после автоподстройки используйте ручной режим масштабирования графиков, подбирая:

- число делений по оси  $Y$  (**Divisions**), удобно использовать 10 делений;

Для переключения между параметрами можно пользоваться клавишами на лицевой панели прибора **Trace Next** (следующий график), **Trace Prev** (предыдущий график), кнопками экранного меню или щелчком мыши на окне требуемого графика.

3. Выведите в первом окне две АЧХ (модули  $S_{21}$  и  $S_{11}$ ) в логарифмическом масштабе, во втором – зависимость КСВН (VSWR) от частоты. В первом окне количество графиков (traces) – 2, измеряемые параметры –  $S_{21}$  и  $S_{11}$ , формат отображения – логарифмический [дБ], во втором канале количество графиков будет 1, режим измерения –  $S_{11}$ , формат – коэффициент стоячей волны (VSWR).

Для выбора измеряемого параметра необходимо:

- выбрать активный график (клавишами или мышью);
- нажать **Measurement**;
- выбрать требуемый параметр матрицы рассеяния

- цену деления (**Scale/Div**) масштабной сетки по оси  $Y$  активного графика;
- положение опорного уровня (**Reference Position**) активного графика (укажите номер деления шкалы опорного уровня);
- значение опорного уровня (**Reference Value**).

В обоих окнах должны получиться графики АЧХ фильтра в полном частотном диапазоне.

Для получения более удобного масштаба по частоте выберите начальную и конечную частоту. Для полосовых фильтров это частоты, соответствующие ширине графика модуля  $S_{21}$  (например, по уровню  $-50 \dots -60$  дБ для ППФ).

Установить частотный диапазон можно несколькими способами:

- ввести клавишами **Start**, **Stop** и цифровыми клавишами начальную и конечную частоту диапазона;
- нажать клавишу **Center** и цифровыми клавишами ввести значение центральной частоты. Клавишей **Span** + цифровые клавиши установить ширину диапазона (полосу обзора) относительно центральной частоты. То же самое можно сделать в пункте меню **Display => Frequency**.

Удобно устанавливать диапазон качания частоты с помощью маркеров. Для этого необходимо:

- выбрать требуемые канал и график;
- нажать кнопку **Marker**. На экране появится маркер с номером 1. При необходимости можно активизировать и дополнительные маркеры (2, 3, 4). Нажатие кнопки **Marker №...** включает маркер (если он был выключен) или делает маркер активным;
- в окне канала, в котором должен быть изменен диапазон, с помощью мыши надо поместить маркер на активном графике в положение, соответствующее нижнему, верхнему или центральному значению нового диапазона частот;
- нажать клавишу **Marker Fctn**;
- выбрать нужную программируемую клавишу: **Marker => Start**, **Marker => Stop**, **Marker => Center**.
- при необходимости вручную подберите масштабы изображения в подменю **Stimulus => Start (Stop, Center, Span)**.

5. После того как изображение требуемых АЧХ получено на экране в удобном масштабе, его необходимо сохранить в графическом и численном виде. Сохраните изображение экрана в виде графического файла формата .BMP (256 color) следующим образом:

– выберите вид изображения – с белым фоном (**System => Invert Image => On**). Это удобно для дальнейшей распечатки «снимка экрана» в отчет;

– для записи снимка в файл нажмите кнопку **Dump Screen Image**. Имя файла и его расположение укажите в стандартном диалоговом окне сохранения. Ввод имени осуществляют с помощью внешней или экранной клавиатуры. Последнюю вызывают находящейся в окне диалога кнопкой **Input from the front panel**. Нажмите кнопку **Save** для выполнения операции сохранения.

6. Выведите численные данные по каждому графику (модули  $S_{21}$  и  $S_{11}$ ) в текстовые файлы типа .CSV (текстовый файл с разделителем – запятой). В приборе используется следующий формат выводимой информации по строкам:

– шапка данных => номер активного канала, номер активного графика, строка заголовка;

– строки данных => частота, данные графика.

Процедура запоминания данных графика:

– выбрать канал и запоминаемый график;

– нажать клавишу **Save/Recall**;

– нажать **Save Trace Data** и в диалоговом окне ввести имя файла и место его расположения.

Эти данные необходимы для сравнения с результатами моделирования в среде Microsoft Office, поэтому в ходе подготовки отчета их надо будет вручную свести в один файл в формате s2p (формат Touchstone). Процедура обработки данных описана в 1.4.4.

### ***1.4.3. Измерение параметров полосно-пропускающих и полосно-заграждающих фильтров с помощью программного обеспечения анализатора E5062***

Включите режим измерения параметров ППФ или ПЗФ способом, указанным далее. Он позволяет найти полосу пропускания (**BW**), центральную частоту (**cent**) и точки отсечки (**high** – верхняя частота отсечки и **low** – нижняя частота отсечки), добротность (**Q**) и вносимые потери (**loss**) в точке активного маркера. Поиск ведется относительно уровня маркера. Определение параметров, используемых при поиске полосы на примере ППФ, приведено на рис. 1.19.

Для реализации режима измерения поиска полосы ППФ и ФВЧ по вносимому ослаблению ( $S_{21}$ ) необходимо:

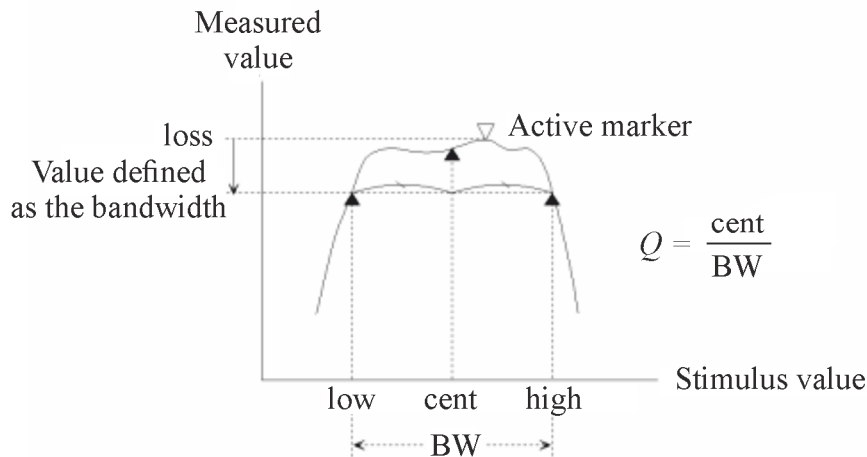


Рис. 1.19. Параметры полосы пропускания ППФ

1. Поместить активный маркер в точку максимума на графике. Для этого необходимо нажать клавишу **Marker Search** и установить маркер в максимум АЧХ кнопкой **Max** для ППФ и **Min** для ПЗФ.

2. Установить уровень, по которому отсчитывается полоса **Bandwidth Value** (по умолчанию используется уровень  $-3$  дБ). Обратите внимание, что для ППФ нужно использовать уровень  $< 0$ , а для ПЗФ  $> 0$ .

3. Выбрать переключатель **Bandwidth**  $\Rightarrow$  **ON**. В левой верхней части поля графика на экране отобразятся шесть параметров фильтра.

4. Запишите полученные результаты в протокол работы и сохраните изображение экрана в файл .BMP.

5. Выведите численные данные по каждому графику (модули  $S_{21}$  и  $S_{11}$ ) в текстовые файлы типа .CSV.

6. В ходе подготовки отчета преобразуйте данные файлов .CSV в формат .S2P (формат Touchstone). Процедура обработки данных описана в 1.4.4.

7. Измерьте параметры фильтра по заданному уровню КСВН:

- перейдите к графику КСВН;
- найдите минимум КСВН в рабочей полосе частот **Marker Search**  $\Rightarrow$  **Min**;
- задайте уровень превышения КСВН на границах рабочей полосы (например, **Bandwidth Value** = 1, что соответствует граничному значению КСВН = 2);

- включите режим поиска полосы **Bandwidth**  $\Rightarrow$  **ON**;

- запишите полученные результаты.

#### 1.4.4. Вывод данных измерения в формате Touchstone

Touchstone – это один из наиболее популярных форматов файлов, используемый для обмена информацией между измерительной аппаратурой и систе-

мами компьютерного моделирования (файл в формате SnP). Он представляет собой текстовый файл, в котором содержатся результаты измерения или расчета частотных характеристик СВЧ-многополюсников. В настоящее время этот формат является де-факто стандартом для выходных файлов результатов измерений в анализаторах СВЧ-цепей.

Основные правила синтаксиса файлов Touchstone версии 1.1:

1. Это текстовый файл, содержащий строки в кодировке US-ASCII.  
2. Расширение файла .snp, где n – количество портов в устройстве (например, файл данных частотных характеристик четырехполюсника имеет расширение .s2p).

3. Строки комментариев отмечены знаком (!). Комментарии могут содержать информацию о модели измерительного прибора, объекте измерения, дате и условиях проведения измерения.

4. Данные предваряются линией опций формата: **#[HZ/KHZ/MHZ/GHZ] [S/Y/Z/G/H] [MA/DB/RI] [R n]**. Она начинается со знака # и указания единицы измерения частоты Hz, MHz, GHz. Второе слово – обозначение параметра (S – матрица рассеяния, Z – матрица сопротивлений и пр.), третье и четвертое – формат вывода (MA – модуль и аргумент в градусах, DB – модуль в децибелах и аргумент в градусах, RI – вещественная и мнимая части параметра). Последние два слова – R и число – указывают нормирующее волновое сопротивление портов в омах (например, **#GHZ S DB R 50**).

Строки данных имеют формат, зависящий от количества портов:

– 1-port data set (line): <frequency value> <S<sub>11</sub>>

– 2-port data set (line) :<frequency value> <S<sub>11</sub>>, <S<sub>21</sub>>, <S<sub>12</sub>>, <S<sub>22</sub>>.

Здесь  $S_{ij}$  – данные измерения (пара значений параметра). Отметим, что параметр  $S_{21}$  расположен левее параметра  $S_{12}$ . Разделитель в строке – символ пробела или табуляции. Данные частотной зависимости располагаются в виде набора строк, содержащих значения параметров в отдельных частотных точках. Строки располагаются в порядке нарастания частоты.

Пример вывода данных измерения S-параметров четырехполюсника в файл test.s2p:

***!2-port S-parameter file, three frequency points***

***# GHZ S RI R 50.0***

***!freq ReS11 ImS11 ReS21 ImS21 ReS12 ImS12 ReS22 ImS22***

***1.0000 0.3926 -0.1211 -0.0003 -0.0021 -0.0003 -0.0021 0.3926 -0.1211***

***2.0000 0.3517 -0.3054 -0.0096 -0.0298 -0.0096 -0.0298 0.3517 -0.3054***

***3.0000 0.3419 0.3336 -0.0134 0.0379 -0.0134 0.0379 0.3419 0.3336***

К сожалению, в приборе E5062A вывести полный файл данных в формате s2p (для двухпортового устройства) не удастся. Поэтому приходится объединять данные двух графиков, выводимых в текстовом формате CSV.

Для объединения данных можно использовать Microsoft Excel. Примерная схема операции ручного создания файла в формате Touchstone:

1. Загрузите файл Touchstone.xls – он содержит заголовок # Hz S DB R 50. Можно ввести такой заголовок в новую книгу Excel и вручную.

2. Если используется Excel версии 2019, то необходимо предварительно зайти в настройки программы: **Файл => Параметры**. На вкладке **Данные** в разделе **Отображение мастеров импорта данных прежних версий** поставить галочку **Из текста (прежних версий)**.

3. Установите курсор таблицы на вторую строку.

4. Используйте команду импорта текстовых данных Excel. Для версии 2019: **Данные => Получить данные => Устаревшие мастера => Из текста (прежних версий)**. Для версии 2016: **Данные => Из текста => Импортировать данные**. Для других версий: **Данные => Получение внешних данных => из текста** либо **Данные => Импорт внешних данных => Импортировать данные**. Импортируйте файл  $S_{11}$ . Режим импорта – с разделителем, импорт с 4-й строки, разделитель – запятая, формат данных *всех* столбцов – текстовый.

5. Установите курсор на 4-й столбец 2-й строки. Аналогично импортируйте данные коэффициента  $S_{21}$ . Первый столбец (частоту) при этом не экспортируйте (**Формат данных столбца => пропустить столбец**).

6. Для завершения структуры файла необходимо добавить данные  $S_{12}$  и  $S_{22}$ , которые не измерялись. Заполните недостающую часть таблицы имеющимися данными  $S_{11}$  и  $S_{21}$ . Можно повторно импортировать данные из файлов или просто скопировать столбцы 4, 5 в столбцы 6, 7, а столбцы 2, 3 – в столбцы 8, 9.

7. Сохраните полученный файл в текстовом виде .txt (разделитель – табулятор) и затем переименуйте его расширение в .s2p.

8. В таком виде файл готов к загрузке в программу Microwave Office.

#### ***1.4.5. Компьютерное моделирование фильтров и сравнение результатов с данными эксперимента***

В программе лабораторной работы предусмотрено два варианта моделирования исследуемых фильтров – электродинамическое (с использованием пла-

нарных моделей полосковых элементов EMSight) и схемотехническое. Файлы проектов моделирования называются **XXX\_EM0.emp** и **XXX\_Schem0.emp**, где XXX – название типа фильтра (LPF, HPF, BPF или BSF). В проектах представлены готовые EM structures для всех типов фильтров, а также схемотехническое их представление в виде микрополосковых элементов. Размеры и свойства элементов соответствуют исследуемым фильтрам и не требуют корректировки.

Задачи расчетной части работы:

1. Рассчитать модели фильтра в оптимальном для фильтра частотном диапазоне (в котором проводились измерения).
2. Построить графики частотных характеристик элементов матрицы рассеяния и КСВ. Отдельно построить графики ослабления и КСВ в полосе пропускания (или в полосе запираания для ПЗФ).
3. Сравнить результаты электромагнитного и схемотехнического моделирования на одном графике. Для этого надо вывести данные электромагнитного моделирования в файл (Output File) типа s2r и внести эти данные в схемотехническую модель.
4. В проект схемотехнического моделирования ввести данные измерений из заранее подготовленного файла формата s2r и построить их на одном графике с расчетными характеристиками.
5. Полученные графики сохранить и поместить в отчет по лабораторной работе.

### **1.5. Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать структурную схему установки, таблицы с результатами измерений параметров фильтров, графики измеренных частотных зависимостей, сохраненные графики измеренных зависимостей в формате .BMP, графики результатов моделирования фильтров в среде MWO. Приведите выводы о точности проведенных измерений, а также о соответствии результатов измерений и моделирования фильтров.

### **1.6. Контрольные вопросы**

1. Дайте определение матрицы рассеяния ( $S$ -матрицы). Как размерность матрицы связана с количеством полюсов или портов описываемого ею устройства? Почему в диапазоне СВЧ чаще всего прибегают к измерению матрицы рассеяния вместо матрицы сопротивления или проводимости?



2. Сформулируйте измерительные задачи, решаемые анализатором цепей СВЧ.
3. Какие особенности имеет измерение параметров цепей в СВЧ-диапазоне?
4. Для чего в анализаторах цепей СВЧ используют преобразование частоты?
5. Поясните структурную схему анализатора E5062A. Укажите назначение основных блоков прибора.
6. Что такое «калибровка» векторного анализатора цепей СВЧ? Какие погрешности с ее помощью можно устранить?
7. Какие преимущества и недостатки имеет векторный метод измерения параметров СВЧ в сравнении со скалярным методом?
8. В чем заключаются отличия векторного измерителя параметров СВЧ от панорамного измерителя параметров цепей СВЧ типа P2-61, описанного в 6.3?

## **2. СКАЛЯРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ АЧХ СВЧ-УСТРОЙСТВ**

В лабораторной работе студенты знакомятся с компьютерным измерительным комплексом для измерения АЧХ СВЧ-цепей. Он включает в себя синтезатор СВЧ-сигнала и измеритель мощности, соединенные с компьютером через интерфейс USB. Комплекс работает под управлением программного блока, реализующего различные алгоритмы измерения скалярных параметров матрицы рассеяния СВЧ-устройств.

### **2.1. Описание лабораторной установки**

В скалярном измерителе АЧХ применены следующие компоненты и приборы фирмы Mini-Circuits:

- генератор сигналов (синтезатор) Mini-Circuits SSG-4000LH (рабочий диапазон частот 250...4000 МГц, выходная мощность –60...+10 дБм);
- измеритель мощности СВЧ-сигнала Mini-Circuits PWR-4GHS в комплекте с ПО для исследования вносимых потерь 2-портовых устройств;
- двунаправленный ответвитель Mini-Circuits ZX30-20-20BD+ (0,5...2 ГГц, переходное ослабление 20 дБ), используемый для измерения обратных потерь;
- согласованные нагрузки Mini-Circuits ANNE-50+;
- полосно-пропускающий фильтр Mini-Circuits VBFZ-1400+ (паспортная полоса пропускания 1350...1450 МГц);

– программное обеспечение компании Mini-Circuits для управления синтезатором и USB-датчиком мощности.

Рассмотрим принцип действия основных компонентов лабораторной установки – синтезатора частоты и измерителя мощности СВЧ-диапазона.

## 2.2. Принцип действия синтезаторов СВЧ-диапазона

*Синтезаторами* частоты называют генераторы гармонических напряжений с дискретной перестройкой частоты. Они обеспечивают хорошую форму сигнала, его высокую спектральную «чистоту», точность установки и возможность программной перестройки частоты, стабильность, равную стабильности частоты опорного кварцевого генератора. Синтезаторы позволяют получать сетку частот выходного сигнала с дискретностью до сотых долей герц. По точности установки и стабильности частоты синтезаторы превосходят обычные измерительные генераторы с плавной перестройкой частоты. Они легко сопрягаются с автоматизированными информационно-измерительными системами.

Различают несколько основных способов построения синтезаторов частоты:

- с прямым аналоговым синтезом частоты (Direct Analog Synthesizers);
- косвенным синтезом частоты (Indirect Synthesizers) или синтезаторы с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ);
- прямым цифровым синтезом формы сигнала (Direct Digital Synthesizers).

Приборы с прямым аналоговым синтезом частоты основаны на изменении частоты опорного колебания с помощью операций деления, умножения, сложения и вычитания частот его гармоник. Сигнал кварцевого генератора с помощью умножителей и делителей частоты преобразуется в набор гармонических составляющих, формирующих сетку опорных частот. С помощью коммутатора выбирают два сигнала, из которых с помощью смесителя формируют на выходе сигнал с суммарной или разностной частотой, равной желаемой выходной частоте синтезатора. Очистку результирующего сигнала от побочных колебаний проводят с помощью системы узкополосных фильтров.

Достоинством таких генераторов является высокая скорость перестройки частоты и низкий фазовый шум, недостатком – значительный уровень побочных гармоник, ограниченный частотный диапазон, сложность схемы (особенно, если требуется малый шаг перестройки). В настоящее время такие приборы в измерительной практике применяют в основном в качестве источника

сигналов для синтезаторов с косвенным принципом формирования частоты (синтезаторы с ФАПЧ).

Синтезаторы, основанные на применении ФАПЧ (PLL – Phase Locked Loops), как правило, более компактны. Простейший однопетлевой синтезатор ФАПЧ включает в себя генератор, управляемый напряжением (ГУН или VCO – Voltage Controlled Oscillator), и программируемый делитель частоты с переменным коэффициентом деления (ДПКД) (рис. 2.1).

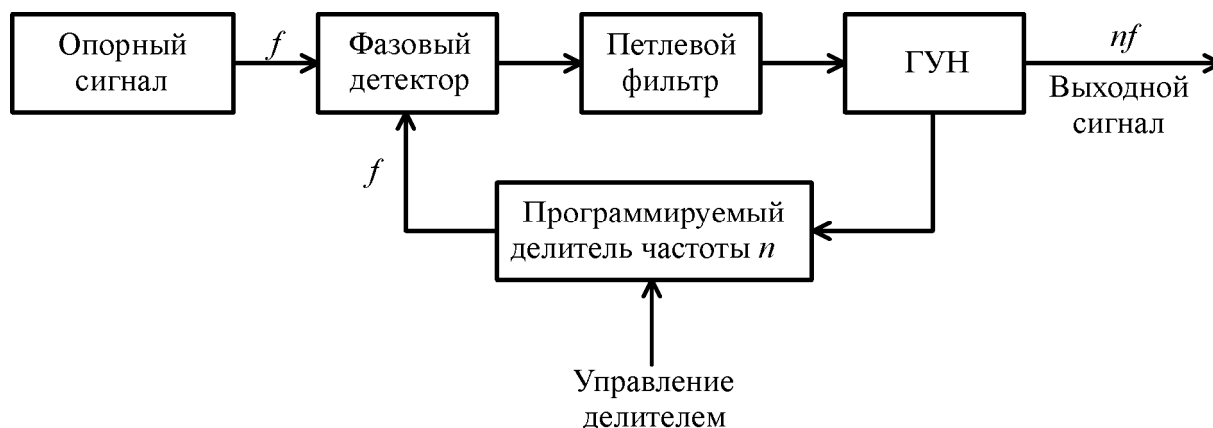


Рис. 2.1. Структурная схема цифрового синтезатора с ФАПЧ

На фазовый детектор подают два колебания: первое – со стабильной частотой ( $f_{\text{оп}}$ ), второе – с выходной частотой, уменьшенной в  $n$  раз ( $f_{\text{вых}}/n$ ). Напряжение с выхода фазового детектора, пропорциональное разности фаз колебаний, воздействует на управляемый генератор и подстраивает его до обеспечения равенства частот  $f_{\text{вых}}/n = f_{\text{оп}}$ . Изменяя коэффициент деления  $n$ , получают требуемую сетку частот с шагом, равным  $f_{\text{оп}}$ .

Главным преимуществом схем синтезаторов на основе ФАПЧ являются простота конструкции и более чистый спектр выходного сигнала. Основной недостаток – большое время перестройки и значительно более высокий уровень фазового шума, чем у схем с прямым аналоговым синтезом.

Качество выходного сигнала и его параметры (мощность, спектральная «чистота») зависят в основном от генератора, управляемого по частоте напряжением. ГУН представляет собой автогенератор, содержащий параметрическую частотоподающую цепь (контур или резонатор), рабочая частота которого меняется внешним управляющим напряжением (tuning voltage). При относительно небольшой девиации частоты электрическая перестройка резонатора генератора легко осуществляется *варикапом* – полупроводниковым *варакторным диодом*, барьерная емкость которого зависит от запирающего напряжения смещения. При большом диапазоне перестройки по частоте электрическую

перестройку ГУН реализуют с помощью ферродиеlectricких резонаторов на железо-иттриевом гранате (ЖИГ-сфера, YIG resonators). Управление частотой генератора осуществляют за счет изменения собственной частоты резонатора, выполненного в виде шарика (сферы). Сферу помещают в зазор электромагнита. Ее резонансная частота линейно зависит от напряженности внешнего подмагничивающего поля, создаваемого током в катушках электромагнита. Частота резонанса такого элемента может меняться в широких пределах (до 10 раз). Добротность ЖИГ-резонаторов довольно высока (до нескольких тысяч), что определяет низкий уровень фазовых шумов генератора. ГУН с ЖИГ-резонаторами имеют линейные, хорошо воспроизводимые перестроечные характеристики, что упрощает предварительную установку частоты в многокольцевых синтезаторах.

Синтезаторы с прямым цифровым синтезом (ПЦС) используют для формирования сигнала быстродействующий цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). При этом форма синтезируемого сигнала может быть произвольной. На практике такие синтезаторы, помимо синусоидального сигнала с заданной фазой, могут генерировать прямоугольный и треугольный сигналы, амплитудно-модулированный и частотно-модулированный сигналы с периодическим законом изменения «модулирующего сигнала». Несомненное достоинство такого метода формирования сигналов – высокая стабильность и низкий фазовый шум. Эти параметры определяются только характеристиками задающего генератора. В отличие от системы ФАПЧ синтезаторы с ПЦС не добавляют новых частотных компонентов вблизи рабочей частоты, но могут создавать довольно большие побочные гармоники. Недостатком является сложность реализации ЦАП, работающего на высоких частотах (1 ГГц и выше), невозможность формирования частоты выше половины частоты дискретизации, а также значительная потребляемая мощность.

Синтезатор SSG-4000LH, используемый в лабораторной работе, представляет собой компактный источник СВЧ-сигнала с малым уровнем побочных составляющих. Синтезатор частоты реализован в виде модуля с внешним блоком питания. На передней панели установлены выходной разъем N-типа и кнопка включения питания. На задней панели размещены разъемы входа и выхода сигнала опорной частоты, разъемы входа/выхода импульсной модуляции и USB-разъем.

Управление синтезатором осуществляется по шине USB программой Mini-Circuits Synthesized Signal Generator. Программным способом можно установить частоту и уровень выходного сигнала, включить режимы качания

частоты и импульсной модуляции выходного сигнала. Для измерения частотных характеристик с применением датчика мощности используют другую программу (Mini-Circuits Smart RF Power Meter), в которой управление генератором совмещено с измерением мощности.

Основные параметры синтезатора частоты Mini-Circuits SSG-4000LH:

- диапазон частот перестройки 250...4000 МГц, минимальный дискрет перестройки (разрешение по частоте) 5 кГц;
- точность установки частоты не хуже  $\pm 10^{-6}$ ;
- КСВН выхода – от 1,5 до 2,3;
- пределы установки выходного уровня мощности на нагрузке 50 Ом (–60...+10 дБм) с дискретом 0,25 дБм, точность установки  $\pm 0,25$  дБм;
- уровень побочных составляющих при  $P = 0$  дБм не хуже –74 дБн (в децибелах относительно несущей);
- уровень фазового шума при отстройке 1 кГц в пределах –80...–95 дБн/Гц;
- время перестройки частоты не менее 15 мс;
- параметры импульсной модуляции: форма сигнала – прямоугольная, длительность фронта выходного радиоимпульса не менее 30 нс, минимальная длительность импульса порядка 1 мкс.

### 2.3. Принципы измерения мощности на СВЧ

*Мощность* сигнала – это произведение мгновенных значений напряжения и тока (мгновенная мощность). В радиотехнике чаще говорят о мощности как квадрате напряжения сигнала на нагрузке 1 Ом:

$$P(t) = u(t)i(t) = \frac{u^2(t)}{1 \text{ Ом}}$$

Наряду с абсолютными единицами (ватт, милливатт и др.) широко используются относительные логарифмические единицы мощности [дБ]

$$P = 10 \lg \frac{P}{P_0},$$

где  $P_0$  – мощность, принимаемая за исходный уровень (обычно 1 мВт). Соответственно, логарифмическая единица обозначается дБмВт или проще дБм [dBm].

Чаще всего надо знать среднюю мощность сигнала за заранее выбранный интервал времени  $T$ , равный или кратный целому числу периодов:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt.$$

Для импульсных сигналов важным параметром является *импульсная (пиковая) мощность* ( $P_{\text{п}}$ ). Она равна мгновенной мощности, усредненной на интервал за длительность импульса. Отношение пиковой и средней мощности называют *пик-фактором* сигнала.

Прибор, измеряющий мощность, называют *ваттметром*. Различают ваттметры *поглощаемой* и *проходящей* мощности. Измерительный тракт *ваттметра поглощаемой мощности* содержит приемный измерительный преобразователь (датчик) с присоединительным разъемом (фланцем) и измерительную НЧ-схему, которая позволяет оценить результат преобразования СВЧ-энергии.

Рассмотрим основные параметры ваттметров СВЧ:

1. *Рабочий диапазон частот* – это полоса частот, в которой погрешность ваттметра не превышает паспортную.

2. *Пределы измерения мощности*. Современные ваттметры обеспечивают диапазон измерений от долей микроватт до десятков ватт и более. Различают ваттметры малой (до 10 мВт), средней (10 мВт...10 Вт) и большой (более 10 Вт) мощности.

3. *Динамический диапазон ваттметра* – это соотношение мощностей максимального и минимального сигналов, которые могут быть измерены одновременно без искажения. Динамический диапазон определяется нелинейностью измерительного преобразователя и составляет в современных приборах 40...60 дБ.

4. *Основная погрешность и класс точности ваттметра*.

5. *КСВН входа ваттметра* определяет систематическую погрешность рассогласования приемного преобразователя, которая зависит также от степени согласования источника сигнала (генератора). В зависимости от класса точности прибора этот параметр находится в пределах 1,1–1,7.

В ваттметрах СВЧ наиболее часто используют терморезисторные, термоэлектрические и диодные датчики поглощаемой мощности.

**Терморезисторные преобразователи** позволяют определить мощность СВЧ-сигнала по изменению сопротивления термочувствительного элемента. Терморезисторы делят на две группы – болометры и термисторы. *Болометры* представляют собой тонкую проволочку (нить) или пленку на диэлектрической подложке. Их изготавливают из платины, палладия и других металлов, имеющих сильную зависимость сопротивления  $R_t$  от рассеиваемой в них мощности. Болометры имеют положительный температурный коэффициент сопротивления и зависимость сопротивления от рассеиваемой мощности,

близкую к линейной. Чувствительность болометра  $\frac{dR_t}{dP}$  лежит обычно в пределах 1...12 Ом/мВт. Болометры имеют высокую повторяемость результатов преобразования, незначительную зависимость параметров от температуры окружающей среды и малый разброс от экземпляра к экземпляру. Малая тепловая емкость и тепловая инерция позволяют использовать их для измерения импульсной мощности. Недостатками болометров являются низкая перегрузочная способность и невысокая чувствительность.

*Термисторы* – нелинейные полупроводниковые резисторы – изготавливают в виде бусинок или цилиндров малого размера. Термисторы имеют экспоненциальную зависимость сопротивления от рассеиваемой мощности:

$$R_t = R_0 \exp\left(-\beta \frac{t - t_0}{t_0 t}\right),$$

где  $t_0$  – температура окружающей среды;  $t$  – температура термистора, нагретого измеряемым сигналом;  $\beta$  – постоянный коэффициент. Они имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления и более высокую чувствительность (до 100 Ом/мВт и выше) по сравнению с болометрами.

Термисторы чаще применяются для измерения средней мощности, поскольку более инерционны, чем болометры. Они устойчивы по отношению к перегрузкам, однако им присуща нестабильность параметров во времени и сильная зависимость от температуры окружающей среды. Последнее обстоятельство требует введения в состав ваттметра термокомпенсационных схем.

**Термоэлектрические преобразователи** используют преобразование СВЧ-энергии в тепло, которое нагревает спай термопары. Получаемая термоЭДС измеряется чувствительным вольтметром. В СВЧ-диапазоне используют пленочные термопары, которые представляют собой две полоски из разных металлов, напыленных на диэлектрическую подложку. В месте контакта располагают резистивный элемент, нагрев которого СВЧ-сигналом приводит к появлению термоЭДС на концах термопары. ЭДС пропорциональна рассеянной мощности и обычно мала (доли милливольт). Для ее измерения используют высокочувствительные измерительные микровольтметры постоянного тока (аналоговые и цифровые).

Термоэлектрический метод имеет ряд преимуществ по сравнению с терморезисторным. ТермоЭДС слабо зависит от температуры окружающей среды. Не требуется сложных схем омметров, балансировки моста и пр. Термоэлектрические преобразователи имеют динамический диапазон до 50 дБ, чувстви-

тельность порядка 1 мВ/мВт, малое время установления показаний и практически не требуют подготовки к работе. Термопары пригодны для измерения средней и импульсной мощности. К недостаткам термоэлектрического метода относят нелинейность зависимости выходного напряжения от уровня СВЧ-сигнала при больших уровнях мощности, неравномерность частотной характеристики и малую чувствительность термоэлектрических преобразователей.

**Диодные преобразователи** используют полупроводниковые диоды с квадратичной вольт-амперной характеристикой для трансформации СВЧ-сигнала в постоянное напряжение. В отличие от обычных детекторных головок такие датчики должны иметь стабильные параметры и калиброванный коэффициент преобразования. Типичная характеристика диодного преобразователя представлена на рис. 2.2. Характеристика ограничена снизу уровнем внутренних шумов диода (порядка  $-70$  дБм) и квадратична примерно до значения  $-20$  дБм, далее начинается переходный участок, а с уровня порядка  $0$  дБм характеристика приближается к линейной (рис. 2.2, б).

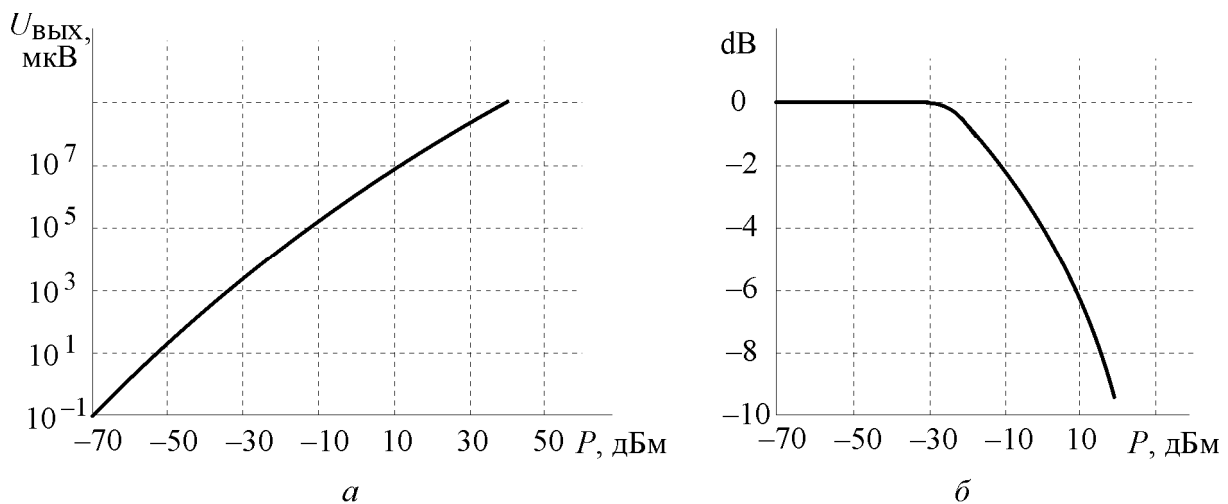


Рис. 2.2. Детекторная характеристика диодного датчика мощности в логарифмической системе координат: *а* – зависимость выходного напряжения от мощности; *б* – отклонение детекторной характеристики от квадратичной

Для расширения динамического диапазона в современных диодных датчиках используют корректировку детекторной характеристики. Поправочные коэффициенты, определенные при калибровке преобразователя в переходном участке  $-20 \dots 0$  дБм и на линейном участке (более  $0$  дБм) записываются в память датчика. При измерениях эти данные используются для компенсации неквадратичности характеристики конкретного диода.

Диодные преобразователи обладают высокой чувствительностью и используются в диапазоне мощностей от  $-70$  до  $+20$  дБм. Важной особенностью является малая инерционность диода, что дает возможность применять такие



преобразователи для измерения импульсной и пиковой мощности. Импульсные диодные ваттметры позволяют исследовать сигналы со сложными законами широкополосной модуляции (рабочая полоса по видеосигналу модуляции до 5 МГц и более). Такие приборы позволяют вывести на экран измерительного блока форму огибающей мгновенной мощности исследуемого импульса, выделить интересующую часть импульса для измерения пиковой мощности (стромирование сигнала), определить пик-фактор сигнала.

В лабораторной работе используется диодный USB-датчик мощности СВЧ Mini-Circuits PWR-4GHS. Датчик полностью управляется программой Mini-Circuits Smart RF Power Meter. Программа предусматривает автоматическое опознавание датчика и получение результата измерения, выбор единицы измерения, индикацию температуры датчика. Предусмотрены режимы относительных измерений и усреднения результатов (averaging). Программа содержит большое количество приложений (Measurement Applications), которые позволяют одновременно с измерением мощности управлять частотой и выходной мощностью синтезатора.

Основные параметры датчика мощности Mini-Circuits PWR-4GHS:

- рабочий диапазон частот 9 кГц...4000 МГц, минимальный дискрет перестройки (разрешение по частоте) 5 кГц;
- динамический диапазон датчика  $-30...+20$  дБ, разрешение 0,01 дБ;
- точность измерения не хуже  $\pm 0.05$  дБм;
- КСВН входа – от 1,1 до 1,2 в диапазоне рабочих частот;
- время измерения 30 мс в быстром режиме (Faster) и 100 мс (режим малых шумов Low Noise). Для уменьшения шумов предусмотрен режим усреднения (от 1 до 999 раз).

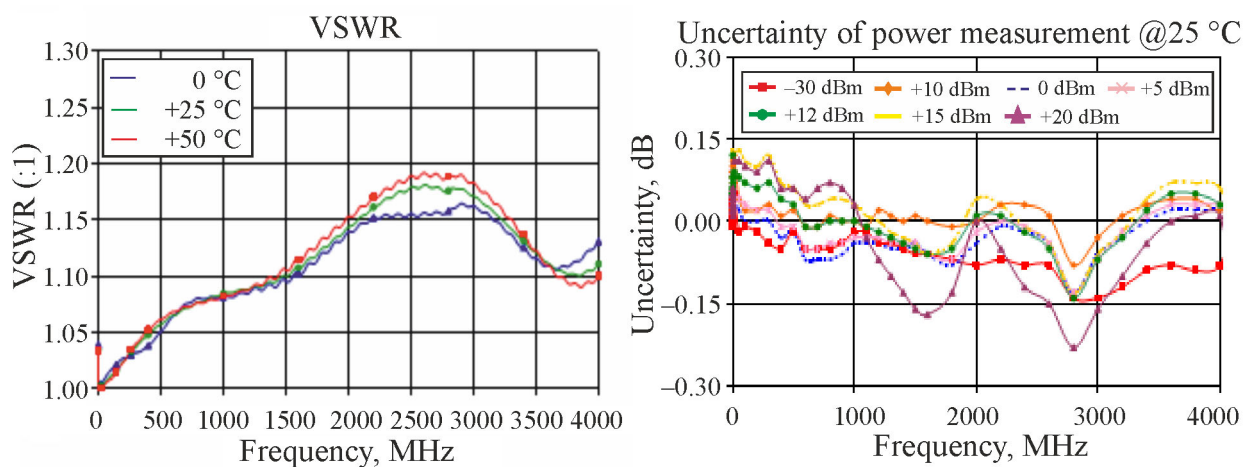


Рис. 2.3. Частотные зависимости параметров датчика: а – входного КСВН; б – результатов измерения (собственная АЧХ)

Частотные зависимости КСВН и неравномерности чувствительности датчика представлены на рис. 2.3.

Программное обеспечение датчика работает в среде 32/64-битных операционных систем Windows и Linux. Предусмотрены режимы автокалибровки датчика по частоте и температурной компенсации в диапазоне 0...50 °С. Максимальное напряжение на входе 4 В, максимальный уровень мощности 25 дБм.

## 2.4. Задание и указания к выполнению работы

### 2.4.1. Измерение модуля коэффициента передачи полосно-пропускающего фильтра

Включите питание синтезатора частоты SSG-4000LH. На компьютере запустите программу управления синтезатором и датчиком мощности **PowerMeter**. В открывшемся окне выберите режим работы **USB**. Отображаемое главное окно содержит информацию об установленном уровне сигнала и частоте, формате выходной мощности [dBm], режиме работы генератора (faster или low noise), марку и серийный номер датчика мощности PWR-SEN-4GHS (Sensor Model).

Перейдите в режим выбора программы измерения (**Measurement Applications**). Для измерения АЧХ коэффициента передачи ( $S_{21}$ ) используйте п. 6 (**Insertion Loss – 2 Port Device**). Далее задайте произвольное имя проекта **Project Name** (например, «S21» и данные об исследуемом устройстве – наименование фильтра – «VBFS-1400-S+»). Нажмите **Next**.

Следующее окно позволяет выбрать частотную сетку измерений. Задайте начальную частоту (**Freq. Start**) 500 МГц, конечную частоту (**Freq. Stop**) 2500 МГц, число частотных точек (**No. Of Points**) в пределах 101–301 точек, уровень сигнала синтезатора (**Source Start** и **Source Stop**), например 0 dBm. Постройте таблицу частотных точек (клавиша **BUILD**). Нажмите **Next**. Появится окно измерений.

Сохраните проект в файл в папку D:\Students или на USB флэш-накопителе. Для этого нажмите кнопку **Save**.

Для измерения коэффициента передачи на первом шаге требуется откалибровать источник сигнала, измерить зависимость уровня сигнала генератора от частоты. Выберите этап измерений нажатием кнопки **Step 1: Power Reference In**.

Соберите схему калибровки «на проход» согласно рис. 2.4, но без исследуемого фильтра. Измеритель мощности при этом подключен напрямую к вы-

ходу направленного ответвителя, согласованного по дополнительным плечам при помощи двух нагрузок Mini-Circuits ANNE-50+. Для запоминания уровня сигнала синтезатора в каждой частотной точке нажмите кнопку **RUN**.

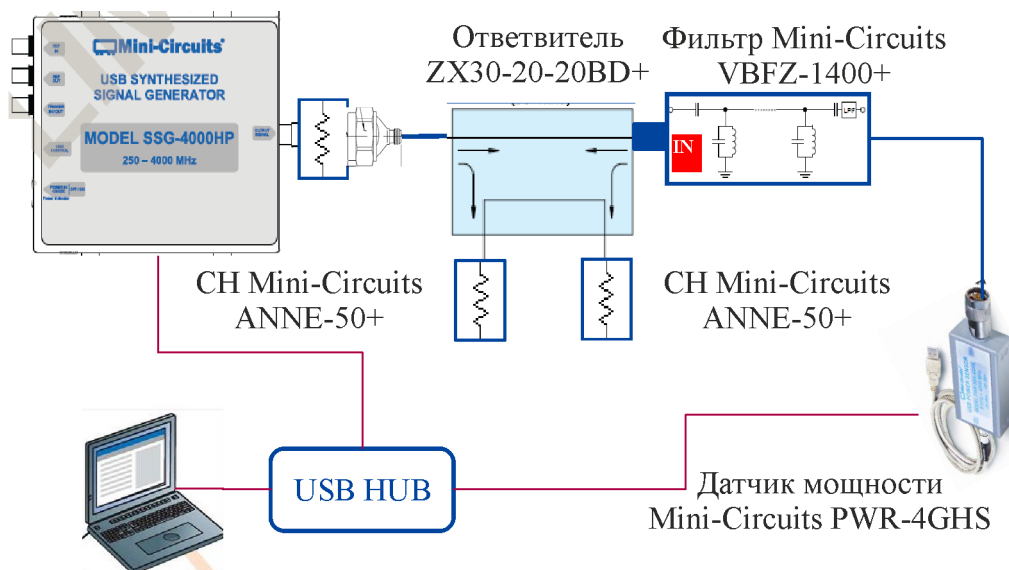


Рис. 2.4. Структурная схема лабораторной установки в режиме измерения коэффициента передачи

Второй шаг – измерение АЧХ фильтра. Установите исследуемый фильтр между датчиком и направленным ответвителем (рис. 2.4). Выберите второй этап измерений нажатием кнопки **Step 2. D.U.T. Measurement**. По умолчанию в программе предусмотрен режим непрерывных измерений на установленной сетке частот. Отключите его, сняв флажок **Continuous Mode**. Для отображения АЧХ на экране установите флажок **Display On-Line Graph**. Запустите измерение АЧХ кнопкой **RUN**. Результаты измерения АЧХ в процессе измерений выводятся в таблицу и в окно графика.

После завершения измерений включите автоматическое масштабирование графика (**Auto Scale**). На графике найдите максимальное значение (режим **Peak Search**) и запишите данные максимума модуля АЧХ (Insertion loss) в протокол. Затем определите полосу пропускания, перемещая маркер в точки (–3 дБ) относительно максимума. Определите также полосу фильтра по уровню (–20 дБ). Рассчитайте коэффициент прямоугольности АЧХ как отношение полос пропускания по уровням –3 и –20 дБ.

Полученные результаты измерений в таблице экспортируйте в файл в формате Excel. Для этого нажмите кнопку **EXCEL** и задайте имя файла в поле **Enter \*.CSV File Name**. Папку для сохранения файла можно задать при помощи кнопки **Choose path: Brows**. Сохранение файла ведется в текстовом формате с разделителями – запятыми (расширение .CSV).

Обработку результатов измерения удобно делать в электронных таблицах Excel. Если при вводе файла в формате .CSV в таблицу данные отображаются некорректно, то необходимо использовать режим загрузки данных из текстового файла, указав разделитель данных – запятую (**comma**). В этом случае данные из таблицы будут корректно распределены по ячейкам.

После экспорта данных постройте АЧХ фильтра в формате графиков Excel и выведите его на печать вместе с таблицей результатов измерений.

#### ***2.4.2. Измерение модуля коэффициента отражения (обратных потерь) полосно-пропускающего фильтра***

Измерение модуля коэффициента отражения с помощью направленного ответвителя осуществляется в п. 9 программы – **Return Loss Measurement Using Coupler**.

1. Создайте проект для измерения коэффициента отражения (можно в качестве шаблона использовать предыдущий проект). Частотные точки и уровни сигнала сохраните такими же, как в 2.4.1.

2. Для измерения коэффициента отражения необходимо сначала произвести калибровку «на отражение». Для этого соберите схему согласно схеме рис. 2.5, но без исследуемого фильтра и согласованной нагрузки, подключенной к фильтру. Калибровку уровня сигнала проводят при модуле коэффициента отражения, равном единице (режимы холостого хода (XX) или короткого замыкания (КЗ)). Удобно использовать режим XX, при котором надо просто отключить исследуемое устройство от рабочего плеча направленного ответвителя (НО). Таким образом, в процессе калибровки измеряется и запоминается уровень единичного коэффициента отражения. Выберите 1-й этап измерений в программе, нажав на кнопку **Step 1: Return Loss Reference**. Проведите калибровку, нажав кнопку **RUN**.

3. Следующий этап – измерение модуля коэффициента отражения при подключенном к НО фильтре. Для этого установите исследуемый фильтр на рабочее плечо НО. На выход фильтра необходимо подключить согласованную нагрузку Mini-Circuits ANNE-50 (рис. 2.5). Выберите второй этап измерений в программе нажатием кнопки **Step 2: D.U.T. Measurement**. Запуск измерений осуществляется нажатием кнопки **RUN** при отключенном режиме **Continious Mode**. Проведите измерение и вывод графика коэффициента отражения аналогично методике в 2.4.1. На графике найдите минимум коэффициента отражения и оцените его значение на границах полосы пропускания, определенной ранее при измерении коэффициента передачи по уровню –3 дБ.

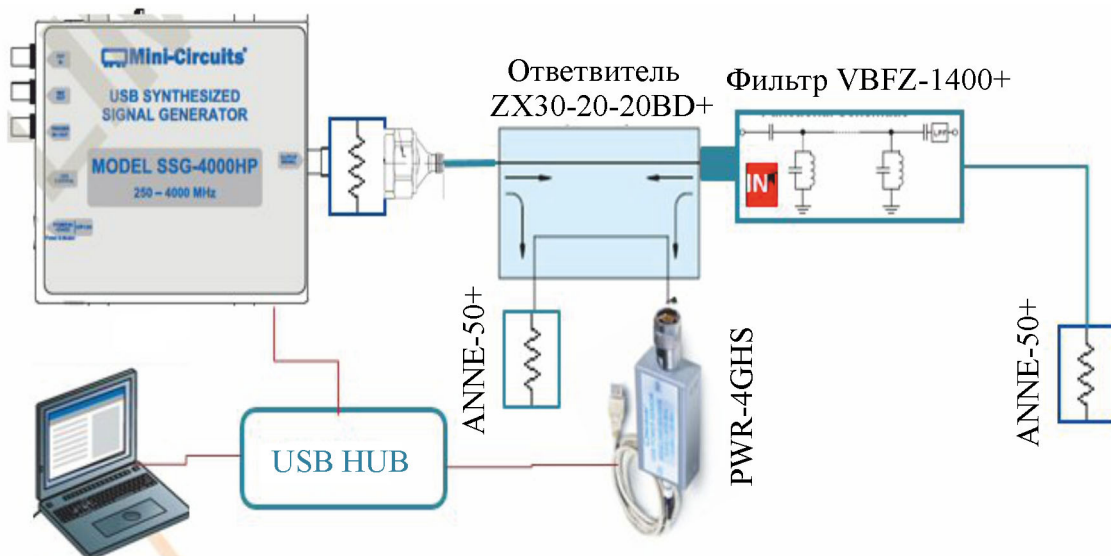


Рис. 2.5. Структурная схема лабораторной установки в режиме измерения коэффициента отражения

4. Экспортируйте полученную таблицу в файл Excel и постройте график полученных результатов. Распечатайте таблицу и график полученных результатов.

## 2.5. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать структурные схемы лабораторной установки в режимах измерения коэффициентов передачи и отражения, таблицы с результатами измерений, графики измеренных зависимостей.

## 2.6. Контрольные вопросы

1. Как реализуют ГУН СВЧ-синтезаторов? Как в них управляют частотой генерации?
2. Какие принципы измерения используют в ваттметрах СВЧ?
3. Поясните структурную схему измерителя КСВН и ослабления на основе синтезатора частоты и ваттметра.
4. Для чего в скалярном измерителе используют НО?
5. Приведите пример матрицы рассеяния идеального направленного ответвителя. Какими параметрами обладает реальный НО?
6. В чем состоит калибровка скалярного измерителя СВЧ-параметров?
7. Почему при проведении калибровки скалярного измерителя коэффициента отражения достаточно использовать нагрузку ХХ или КЗ?
8. Почему точность измерения параметров СВЧ-устройства скалярным прибором ниже, чем при использовании векторного анализатора цепей СВЧ?

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛАНСНОГО СВЧ-СМЕСИТЕЛЯ

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

#### 3.1. СВЧ-смесители и их параметры

В измерительных приборах высоких частот (ВЧ) и СВЧ (анализаторах спектра, частотомерах и пр.) входной сигнал с помощью *преобразователя частоты* переносится на более низкую *промежуточную частоту* (ПЧ). На этой частоте осуществляется основное усиление сигнала и измерение его параметров. От свойств преобразователя частоты зависит степень искажения исходного сигнала и погрешность его измерения.

Структурная схема преобразователя частоты представлена на рис. 3.1. Он состоит из *смесителя* (обычно на основе СВЧ полупроводникового диода) и *гетеродина* (маломощного генератора СВЧ). На выходе предусмотрен усилитель с ППФ, выделяющим сигнал с промежуточной частотой.

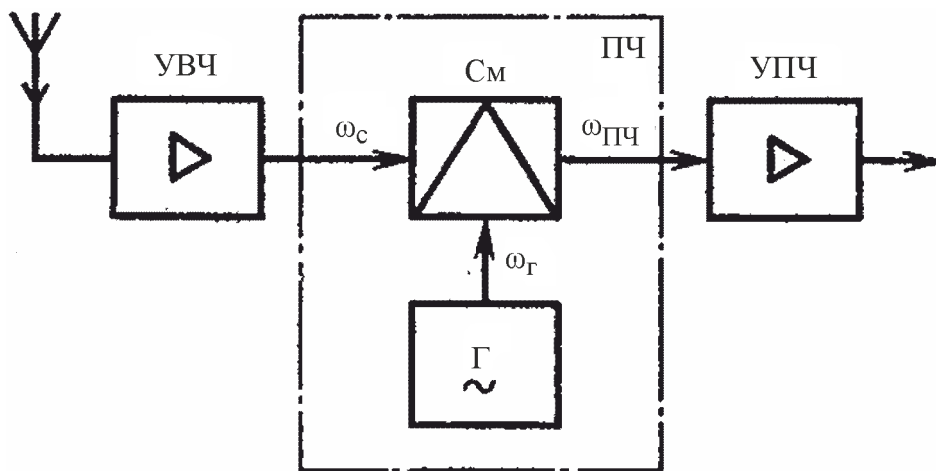


Рис. 3.1. Структурная схема преобразователя частоты

Преобразование частоты сигнала происходит за счет нелинейности характеристик смесительного диода, в качестве которого используют точно-контактные диоды (ТКД) и диоды с контактом Шотки (ДШ). Последние обладают более крутой вольт-амперной характеристикой (ВАХ) (рис. 3.2 – штриховая линия) по сравнению с точечными полупроводниковыми диодами (рис. 3.2 – сплошная линия), лучшей электрической и механической прочностью, однако требуют значительной мощности гетеродина. Иногда в смесителях применяют обращенные туннельные диоды (ОД), у которых используется обратная ветвь ВАХ (рис. 3.2 – штрихпунктирная линия).

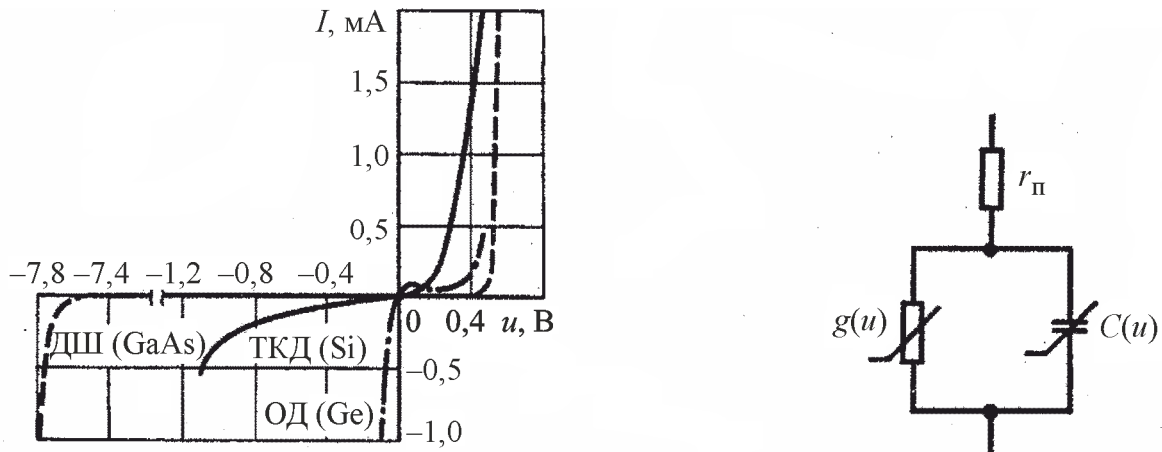


Рис. 3.2. ВАХ смесительных диодов и их эквивалентная схема

Упрощенная эквивалентная схема смесительного диода содержит сопротивление потерь  $r_{\Pi}$ , нелинейную паразитную емкость  $C(u)$  и нелинейную проводимость барьерного слоя диода  $g(u)$ . Эффект преобразования частоты связан с этой проводимостью, поэтому смесительный диод можно рассматривать как *варистор* – нелинейный резистор. Схема простейшего однодиодного СВЧ-смесителя приведена на рис. 3.3, а, эквивалентная схема – на рис. 3.3, б.

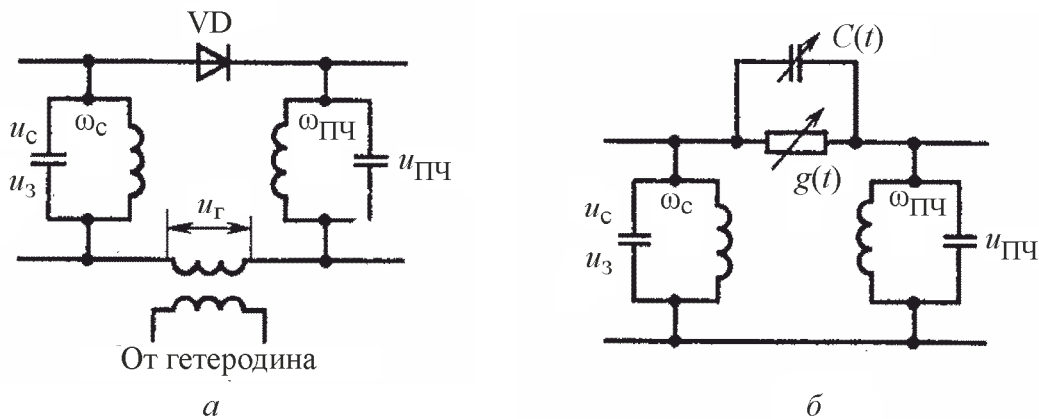


Рис. 3.3. Схемы однодиодного смесителя: а – электрическая; б – эквивалентная

Колебания сигнала и гетеродина суммируются и подаются на смесительный диод. Мощность сигнала гетеродина делают значительно выше мощности входного сигнала. Поэтому для сигнала гетеродина диод представляет собой нелинейный элемент. В токе диода возникает как первая, так и высшие гармоники сигнала гетеродина. Для входного сигнала малого уровня диод представляет собой резистор, проводимость которого меняется во времени сигналом гетеродина. Проводимость определяется крутизной ВАХ диода, которую удобно аппроксимировать степенным рядом. В спектре тока диода можно выделить постоянную составляющую  $I_0$ , а также многочисленные комбинационные составляющие с частотами  $\pm m\omega_c \pm n\omega_{\Gamma}$ , где  $m$  и  $n$  – целые числа.

На выходе смесителя фильтром ПЧ выделяют основной продукт преобразования – разностную промежуточную частоту  $\omega_{ПЧ} = \omega_c - \omega_r$ . Такой вариант смесителя называют «смеситель с верхней боковой полосой». Возможен и другой вариант – выделение частоты  $\omega_{ПЧ} = \omega_r - \omega_c$  («смеситель с нижней боковой полосой»). Нужно отметить, что в последнем случае при переносе спектра на ПЧ происходит его инвертирование. Соотношение мощностей преобразованного и входного сигнала определяет основной параметр смесителя – *потери преобразования*. СВЧ однодиодные смесители имеют потери преобразования порядка 7...10 дБ.

Кроме полезного сигнала ПЧ в спектре тока диода примерно такую же амплитуду будет иметь гармоника с частотой  $\omega_{\Sigma} = \omega_r + \omega_c$  (рис. 3.4).

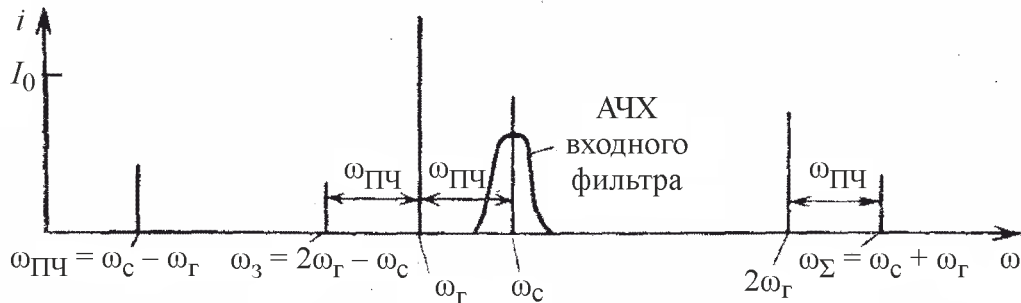


Рис. 3.4. Спектр комбинационных составляющих смесителя с верхней боковой полосой

Кроме этой составляющей, которую относительно просто отфильтровать на выходе, в спектре присутствует так называемая *зеркальная частота*  $\omega_3 = 2\omega_r - \omega_c$ . Она образуется в результате взаимодействия сигнала со второй гармоникой гетеродина. Отметим, что зеркальная частота совпадает с частотой так называемого зеркального канала преобразователя частоты. Сигнал зеркальной частоты образуется на входе смесителя также в результате *вторичного обратного преобразования*  $\omega_3 = \omega_r - \omega_c$  из-за взаимодействия сигналов ПЧ и гетеродина. Взаимодействие между колебаниями сигнальной и зеркальной частот оказывает существенное влияние на потери преобразования диодного смесителя.

Характеристики преобразования улучшаются при подавлении зеркальной частоты. Подавление комбинационных составляющих смесителя уменьшает потери преобразования и снижает уровень паразитного излучения гетеродина. Если на входе смесителя присутствует узкополосный фильтр-преселектор, настроенный на частоту сигнала, то эффективно подавляются помехи на частоте зеркального канала приема.



Основным недостатком одноконтурных 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 фильтра ПЧ. Для уменьшения влияния шумов гетеродина применяются балансные смесители различного типа: двухдиодные, двойные балансные, кольцевые и двойные кольцевые. Рассмотрим двухдиодный балансный смеситель (рис. 3.5). Он содержит два диода, которые включены таким образом, что токи через них в первичной обмотке выходного трансформатора направлены встречно. Синфазные токи создают взаимно компенсирующиеся магнитные потоки, а противофазные – складываются. Напряжение гетеродина подается на диоды синфазно, а напряжение сигнала – противофазно. Токи сигнала ПЧ поэтому тоже противофазны, и их магнитные потоки складываются и наводят на вторичной обмотке выходной сигнал ПЧ. Составляющие с частотой гетеродина создают противофазные потоки и на выходе взаимно компенсируются. При этом компенсируются и составляющие шума гетеродина.

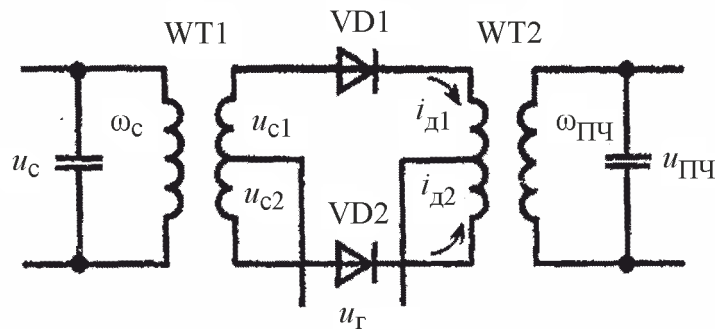


Рис. 3.5. Двухдиодный балансный смеситель

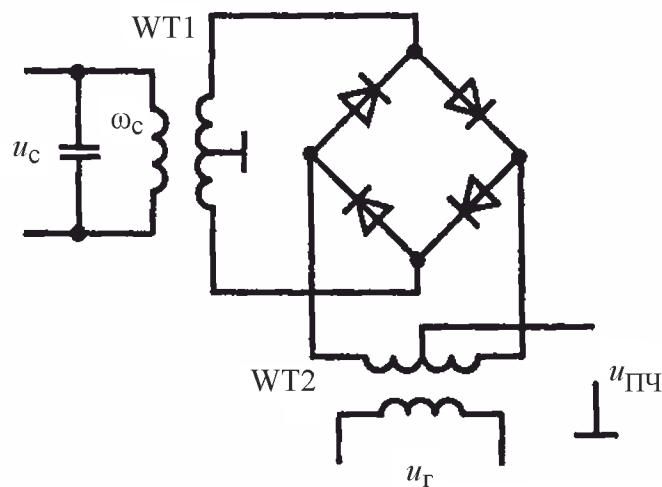


Рис. 3.6. Кольцевой балансный смеситель

Балансная схема имеет меньший коэффициент шума. Вся мощность гетеродина приложена к диодам и не поступает в нагрузку и в источник сигнала. Это позволяет уменьшить уровень сигнала гетеродина. Схема обеспечивает малые потери входного сигнала в цепях гетеродина и имеет типовые потери преобразования в пределах 5...8 дБ.

Более высокую избирательность по прямому каналу имеют четырехдиодные кольцевые смесители (рис. 3.6).

Благодаря симметрии трансформаторов и диодов обеспечивается хорошая 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).

### 3.2. Анализаторы спектра СВЧ-радиосигналов

Во многих случаях спектральный анализ сигналов в диапазонах ВЧ и СВЧ сводится к определению амплитуд и частот гармонических составляющих периодических сигналов, измерению частотной зависимости спектральной плотности мощности случайных сигналов.

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

Упрощенная структурная схема АС с последовательным методом анализа представлена на рис. 3.7.

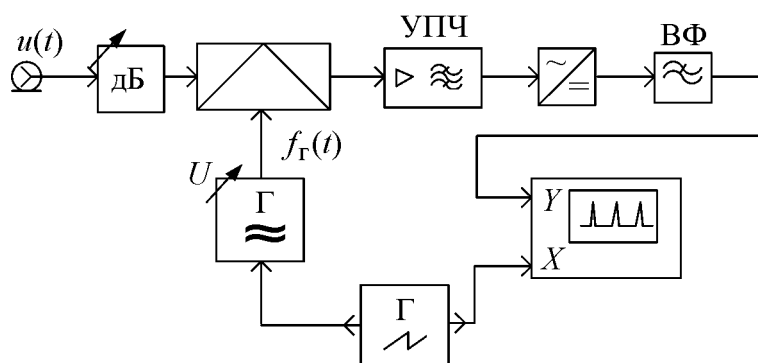


Рис. 3.7. Структурная схема АС последовательного типа

Основным входным блоком прибора является преобразователь частоты сигнала, состоящий из смесителя и гетеродина, управляемого напряжением. Гетеродин является генератором качающейся частоты (ГКЧ) с постоянной амплитудой и меняющейся по линейному закону частотой:

$$f_{\Gamma}(t) = f_{\Gamma_{\text{н}}} + \Delta f_{\text{а}} \frac{u_{\text{упр}}(t)}{U_{\text{упр max}}}.$$

Перестройку частоты гетеродина производят генератором пилообразного напряжения  $u_{\text{упр}}(t)$ . Он задает время анализа ( $T_{\text{а}}$ ), т. е. время, за которое АС сканирует заданный диапазон частот спектра (полосу анализа  $\Delta f_{\text{а}}$ ). Этим же напряжением осуществляют горизонтальное отклонение луча осциллографического индикатора.

Сигнал с гетеродина поступает на смеситель. Если на вход анализатора подать синусоидальный сигнал с частотой  $f_{\text{с}}$ , то на выходе смесителя возникают колебания с комбинационными частотами, в том числе с частотой  $f_{\text{с}} - f_{\Gamma}(t)$ . Этот сигнал подают на вход узкополосного усилителя промежуточной частоты (УПЧ), в данном случае называемый радиофильтром, который и осуществляет процедуру частотного анализа. При непрерывной перестройке частоты гетеродина частота сигнала на выходе смесителя будет также линейно изменяться. При попадании частоты в полосу пропускания фильтра УПЧ на его выходе начнется формирование отклика АС на гармонический входной сигнал. Он представляет собой радиоимпульс, огибающая которого будет повторять форму АЧХ фильтра УПЧ. В момент  $t_0$ , когда выполняется условие  $f_{\text{с}} - f_{\Gamma}(t_0) = f_{\text{ПЧ}}$ , амплитуда радиоимпульса будет максимальна. Детектор выделяет видеоимпульс, повторяющий огибающую сигнала, а также осуществляет низкочастотную фильтрацию частоты ПЧ (видеофильтр – ВФ). Отклик поступает на канал  $Y$  осциллографического индикатора. На канал  $X$  индикатора подают напряжение развертки, которым управляется гетеродин преобразователя частоты. При наличии в составе спектра входного сигнала нескольких гармоник перенос их на ПЧ будет происходить последовательно с изменением частоты гетеродина. На выходе фильтра УПЧ возникнет уже несколько радиоимпульсов, а на экране осциллографического индикатора – несколько откликов. Таким образом, происходит последовательное частотное сканирование спектра входного сигнала. Совокупность откликов спектроанализатора на каждую гармоническую составляющую входного сигнала называют *спектрограммой*. Величины откликов пропорциональны амплитудам входных гармо-

ник, расположение откликов на оси  $X$  соответствует частотам гармонических составляющих входного сигнала.

Отклик АС повторяет форму АЧХ УПЧ только в статическом режиме, когда частота изменяется 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

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

где  $\Delta f_a$  и  $T_a$  – полоса обзора и время анализа;  $A = 1 \dots 2$  – коэффициент, зависящий от формы АЧХ фильтра;  $\Delta f_{\text{УПЧ}}$  – его полоса пропускания. На практике считают допустимым режим работы анализатора с  $\mu = 1$ , откуда можно установить связь между необходимым временем анализа и выбранными полосой анализа и полосой пропускания УПЧ:

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

При широкой полосе анализа и узкой полосе пропускания  $\Delta f_{\text{УПЧ}}$  требуемое время анализа может достигать десятков секунд и более. Поэтому полоса пропускания УПЧ делается регулируемой, что позволяет подобрать оптимальное соотношение между временем анализа и формой отклика спектроанализатора. Динамические искажения могут возникнуть и при слишком узкой полосе видеофильтра детектора. Поэтому выбор времени анализа, полосы УПЧ (радиофильтра) и полосы ВФ при заданной полосе обзора спектра – задача комплексная и требующая определенного практического навыка.

Параметры спектра измеряют по спектрограмме. Амплитуды (уровни) спектральных составляющих измеряют обычно методом калиброванных шкал (аналогично осциллографу). Вертикальная калибруется в единицах напряжения (или мощности), относительного или абсолютного уровня – в децибел-милливаттах [дБм]. Для точного измерения частоты гармоник метод калиброванных шкал не подходит из-за невысокой стабильности частотной шкалы АС. Вместо этого используют метод частотных меток. На вход анализатора вместе с исследуемым сигналом от встроенного или внешнего калибратора подают радиоимпульсы, частота повторения которых стабилизирована кварцем. Спектр импульсов содержит гармоники, расстояние между которыми равно образцовой частоте. Отклики на эти гармоники образуют частотные метки на экране анали-

затора. Меняя частоту несущей радиосигнала, можно перемещать спектр сигнала калибратора в пределах полосы обзора. Сравнив исследуемый и образцовый сигналы, по масштабной сетке измеряют частоты гармоник.

Другой способ калибровки частотной шкалы – использование синусоидального сигнала с известной и плавно регулируемой частотой. На экране он создаст одиночную частотную метку. Перемещая метку по изображению, добиваются ее совпадения с исследуемой гармоникой. В ряде случаев в АС используют стоп-метку (маркер) в сочетании с электронно-счетным частотомером.

### 3.3. Краткие технические данные СВЧ-анализатора спектра GSP-827

В лабораторной работе используется СВЧ-анализатор GSP-827, который предназначен для исследования спектров в диапазоне до 2,7 ГГц. Он позволяет:

- измерить амплитуды и частоты гармонических сигналов;
- определить наличие паразитных амплитудной и частотной модуляции;
- оценить 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.

В АС в качестве индикатора использован цифровой осциллограф с микропроцессорным управлением. В качестве гетеродина смесителя использован СВЧ-синтезатор с цифровым управлением, что позволяет существенно улучшить точность измерения частоты гармоник. АС имеет жидкокристаллический индикатор с разрешением  $640 \times 480$ , интерфейсы RS-232 или GPIB (КОП). Основные параметры анализатора спектра GSP-827 приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

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

Вход АС имеет разъем N-типа; 50 Ом; КСВН входа < 1,5. Максимальный уровень входного сигнала +30 дБм, постоянное напряжение не более 25 В. Анализатор GSP-827 способен проводить сканирование полосы обзора от 9 кГц до 2,7 ГГц. Время анализа регулируется в пределах 100 мс...25,6 с, полоса пропускания радиофильтра УПЧ – от 3 кГц до 4 МГц (устанавливается дискретно). Полосу видеофильтра можно менять в пределах 10 Гц...1 МГц.

Прибор имеет низкий уровень собственных фазовых шумов. Плотность мощности фазовых шумов составляет –85 дБн/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; математическая обработка);
- 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).

### 3.4. Описание лабораторной установки

Исследуемый смеситель представляет собой гибридную интегральную схему SYM-25DHW производства фирмы Mini-Circuits. Смеситель имеет широкий рабочий диапазон входного сигнала (80...2500 МГц) и обеспечивает:

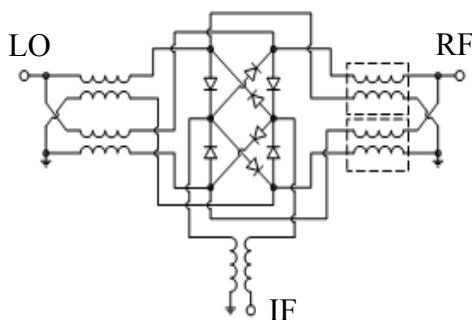


Рис. 3.8. Электрическая схема СВЧ-смесителя

Смеситель имеет широкий рабочий диапазон входного сигнала (80...2500 МГц) и обеспечивает:

- выбор частоты ПЧ (IF) – в пределах 0...1000 МГц;
- малые потери преобразования (6,4... 9 дБ);
- высокую линейность;

- развязку входной цепи (RF) и гетеродина (LO) в пределах 25...46 дБ, гетеродина и выхода ПЧ – порядка 36 дБ;
- КСВН сигнального входа не более 2.

Номинальный уровень мощности гетеродина порядка 17 дБм (около 50 мВт). Электрическая схема представляет собой двойной балансный смеситель с двумя диодными мостами и симметрирующими трансформаторами (рис. 3.8).

В лабораторной работе для выделения сигнала ПЧ используется внешний коаксиальный фильтр низкой частоты с частотой среза 800...900 МГц. В состав лабораторной установки входят также два измерительных СВЧ-генератора фирмы Agilent и анализатор спектра GSP-827.

### 3.5. Задание и указания к выполнению работы

#### 3.5.1. Измерение полного спектра комбинационных составляющих на выходе смесителя

1. Соберите схему измерительной установки согласно рис. 3.9. Соедините ВЧ-вход анализатора спектра с разъемом выхода ПЧ частоты смесителя (IF).

*Внимание!* Если к этому разъему подключен ФНЧ – его необходимо убрать.

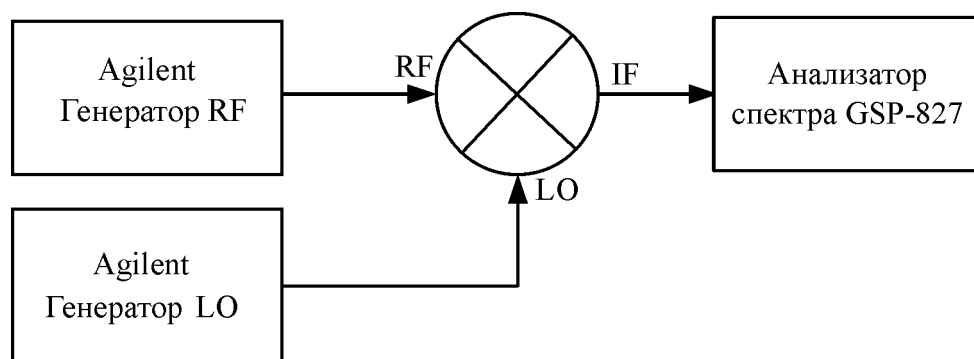


Рис. 3.9. Схема измерительной установки без ФНЧ

2. Соедините генератор сигнала гетеродина с разъемом LO, а генератор входного сигнала – с разъемом RF смесителя.

3. Включите анализатор спектра длительным нажатием кнопки **СЕТЬ**. Установите следующие параметры АС:

- полоса обзора – полный диапазон (**Full Span**);
- полоса пропускания радиопередатчика УПЧ (**RBW**) – 4 МГц;
- полоса видеофильтра (**VBW**) – 30 кГц;
- отсчетный уровень спектрограммы (**RefLevel**) – 0 дБм;
- шкала спектрограммы (**Unit**) в логарифмических единицах мощности – **dBm**;
- цена деления шкалы уровня (**Scale**) – 10 дБ.

4. Установите частоту на выходе гетеродина (LO)  $f_G = 900$  МГц, уровнем +17 дБм [dBm]. Установите частоту входного ВЧ-сигнала (RF)  $f_G = 1000$  МГц, уровень 0 дБм. Включите выходы генераторов нажатием кнопок **RF On/Off**. Частоты генераторов соответствуют работе смесителя с верхней боковой полосой. На выходе смесителя (IF), кроме преобразованного сигнала с частотой 100 МГц, появятся комбинационные составляющие типа  $\pm m \cdot f_c \pm n \cdot f_G$ . Амплитудный спектр полного выходного сигнала в диапазоне до 2,7 ГГц можно наблюдать на экране АС. Сфотографируйте полученную спектрограмму.

5. По калиброванной шкале уровня оцените амплитуды гармонических составляющих спектра (грубая оценка). Результаты занесите в табл. 3.2. 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 кружке. Частота и уровень спектра в точке расположения маркера выводятся в правой верхней части экрана. Переведите маркер на пик спектра (**Поиск Пика => To Peak**). При необходимости подстройте положение маркера колесом прокрутки. Запишите частоту гармоники и уровень ее мощности [дБм] в табл. 3.2. Подберите для каждой гармоники номера  $m = \pm 1, \pm 2, \dots$  и  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$  комбинационной частоты и занесите их в шапку табл. 3.2.

Таблица 3.2

Параметр	Обозначение комбинационной частоты				
	$m, n$	$m, n$	$m, n$	$m, n$	$m, n$
Оценка уровня гармоники по шкале, дБм					
Мощность гармоники ( $P_n$ ) (маркер), дБм					
Частота гармоники, МГц					

6. Повторите измерения амплитудного спектра комбинационных составляющих для смесителя с нижней боковой полосой. Для этого подайте на вход гетеродина (LO) сигнал с частотой 1100 МГц, которая выше частоты сигнала на величину ПЧ = 100 МГц, и повторите описанные ранее измерения.

### 3.5.2. Измерение коэффициента преобразования смесителя (потерь преобразования)

Измерьте потери преобразования в диапазоне частот 500...2500 МГц с шагом 500 МГц.



1. Отключите подачу мощности на выходах обоих генераторов нажатием кнопки **RF On/Off**. Подключите на выход смесителя (IF) фильтр НЧ для подавления высших комбинационных составляющих (рис. 3.10). Установите частоту сигнала (**RF**) 500 МГц, частоту гетеродина (**LO**) – 600 МГц. Включите выходы генераторов при помощи кнопок **RF On/Off**. Получите на экране отклик сигнала ПЧ = 100 МГц в крупном масштабе. Для этого установите метку на отклик сигнала  $f = 100$  МГц (**Поиск Пика => To Peak**) и сделайте его частоту центральной частотой полосы обзора (**Mkr => Center**). Далее установите следующие параметры АС: полоса обзора (**Span**) – 10 МГц, полоса пропускания фильтра УПЧ (**RBW**) – 30 кГц, полоса видеофильтра (**VBW**) – 3 кГц.

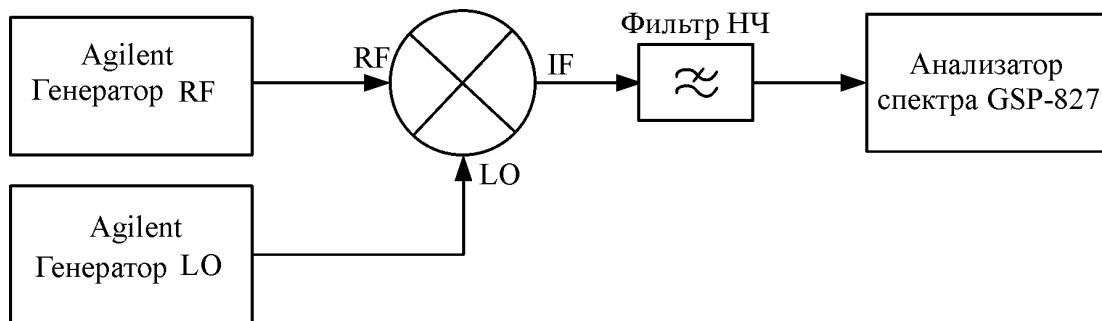


Рис. 3.10. Схема измерительной установки с ФНЧ

2. Установите маркер точно на вершину отклика ПЧ и измерьте его амплитуду. Учитывая, что уровень входного сигнала 0 дБм, уровень отклика будет численно равен потерям преобразования смесителя. Повторите измерение для частоты гетеродина 400 МГц.

Таблица 3.3

Частота сигнала, МГц	Потери преобразования, дБ	
	Верхняя боковая полоса	Нижняя боковая полоса
500		
1000		
...		

3. Проведите аналогичные измерения 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 табл. 3.3. Постройте графики зависимости потерь преобразования от частоты для режимов верхней и нижней боковых полос.

### 3.5.3. Исследование преобразования частоты модулированных сигналов

1. Установите следующие параметры АС: полоса обзора (**Span**) – 100 кГц, полоса пропускания фильтра УПЧ (**RBW**) – 3 кГц, полоса видеофильтра (**VBW**) – 3 кГц.

2. Установите на генераторе входного сигнала (RF) частоту 2500 МГц, режим амплитудной модуляции (AM) 100 %, частоту модуляции (ЧМ) 20 кГц. На генераторе гетеродина (LO) должна быть установлена частота 2400 МГц. Получите на экране спектр преобразованного AM сигнала на ПЧ 100 МГц и измерьте амплитуды его гармонических составляющих. Рассчитайте коэффициент AM преобразованного сигнала и сравните его с установленным на генераторе. Сфотографируйте спектрограмму AM сигнала.

3. Включите на генераторе режим ЧМ входного сигнала с девиацией 20 кГц и частотой модуляции 1 кГц. Измерьте ширину спектра ЧМ колебания по его огибающей. Сфотографируйте вид огибающей спектра ЧМ сигнала.

### **3.6. Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать структурную схему лабораторной установки, таблицы с результатами измерений, графики измеренных зависимостей.

### **3.7. Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте измерительные задачи, решаемые АС последовательного типа.
2. Какие особенности имеет измерение спектров в СВЧ-диапазоне?
3. Для чего в АС используют двойное или тройное преобразование частоты?
4. Поясните структурную схему последовательного АС. Укажите назначение основных блоков прибора.
5. Чем определяется форма отклика АС последовательного типа на поданный на вход гармонический сигнал?
6. Что такое рабочий диапазон частот и полоса обзора АС и чем они отличаются?
7. Как измеряются амплитуды спектральных составляющих в АС последовательного типа?
8. Как выполняется измерение частоты гармоник в АС?
9. Какие параметры АС определяет полоса пропускания УПЧ? В каких случаях ее необходимо подбирать?
10. Из каких соображений выбирают полосу пропускания видеофильтра детектора АС?

## 4. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ СВЧ

В лабораторной работе студенты знакомятся с транзисторным усилителем СВЧ-диапазона и методами измерения его параметров.

### 4.1. Общие сведения об усилителях СВЧ

Основное функциональное назначение радиочастотного усилителя – увеличение уровня (мощности) входного сигнала по возможности без искажений формы, спектрального состава и без ухудшения отношения сигнал/шум.

По назначению выделяют усилители малого, среднего и высокого уровня мощности.

По критерию относительной ширины полосы частот различают *узкополосные* усилители, для которых коэффициент перекрытия по частоте  $k_f \ll 1$ ; *октавные* с  $k_f \approx 2$  и *многооктавные* (сверхширокополосные). Обычно широкополосными считаются усилители с коэффициентом перекрытия по частоте более 20 % (рис. 4.1).

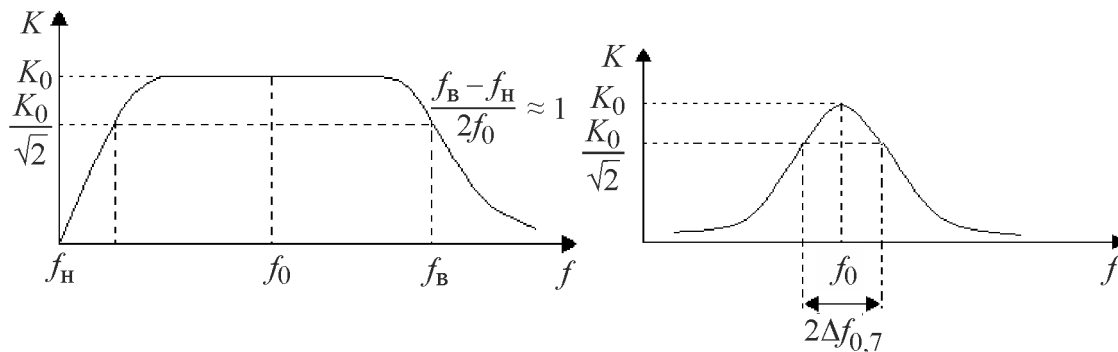


Рис. 4.1. АЧХ СВЧ-усилителей: а – широкополосный; б – узкополосный

*Основные параметры*, к которым относятся полоса частот, шумовые свойства, мощность в нагрузке, коэффициент усиления и уровень продуктов нелинейных преобразований, определяют главные свойства усилителя. Экономичные усилители отличаются высоким КПД. Каскадируемые усилители имеют одинаковые входной и выходной импедансы и могут включаться последовательно. К *малошумящим* обычно относятся усилители с коэффициентом шума менее 4...5 дБ, который в сильной степени зависит от значений верхней граничной частоты, выходной мощности и температуры окружающей среды.

Выбор активного усилительного элемента зависит от области применения, вида усиливаемых сигналов, рабочей полосы частот, требуемой мощности. В основном используют два типа СВЧ-приборов: вакуумные и полупро-

водниковые. Вакуумные приборы необходимы в областях, где требуются устойчивая работа на высоких частотах, большая выходная мощность, температурная и радиационная стойкость. Полупроводниковые приборы отличаются компактными размерами, экономичностью и надежностью, но меньшей выходной мощностью.

В настоящее время в СВЧ-технике наибольшее распространение получили транзисторные усилители на биполярных и полевых транзисторах. СВЧ-транзисторы должны иметь малые размеры рабочей области (базы или затвора), а также минимальные паразитные параметры переходов, корпуса и выводов. Германиевые биполярные транзисторы позволяют получить меньший коэффициент шума по сравнению с кремниевыми, но последние более высокочастотны. В малошумящих усилителях (МШУ) в качестве активных элементов широко применяются полевые МОП-транзисторы с затвором типа барьера Шоттки как на кремнии, так и на арсениде галлия GaAs, транзисторы с высокой подвижностью электронов (HFET – High-electron-mobility transistor), полевые транзисторы на основе гетероперехода. Транзисторные МШУ СВЧ-усилители выполняются в основном в виде монолитных интегральных схем (ИС) с навесными активными элементами как в корпусном, так и в бескорпусном исполнении. Часто вход и выход таких усилителей уже согласованы для работы с генератором и нагрузкой сопротивлением 50 Ом, поэтому они требуют минимальное количество внешних элементов.

Разработка СВЧ-усилителей на транзисторах требует решения проблем, обычно не встречающихся при разработке НЧ-усилителей. К ним относятся выбор адекватной модели транзисторов, согласование усилителя по входу и выходу, обеспечение устойчивости усилителя, защита от возможного превышения тока стока (либо коллектора) при работе на «аварийную» нагрузку (XX или КЗ). В основу расчета и анализа транзисторного МШУ СВЧ может быть положена структурная (физическая) модель, т. е. эквивалентная схема транзистора, содержащая сосредоточенные элементы и зависимые источники. Преимуществом структурной модели является высокая информативность; эквивалентная схема характеризует поведение транзистора в диапазоне частот и позволяет устанавливать связь между ее элементами и характеристиками транзистора.

В случае инженерного проектирования часто используются более простые бесструктурные матричные модели транзистора. Для определения частотной зависимости параметров транзистора необходимо проводить их измерения на разных частотах. Транзистор СВЧ как эквивалентный четырехполюсник может быть описан, к примеру, параметрами  $y$  или  $h$ , которые обычно

используются на более низких частотах. Для измерения этих параметров необходимо обеспечить режимы ХХ и КЗ, которые трудно осуществить на СВЧ из-за влияния паразитных элементов схемы. Более подходят параметры рассеяния, или  $S$ -параметры, поскольку они измеряются в линиях с согласованными нагрузками. Однако необходимо учитывать, что матрица рассеяния для транзистора будет зависеть как от положения исходной рабочей точки усилительного каскада, так и от мощности входного сигнала. С учетом последнего принято различать малосигнальные  $S$ -параметры и  $S$ -параметры для большого сигнала (LSSP – Large-Signal S-Parameters).

Транзисторный усилитель СВЧ может обеспечить заданные технические характеристики, если транзистор правильно нагружен, т. е. если сопротивления источника сигнала и нагрузки в плоскости размещения транзистора имеют вполне определенные значения. Сопротивление реальных источников и нагрузки обычно равно 50 Ом, поэтому усилитель должен включать в себя согласующие цепи (СЦ).

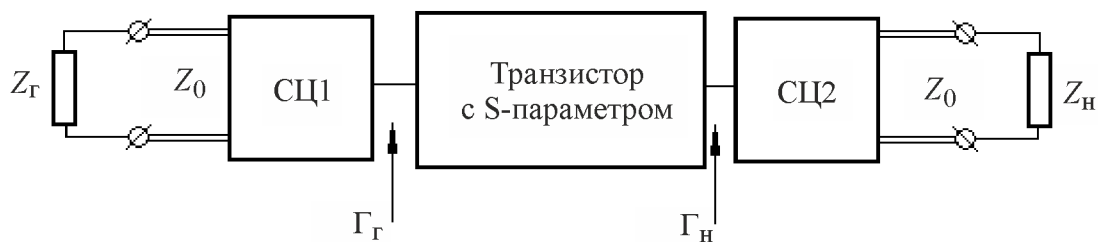


Рис. 4.2. Структурная схема однотактного усилительного каскада

Структурная схема включения транзистора в схему СВЧ-усилителя представлена на рис. 4.2. Здесь СЦ1 и СЦ2 – согласующие цепи на входе и выходе усилителя, согласовывающие импеданс на входе и выходе транзистора с генератором и нагрузкой (линиями передачи на входе и выходе);  $\Gamma_G$  и  $\Gamma_H$  – коэффициенты отражения на входе и выходе транзистора.

#### 4.2. Рабочие параметры усилителей СВЧ

*Коэффициент усиления по мощности.* Под коэффициентом усиления по мощности ( $K_y$ ) понимается число, показывающее во сколько раз мощность, отдаваемая усилителем в нагрузку ( $P_{\text{ВЫХ}}$ ), больше той, которая подается на его вход ( $P_{\text{ВХ}}$ ). При согласовании входа и выхода усилителя

$$K_y = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}} = |S_{21}|^2.$$

*Амплитудно-частотная характеристика* – это зависимость коэффициента усиления по мощности ( $K_y$ ) от частоты входного сигнала. Обычно АХЧ

имеет сложный характер, определяемый частотными свойствами активных элементов (диодов, транзисторов), качеством согласования с источником сигнала и нагрузки, электрическим режимом и др.

*Рабочая полоса частот.* Общепринятое определение нижней и верхней границ рабочей полосы частот усилителя – это частоты, на которых коэффициент усиления гармонического сигнала малой мощности  $K_y = P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}$  уменьшается на 3 дБ (по уровню 0.707) по сравнению со средним значением в полосе. Для широкополосных усилителей часто нормируется и неравномерность коэффициента усиления в рабочей полосе частот:  $\Delta K_y = K_{y \text{ max}} - K_{y \text{ min}}$  [дБ]. При усилении широкополосного сигнала возможны искажения его формы, вызванные отклонением от линейного закона ФЧХ усилителя. Количественной характеристикой таких явлений служит значение неравномерности группового запаздывания сигнала (ГВЗ) в рабочей полосе частот:

$$\text{ГВЗ}(f) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial(\text{ФЧХ})}{\partial f}.$$

*Коэффициент шума (шум-фактор).* Шумовые свойства усилителя описывает коэффициент шума ( $F_{\text{ш}}$ ), показывающий во сколько раз спектральная плотность мощности (СПМ) собственного шума усилителя превышает СПМ шума резистора с сопротивлением, равным входному сопротивлению усилителя. Обычно коэффициент шума выражают в децибелах:  $\text{NF} = 10 \lg(F_{\text{ш}})$ .

*Степень согласования с СВЧ-трактом* численно выражается модулями коэффициентов отражения по входу  $|S_{11}|$  и выходу  $|S_{22}|$  усилителя. Однако чаще для характеристики согласования применяется коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) по входу и выходу.

*Амплитудная характеристика (АХ)* – это зависимость амплитуды выходного гармонического сигнала от амплитуды входного сигнала (как правило, на частоте, соответствующей середине частотного диапазона). Масштаб по осям графика выбирается логарифмическим (рис. 4.3). В области малых значений входного сигнала эта характеристика линейна. При увеличении уровня реальная характеристика будет отклоняться от идеальной из-за проявляющейся нелинейности усилителя. В области ограничения (компрессии сигнала) АХ имеет загиб. Точка P1dB, где отклонение амплитудной характеристики устройства от линейной составляет 1 дБ, называется *точкой компрессии* (однодецибельной точкой компрессии, 1 dB compression point, P1dB) (рис. 4.3). Точку компрессии задают соответствующим уровнем входного сигнала (input

compression point P1dB in). Иногда указывают уровень выходного сигнала в этой точке (output compression point – P1dB out). Чем больше значение сигнала в точке компрессии, тем выше линейность усилителя.

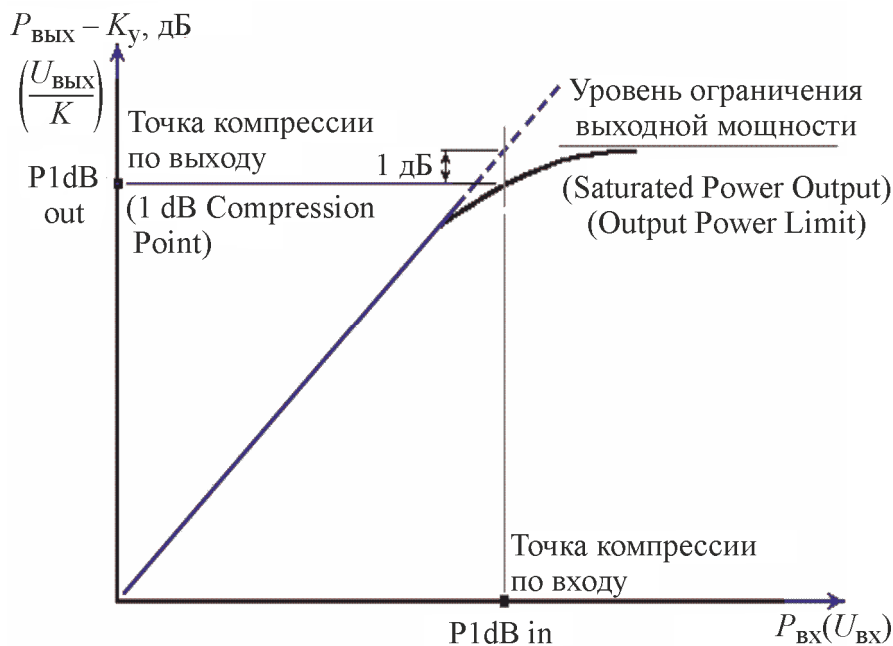


Рис. 4.3. Амплитудная характеристика СВЧ-усилителя

*Коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник).* Для оценки искажений сигнала в области больших уровней сигнала используют показатели, связанные с появлением в выходном сигнале паразитных гармонических составляющих. Так, при подаче на вход одной гармоники большого уровня на выходе появляются сигналы второй, третьей и более высоких гармоник, которые на входе усилителя отсутствуют. Нелинейные искажения СВЧ-усилителей характеризуются коэффициентом гармоник (THD – Total Harmonic Distorsion):

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1},$$

где  $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$  – среднеквадратические значения гармоник на выходе исследуемого устройства. Для СВЧ-усилителей  $K_{\Gamma}$  часто оценивают по соотношению уровней второй и первой (реже – третьей и первой) гармоник. Для устройств с небольшой нелинейностью коэффициент гармоник может быть очень мал (доли процента) и его измерение представляет достаточно сложную задачу. Поэтому для характеристики степени нелинейности таких усилителей используют *точку пересечения со второй гармоникой*. Полагая, что нелинейность можно аппроксимировать полиномом низкой степени (например, второй),

получим, что при возрастании уровня входного сигнала на  $\Delta P_1$  [дБ] уровень  $n$ -й гармоники увеличивается на  $n\Delta P_1$ , т. е. амплитуда второй гармоники растет в 2 раза быстрее, чем первой. Тогда в качестве меры нелинейности усилителя можно использовать точку на амплитудной характеристике, где она пересекается с амплитудной характеристикой второй гармоники. Такой обобщенный параметр нелинейности называют *точкой пересечения второго порядка* (SOI – Second-Order Intercept Point или SHI – Second Harmonic Intercept). Точка пересечения SHI – это точка на АЧХ тестируемого устройства, где амплитуды первой и второй гармоник на выходе усилителя имеют одинаковый уровень (рис. 4.4). Точку пересечения задают уровнем входного сигнала, выраженного в децибел-милливаттах (Input Intercept Point). Чем больше этот параметр, тем меньше нелинейность усилителя. На практике эта точка не достигается, так как усилитель уже при меньшем сигнале переходит в режим насыщения. Поэтому ее определяют путем аппроксимации АХ по первой и второй гармоникам.

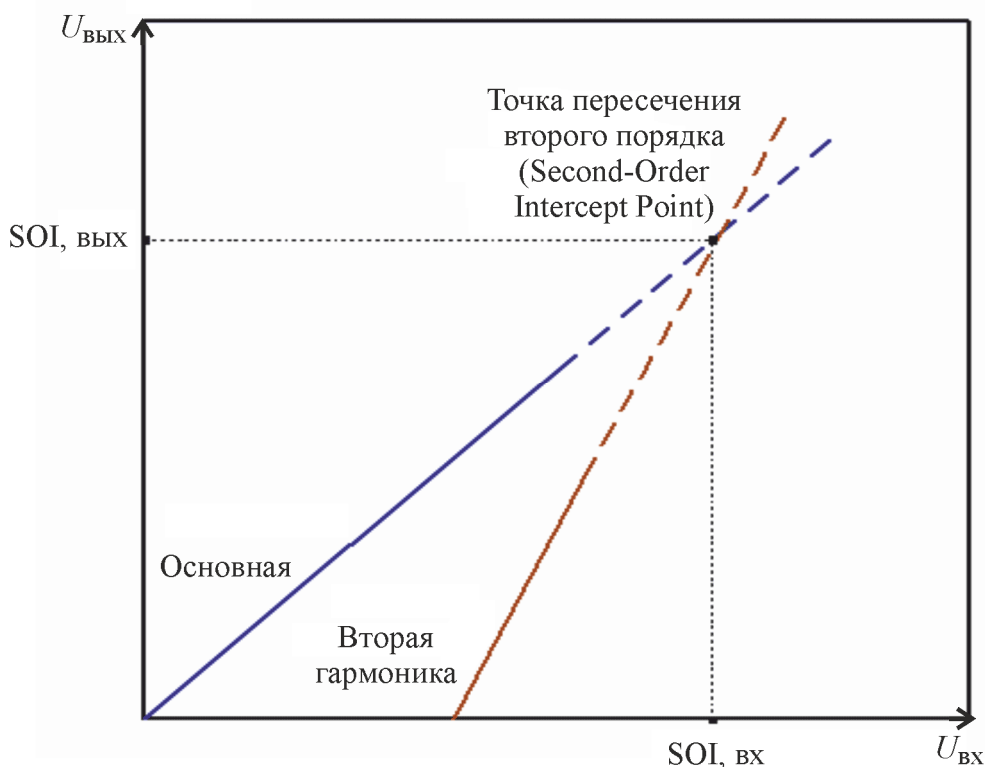


Рис. 4.4. Точка пересечения второго порядка

*Уровень интермодуляционных составляющих.* Если на вход нелинейного устройства подать два гармонических сигнала, то на выходе устройства появятся интермодуляционные паразитные компоненты комбинационных частот. Их оценивают, измеряя амплитуды паразитных гармоник при подаче на



вход двух гармонических колебаний одинакового уровня с близкими частотами  $f_1$  и  $f_2$ . Спектр выходного сигнала (рис. 4.5) включает следующие составляющие:

- основные на частотах  $f_1$  и  $f_2$ ;
- гармоники входных сигналов удвоенных частот  $2f_1$  и  $2f_2$ ;
- комбинационные компоненты второго порядка с частотами  $|f_1 \pm f_2|$ ;
- продукты нелинейных преобразований третьего порядка с частотами  $|2f_1 \pm f_2|$  и  $|2f_2 \pm f_1|$ ;
- интермодуляционные продукты более высокого порядка.

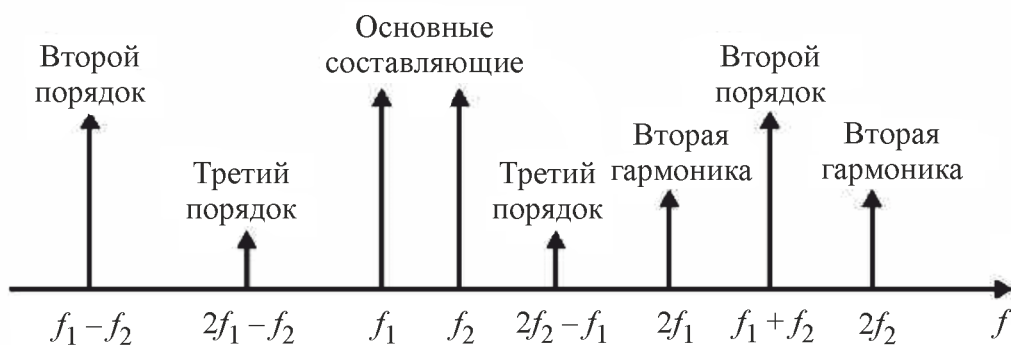


Рис. 4.5. Спектр интермодуляционных продуктов при двухчастотном входном сигнале

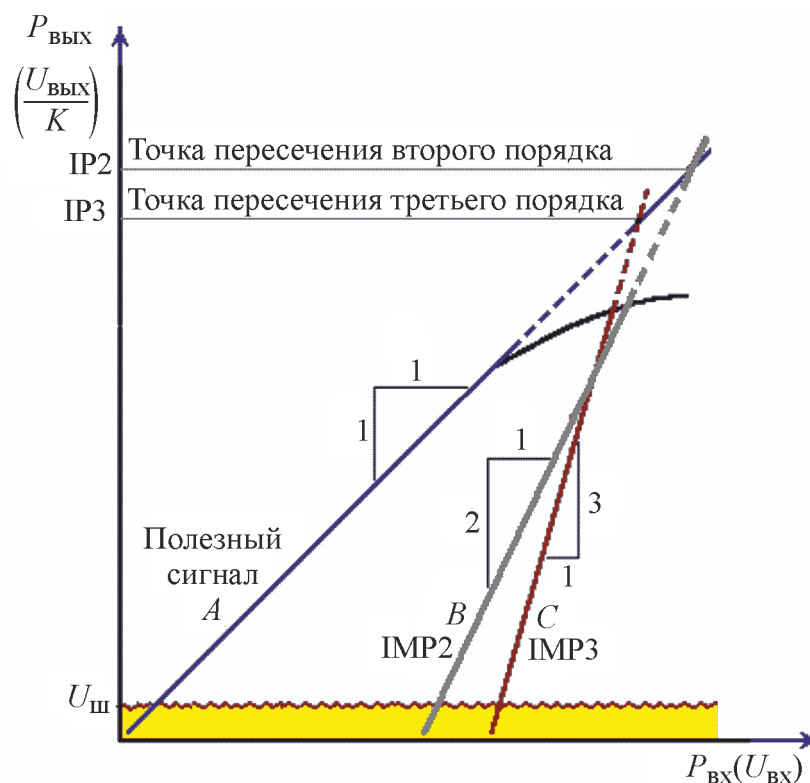


Рис. 4.6. Зависимость уровня выходных гармоник от уровня входного сигнала

Уровень нелинейных составляющих второго порядка изменяется пропорционально  $P_{\text{вх}}^2$ , уровень интермодуляционных продуктов третьего порядка – пропорционально  $P_{\text{вх}}^3$ . На рис. 4.6 наряду с АХ первой гармоники построены еще две прямые: прямая В показывает уровень интермодуляционных помех второго порядка на выходе устройства, прямая С представляет зависимость уровня интермодуляционной помехи третьего порядка от уровня входных сигналов.

График гармоники второго порядка (2nd-order gain line) пересекается с амплитудной характеристикой первой гармоники (fundamental gain line) в точке IP2 (рис. 4.6). Наклон линии гармоники третьего порядка больше, поэтому точка пересечения IP3 лежит в области меньших значений входного сигнала.

Наиболее опасными являются интермодуляционные продукты третьего порядка, так как они могут попадать в полосу пропускания усилителя. Поэтому точка пересечения прямых А и С широко используется для характеристики линейности устройств и называется *точкой пересечения третьего порядка* IP3 (3rd-order). Численно она характеризуется уровнем входного или выходного сигнала, соответствующего точке пересечения амплитудных характеристик для основного сигнала и интермодуляционной компоненты третьего порядка.

*Чувствительность усилителя* определяют мощностью входного сигнала  $P_{\text{вх min}}$ , которая в заданное число раз (например, в 2 раза, т. е. на 3 дБ) превышает мощность его собственного шума, приведенного к входу (мощность шума на выходе, деленную на коэффициент усиления  $K_y$ ):

$$\text{DR [дБ]} = 10 \lg (P_{\text{вх 1 дБ}} / P_{\text{вх min}}).$$

*Динамический диапазон* (Dynamic Range) усилителя задают отношением максимального сигнала на входе, при котором искажения не превышают предельно допустимого значения к мощности, соответствующей чувствительности усилителя. Таким образом, снизу динамический диапазон ограничен уровнем собственных шумов устройства, сверху – проявляющимися нелинейными эффектами (рис. 4.7). Другой вариант определения динамического диапазона – по допустимому значению интермодуляционных помех SFDR (Spurious-Free Dynamic Range). Нижнюю границу диапазона SFDR определяет уровень внутренних шумов устройства. Верхняя граница обусловлена уровнем сигнала на входе, при котором уровень появившихся интермодуляционных продуктов начинает превышать уровень внутренних шумов устройства.

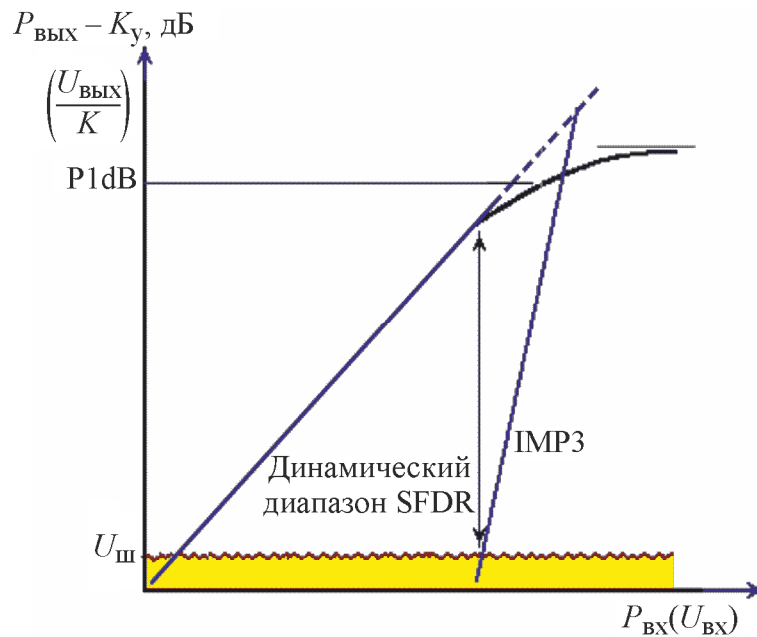


Рис. 4.7. Зависимость уровня выходных гармоник от уровня входного сигнала

*Энергопотребление усилителя и КПД.* Напряжение питания  $E_0$  и потребляемый от источника ток  $I_0$  характеризуют энергопотребление усилителя. Для оценки экономичности усилителей используют значение коэффициента полезного действия  $\text{КПД} = P_{\text{вых } 1 \text{ дБ}} / (E_0 I_0)$ .

### 4.3. Описание лабораторной установки

В лабораторной работе исследуются монолитный интегральный усилитель MMIC AT-RF3030-21 на микросхеме Mini-Circuits ERA-3. Усилитель имеет следующие паспортные параметры:

- усиление на частоте 2 ГГц – не менее 16 дБ;
- точка компрессии P1dB 12,5 дБм;
- точка пересечения третьего порядка IP3 25 дБм;
- максимальная выходная мощность 18 дБм;
- коэффициент шума 3,5 дБ;
- КСВН входа – не более 1,5, КСВН выхода – не более 1,4; входное и выходное сопротивление – 50 Ом;
- ток потребления при напряжении питания 3 В – 35 мА;
- частотный диапазон – до 8 ГГц.

Схема включения усилителя представлена на рис. 4.8. В ней предусмотрены развязывающие конденсаторы на входе и выходе, а также НЧ-фильтр для подачи напряжения питания и ограничивающий резистор. Последний позволяет использовать достаточно высокое напряжение питания 12 В (но не более 15 В).

typical biasing configuration

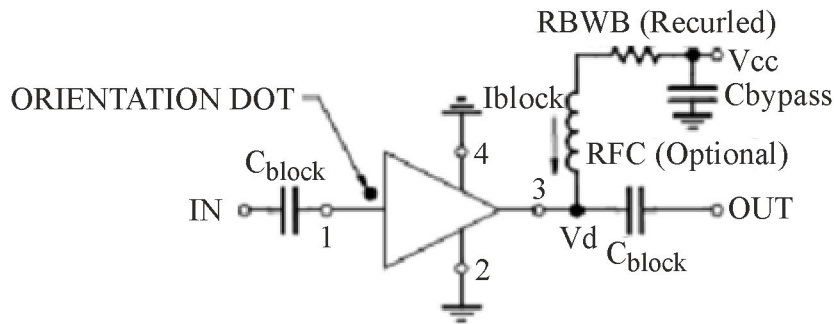


Рис. 4.8. Схема интегрального СВЧ-усилителя

Для исследования характеристик усилителя в работе используется СВЧ-спектроанализатор Agilent CSA N1996A с диапазоном рабочих частот до 6 ГГц. Прибор имеет относительно небольшие габариты, работает как от сети, так и от батарей. В приборе использован цифровой индикатор с цветным (ЖК) экраном 8,4 дюйма, 1024 × 768 пикселей. Сохранение данных и дистанционное управление прибором возможно по интерфейсам USB или LAN. Прибор имеет в составе следящий генератор от 10 МГц до 6 ГГц.

Основные параметры анализатора спектра Agilent CSA N1996A:

- диапазон рабочих частот от 100 кГц до 6 ГГц;
- полоса обзора, регулируемая в пределах всего рабочего диапазона;
- полоса пропускания УПЧ (радиофильтр) 10 Гц...200 кГц; 250, 300 кГц; 1, 3, 5 МГц;
- полоса видеофильтра, регулируемая в пределах от 10 Гц до 1 МГц.
- время анализа, регулируемое в пределах от 2 мкс до 10 с;
- входное сопротивление 50 Ом, разъем N-типа;
- максимальный уровень входного сигнала 33 дБм;
- средний уровень собственного шума (DANL) –56 дБм/Гц;
- неравномерность собственной АЧХ ±0.7 дБ;
- суммарная амплитудная погрешность ±0,5 дБ (95 %);

В качестве источника входного сигнала в работе применяется цифровой генератор СВЧ АКПП-3208, использующий метод прямого цифрового синтеза формы сигнала (DDS). Генератор обеспечивает частотный диапазон 9 кГц...2,1 ГГц (дискрет перестройки 1 МГц), большое количество режимов амплитудной, импульсной, частотной и фазовой модуляции выходного сигнала. Генератор имеет погрешность установки частоты не хуже  $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ , пределы регулировки выходной мощности (на сопротивлении нагрузки 50 Ом) от –110 до +20 дБм. Прибор имеет удобный интерфейс, сенсорный ЖК-индикатор, обеспечивает связь с внешними устройствами по интерфейсам USB и LAN.

## 4.4. Задание и указания к выполнению работы

### 4.4.1. Измерение АЧХ транзисторного усилителя СВЧ

1. Соедините коаксиальным переходом типа F-F кабели, идущие от портов **RF OUTPUT** и **RF INPUT**, отключив при этом аттенюатор с входа спектроанализатора. Включите питание спектроанализатора. Установите режим измерения АЧХ с помощью следящего генератора (**Mode => Stimulus / Response**) в частотном диапазоне 100...6000 МГц. Затем проведите калибровку (кнопка **Normalize**).

2. Включите вместо коаксиального перехода исследуемый усилитель. Для этого соедините его вход **Input** с разъемом **RF OUTPUT** анализатора, а выход **Output** – с разъемом **RF INPUT**. Подайте на усилитель напряжение питания 12 В, соблюдая полярность (черный провод – «-», красный провод – «+»). На экране появится частотная характеристика коэффициента передачи усилителя в выбранном диапазоне частот. С помощью метки (**Marker**) измерьте ее неравномерность (разницу максимального и минимального уровней в полном диапазоне частот). Сделайте снимок экрана (**Print**) в файл на USB-накопителе. Сохраните численные данные АЧХ на USB-накопителе (**Save => Measurements Result => Save Now**). Формат файла данных – текстовый. По данным измерения в программе Microsoft Excel постройте АЧХ усилителя.

### 4.4.2. Измерение АХ и точки компрессии P1dB

1. Подключите вход исследуемого усилителя к выходу СВЧ-генератора АКПП-3208. Включите генератор и установите на нем частоту 750 МГц, уровень сигнала –40 дБм. Включите сигнал на выходе **RF => ON**, модуляция сигнала отключена **MOD => Off**.

2. Подключите выход усилителя через аттенюатор ко входу спектроанализатора. Аттенюатор необходим для защиты входных цепей АС от перегрузок. Запишите значение ослабления аттенюатора в децибелах.

3. На АС включите режим спектрального анализа (**Mode => Spectrum Analyzer**). Установите частотный диапазон 500...2500 МГц, автоматический выбор полос радио- и видеофильтра (**BW => ResBW => Auto, BW => VBW => Auto**). В этом режиме прибор автоматически выберет полосы пропускания фильтров 5 МГц и время анализа порядка 500 мс.

4. Установите отсчетный уровень графика **AMPTD => RefLevel = 30 dB**, цену деления шкалы **Scale/div = 10 dB**.

5. Измерьте зависимость амплитуды первой гармоники выходного сигнала от уровня входного сигнала. Для этого установите маркер на первую гармонику (750 МГц). Меняя уровень входного сигнала в пределах  $-40 \dots +20$  дБм с шагом 5 дБ, фиксируйте уровень первой гармоники. К измеренному уровню надо добавить ослабление входного аттенюатора. Результаты сведите в таблицу.

6. По результатам измерений постройте амплитудную характеристику по первой гармонике (рис. 4.9). Определите точку, где АХ отклоняется от линейной зависимости на 1 дБ (однодецибелльная точка компрессии).

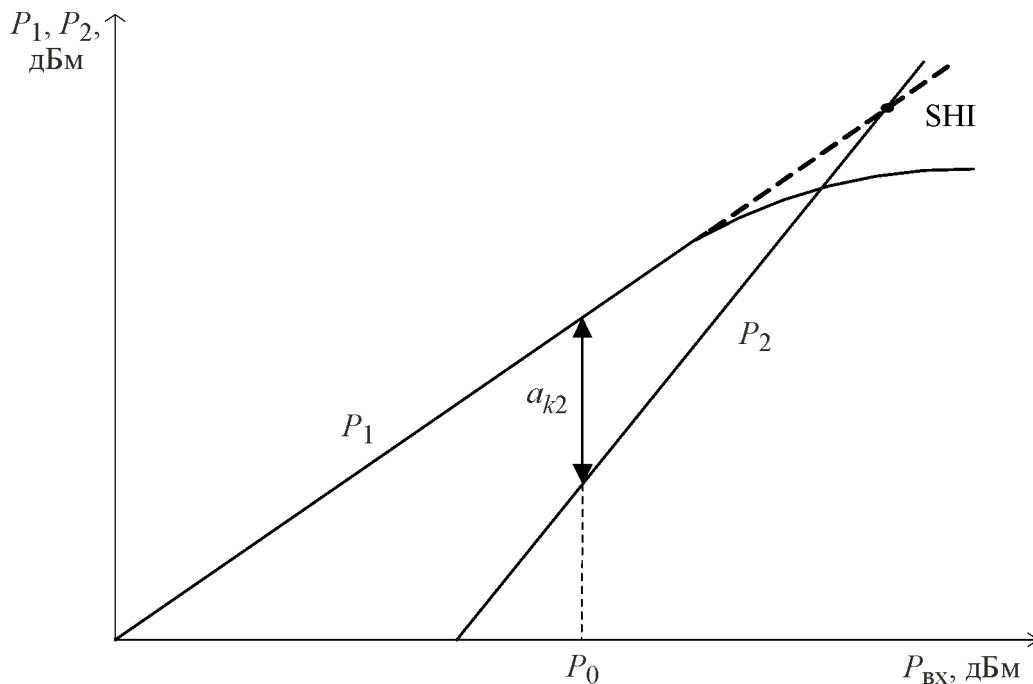


Рис. 4.9. Определение точки пересечения со второй гармоникой

7. Оцените ток потребления  $I_0$  для мощности входного сигнала, соответствующей точке компрессии  $-1$  дБ ( $P_{\text{ВЫХ}} \cdot 1\text{дБ}$ ). Для этого используйте показания стабилизатора тока блока питания  $I_0$  и напряжение питания усилителя  $E_0$ , установленное ранее.

Рассчитайте КПД усилителя [%]:  $\text{КПД} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{E_0 I_0} 100$ , где

$$P_{\text{ВЫХ}} = 10 \frac{P_{\text{ВЫХ} \cdot 1 \text{ дБ}}}{10} [\text{мВт}].$$

8. Повторите измерения амплитудной характеристики для второй гармоники (частота которой 1,5 ГГц). На графике АХ постройте зависимость уровня второй гармоники от амплитуды входного сигнала (рис. 4.9).

9. Аппроксимируйте зависимости прямыми линиями и определите точку пересечения SHI (точку пересечения второго порядка) следующим способом. Выберите уровень входного сигнала  $P_0$  в центре измеренной зависимости

$P_2(P_{вх})$  и определите разницу [дБ] между графиками второй  $P_2(P_0)$  и первой  $P_1(P_0)$  гармоник. Эту разницу называют коэффициентом подавления 2-й гармоники (harmonic suppression)  $a_{k2}$ . Тогда точка пересечения SHI найдется как сумма входного уровня и коэффициента подавления [дБм]:

$$SHI = P_0 + a_{k2} = 2P_0 - P_2(P_0).$$

10. Рассчитайте значение точки пересечения второй гармоники с первой. Чем выше это значение, тем лучше линейность усилителя.

#### 4.5. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать структурную схему лабораторной установки в режиме измерения АЧХ, а также в режиме измерения АХ и точки компрессии, таблицы с результатами измерений, графики измеренных зависимостей, расчет параметров усилителя.

#### 4.6. Контрольные вопросы

1. Какие параметры СВЧ-усилителей необходимо измерять?
2. Чем схема транзисторного СВЧ-усилителя отличается от аналогичного блока НЧ- или ВЧ-устройства?
3. Что характеризует однодецибелная точка компрессии?
4. Как измеряют точку пересечения второго порядка транзисторного усилителя СВЧ?
5. Что такое точка пересечения третьего порядка транзисторного усилителя СВЧ? Почему часто ее значение может быть важнее значения точки пересечения второго порядка?
6. Чем определяется чувствительность усилителя СВЧ? Как ее измеряют?
7. Как использовать спектроанализатор для измерения АЧХ усилителя?
8. Что такое «следающий генератор» спектроанализатора? Для чего его применяют?

### 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ СВЧ-АТТЕНЮАТОРОВ НА PIN-ДИОДАХ

В лабораторной работе студенты знакомятся с устройством и принципом действия электрически управляемых микрополосковых СВЧ-аттенюаторов (коммутаторов) с полупроводниковыми диодами. Исследуются частотные свойства и регулировочные характеристики аттенюаторов, изучаются методы измерения их параметров с помощью векторного анализатора цепей СВЧ.

## 5.1. Полупроводниковые управляющие СВЧ-диоды

Для управления СВЧ-сигналами наиболее часто используются коммутационные PIN-диоды. Они представляют собой полупроводниковый элемент, который содержит два сильно легированных слоя  $p^+$  и  $n^+$ , разделенных высокоомной областью  $i$  (база диода) собственного (нелегированного, intrinsic) полупроводника. Торцевые слои диода металлизуют и используют в качестве выводов. Переходы  $p-i$  и  $n-i$  при приложении нулевого или обратного напряжения заперты. Диод в этом случае обладает большим активным сопротивлением, определяемым собственной проводимостью полупроводникового материала. Схема замещения запертого диода представляет собой конденсатор с параллельным сопротивлением потерь (рис. 5.1).

Equivalent Circuit Model  
HSMS-381x Chip\*

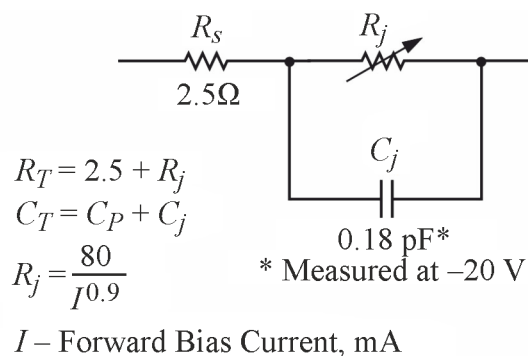


Рис. 5.1. Эквивалентная схема PIN-диода

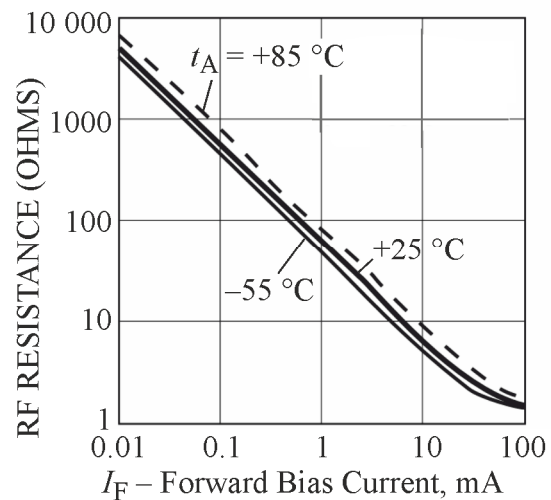


Рис. 5.2. Зависимость сопротивления одного диода сборки HSMP-3814 от тока смещения

Емкость диода практически не зависит от СВЧ-сигнала. При подаче на диод положительного напряжения смещения переходы отпираются, база диода заполняется свободными носителями, ее сопротивление уменьшается. Активное сопротивление диода зависит от тока смещения и меняется в пределах от десятков килоом до единиц ом. Таким образом, в прямом направлении PIN-диод представляет собой переменный резистор с электрическим управлением. Это свойство используют при создании электрически управляемых коммутаторов и аттенуаторов.

Используемый в лабораторном макете сдвоенный PIN-диод HSMP-3814 имеет последовательное сопротивление в открытом состоянии не более 3 Ом, емкость закрытого диода не более 0,4 пФ, минимальное сопротивление закрытого диода не менее 1500 Ом (рис. 5.1).



Зависимость активного сопротивления диода от тока смещения представлена на рис. 5.2.

В лабораторной работе исследуется двухканальный PIN-аттенюатор (коммутатор) с этим диодом. Атенюатор выполнен на диэлектрической подложке ПТФЕ. Ширина полоска линии 4 мм, что обеспечивает волновое сопротивление 50 Ом. Бескорпусный сдвоенный PIN-диод включен в разрыв полоска. Принципиальная схема аттенюатора представлена на рис. 5.3.

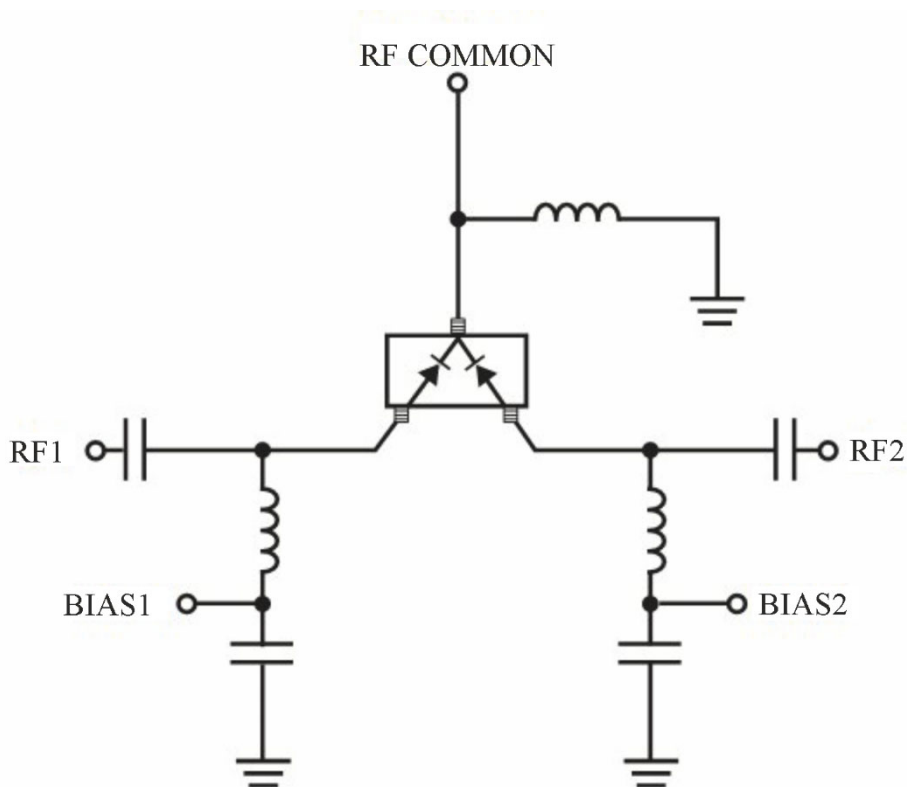


Рис. 5.3. Принципиальная схема аттенюатора

Атенюатор построен по принципу переключателя на два положения (SPDT Switch – Single Pole – Double Thru). Подбирая токи смещения диодов, можно менять их сопротивления так, чтобы разделить мощность входного сигнала в нужной пропорции. Для подачи на диоды тока смещения используются две дроссельные четвертьволновые линии, обеспечивающие разделение цепей смещения и СВЧ-сигнала, и два бескорпусных конденсатора, включенных в разрывы линии у входных разъемов. Для замыкания тока смещения на подложку использован ФНЧ, выполненный на отрезке короткозамкнутой линии с блокирующим конденсатором. Ток смещения ограничен постоянными резисторами 1 кОм (на схеме не показаны).

Схемотехническая модель аттенюатора в среде Microwave Office представлена на рис. 5.4.

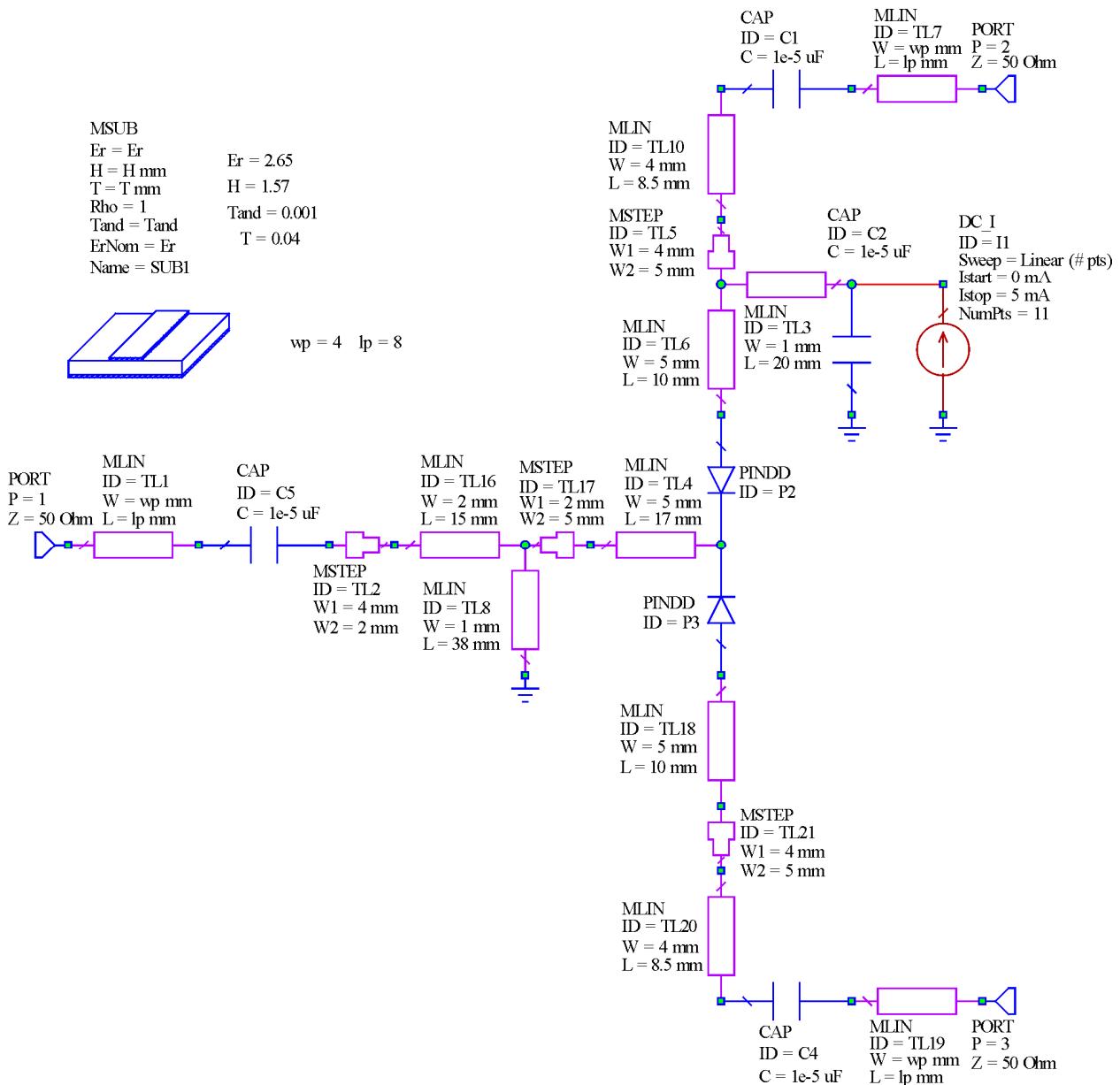


Рис. 5.4. Модель аттенюатора в среде MWO

Значение параметров PIN-диода задано моделью PINDD из библиотеки MWO. Ток управления первым диодом задается источником тока DC\_I с линейным регулированием тока, ток второго диода равен нулю (диод заперт).

## 5.2. Задание и указания к выполнению работы

В лабораторной работе исследуются частотные характеристики коэффициента передачи (ослабления) и коэффициента отражения (КСВН) аттенюатора СВЧ на полупроводниковых диодах. Для измерения используется автоматический векторный анализатор цепей СВЧ E5062A.

### 5.2.1. Подготовка установки к работе

1. Включите прибор. Установите максимальный диапазон качания частоты. Для этого необходимо:

– нажать **Display** => **Frequency**;

– ввести клавишами **Start**, **Stop** и цифровыми клавишами начальную и конечную частоту диапазона (**Start** = 300 kHz, **Stop** = 3 GHz).

2. Выберите режим вывода частотных характеристик: один активный канал измерений (**Allocate Channel x1**), два графика частотных характеристик. Для выбора количества отображаемых графиков необходимо:

– нажать **Display** => **Number of Traces**;

– нажать требуемую цифровую клавишу 2.

Для вывода графиков отдельно в двух окнах:

– нажать **Display** => нажать **Allocate Trace**;

– выбрать способ отображения графиков в двух горизонтальных окнах.

3. В первом окне надо вывести модуль коэффициента передачи в логарифмическом масштабе (**Meas** => **S21**, **Format** => **Log Mag**), во втором – КСВН (**Meas** => **S11**, **Format** => **SWR**).

4. Для правильного отображения масштаба графиков по уровню используйте автоматический подбор масштаба (**Scale** => **Autoscale All**).

5. Далее подключите соединительные кабели и откалибруйте прибор.

*Калибровка по коэффициенту отражения  $S_{11}$ .* Для ее выполнения необходимо:

– в правом меню выбрать подменю **Calibrate**;

– подключить к активному порту 1 эталонную нагрузку XX. Можно использовать открытый конец кабеля;

– указать тип калибровки **Response (Open)**;

– нажать **Done** для завершения калибровки;

– подключить КЗ к разъему кабеля активного порта 1;

– выбрать пункт **Response (Short)** и нажать **Done** для завершения калибровки коэффициента отражения.

6. Далее выполните *калибровку по коэффициенту передачи  $S_{21}$* . Этапы проведения калибровки:

– в подменю **Calibrate** необходимо выбрать пункт **Response (THRU)**;

– соединить разъемы кабелей, подключенных к портам 1 и 2 с помощью перемычки (коаксиального перехода типа F-F);

– нажать **Thru** для начала калибровки;

– нажать **Done** для завершения калибровки  $S_{21}$ .

7. После калибровки в окне **S21** должна получиться равномерная АЧХ коэффициента передачи с уровнем 0 дБ.

Прибор готов к проведению измерений.

### 5.2.2. Измерение частотных характеристик аттенюатора

1. Убедитесь, что блок питания GPS-2303 выключен. Подключите к прибору аттенюатор согласно схеме на рис. 5.5, используя согласованную нагрузку и блок питания GPS-2303 и соединительные провода. Черный провод питания соответствует минусовой (–) клемме блока питания, красный – плюсовой (+).

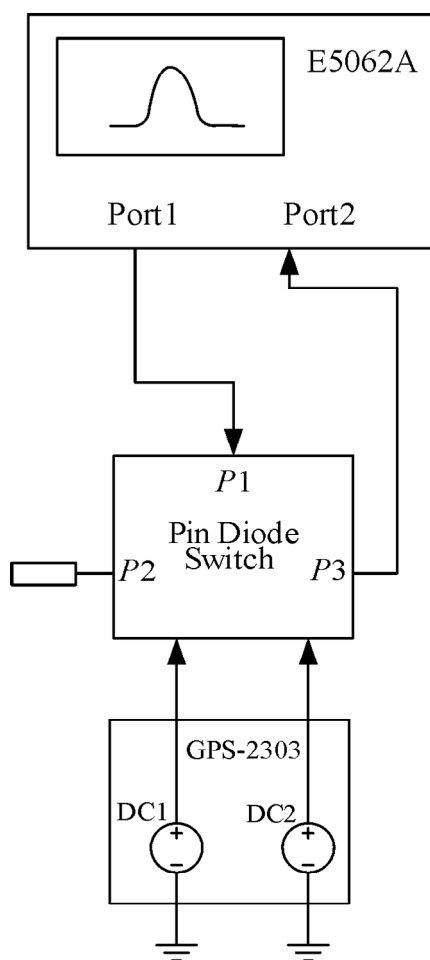


Рис. 5.5. Структурная схема лабораторной установки

2. Включите блок питания GPS-2303 (**Power ON**) и установите в одном из каналов нулевое напряжение, в другом – максимальное (30 В). Кнопки управления режимом блока питания должны быть отжаты (режим **INDEP.**). В аттенюаторе установлены ограничительные резисторы 1 кОм, поэтому ток через диоды [мА] численно совпадает с подаваемым постоянным напряжением смещения [В]. Нажмите кнопку включения выходного напряжения **OUTPUT ON**.

3. Измерьте частотные характеристики одного канала  $P3$  аттенюатора ( $|S_{21}|$ , дБ и КСВН) при нулевом токе (режим максимального ослабления) и при максимальном токе через первый диод (порядка 30 мА) – режим минимального ослабления. Сохраните данные частотных характеристик в файле типа .CSV (текстовый файл с разделителем – запятой). Формат заполненной информации по строкам: номер активного канала, номер активного графика, строка заголовка (шапка данных), строки данных (частота, данные).

Для сохранения численных данных необходимо:

- выбрать требуемый канал и график;
- нажать клавишу **Save/Recall**;
- нажать **Save Trace Data** и в диалоговом окне ввести имя файла данных и место его расположения.

4. По сохраненным численным данным постройте графики измеренных частотных зависимостей.

5. Сохраните результаты измерения в виде образов экрана (скриншотов) в графическом файле формата .BMP (256 color). Имя файла и его расположение выбирают в стандартном диалоговом окне сохранения. Ввод имени осуществляют с помощью внешней или экранной клавиатуры. Последнюю вызывают находящейся в окне диалога кнопкой **Input from the front panel**. Для создания скриншота экрана:

– выберите удобный вид изображения – с белым фоном (**Display => Invert Color => On**);

– для записи образа нажмите **System => Dump Screen Image**. В окне диалога укажите расположение и имя файла и нажмите **Save**;

– верните черный фон изображения **Display => Invert Color => Off**.

6. С помощью маркера (**Marker 1 => On**) измерьте коэффициент передачи и КСВН на фиксированной частоте 1,5 ГГц.

7. Изменяя ток через диод в пределах 0...10 мА, измерьте зависимости  $|S_{21}|$  (регулирующую характеристику) и КСВН от тока смещения.

Таблица 5.1

Частота 1,5 ГГц						
$I$ , мА	0	0,5	1,0	1,5	....	
$ S_{21} $ , дБ						
КСВН						

8. Результаты занесите в табл. 5.1.

9. Постройте графики зависимостей  $|S_{21}|$  и КСВН от тока управления.

### **5.2.3. Измерение характеристик СВЧ-аттенюатора в режиме деления мощности**

1. Установите в блоке питания параллельный режим управления каналами **PARALLEL** (обе кнопки нажаты). Поместите маркер на частотную точку 1,5 ГГц. Меняя ток в диодах одновременно, добейтесь на этой частоте минимального КСВН на входе аттенюатора. В этом режиме получаем согласованный делитель мощности пополам. Зафиксируйте коэффициент передачи и КСВН аттенюатора на этой частоте.

2. Измерьте по методике, изложенной в 5.2.2, частотные характеристики коэффициента передачи КСВН и ослабления аттенюатора для второго и третьего плеч в этом режиме. Сохраните данные частотных характеристик в файле и сделайте снимок экрана (screenshot). Постройте графики полученных частотных зависимостей по численным данным измерений.

#### **5.2.4. Моделирование СВЧ-аттенюатора в среде Microwave Office**

Используя модель аттенюатора в среде Microwave Office (файл **Switch\_PIN.emp**), рассчитайте его характеристики при нулевом смещении одного диода и вариации тока смещения другого.

1. Выберите частотный диапазон расчета в области равномерности измеренной в 5.3.2 АЧХ аттенюатора (примерно 0,5...2,5 ГГц).

2. Рассчитайте частотные зависимости  $|S_{21}|$ ,  $|S_{11}|$  и КСВН (VSWR) в этом диапазоне при вариации тока смещения диода в пределах 0...5 мА (достаточно 11 значений).

3. Выберите удобные масштабы по осям ординат и сохраните графики в файлах с расширением .JPG.

4. Постройте регулировочную характеристику аттенюатора  $|S_{21}|$  ( $I$ ) и зависимость КСВН ( $I$ ) от тока управления на частоте 1,5 ГГц.

5. Сравните их с измеренными, нанеся на графики экспериментальные значения коэффициента передачи и КСВН.

### **5.3. Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать структурную схему установки, набор скриншотов и таблиц численных данных измерений, результаты расчета характеристик аттенюатора в Microwave Office, краткие выводы.

### **5.4. Контрольные вопросы**

1. Как используют PIN-диоды в измерительном тракте СВЧ-приборов?
2. Как выполнена схема СВЧ-аттенюатора (коммутатора), исследуемого в лабораторной работе?
3. Как с помощью исследуемой в лабораторной работе схемы реализовать делитель мощности? Какие он будет иметь достоинства и недостатки?
4. Чем определяются потери в СВЧ-коммутаторах на PIN-диодах?
5. Зачем в СВЧ-аттенюаторе используют конденсаторы и микрополосковые дроссели?

## **6. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРИТОВЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ**

В лабораторной работе студенты знакомятся с устройством и принципом действия аналогового измерителя КСВ и ослабления P2-61. Изучаются методы его использования для исследования частотных характеристик ферритовых устройств СВЧ.

## 6.1. Ферритовые устройства СВЧ

Устройства СВЧ с ферритами могут быть разделены на две группы: невзаимные устройства (вентили, циркуляторы); взаимные управляющие устройства (фазовращатели, выключатели, коммутаторы, перестраиваемые фильтры и резонаторы). Изменение характеристик таких устройств осуществляется регулировкой внешнего магнитного поля подмагничивания.

Феррит – это магнитодиэлектрик с  $\varepsilon = 5 \dots 20$ ,  $\operatorname{tg} \delta = 10^{-2} \dots 10^{-3}$ . Различают поликристаллические ферриты и монокристаллы (например, железо-иттриевый гранат – ЖИГ). Основным параметр ферритов – это магнитная проницаемость  $\mu$ , которая связывает напряженность магнитного поля  $H$  и индукцию  $B$ . У ферромагнетиков из-за доменной структуры  $\mu \gg 1$ . Свойства феррита при одновременном воздействии на него постоянного и слабого СВЧ магнитного полей описываются тензором магнитной проницаемости

$$\vec{B} = \{\mu\} \vec{H} = \begin{vmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{vmatrix} \vec{H},$$

где компоненты тензора равны

$$\mu = \mu_0 \left( 1 - \frac{\omega_s \cdot \omega_0}{\omega^2 - \omega_0^2} \right) = \mu' + i\mu'', \quad k = \mu_0 \left( \frac{\omega_s \cdot \omega}{\omega^2 - \omega_0^2} \right) = k' + ik''.$$

Здесь  $\omega$  – частота СВЧ-сигнала;  $\omega_s = \gamma \mu_0 M_s$  – параметр феррита, зависящий от гиромагнитной постоянной  $\gamma = e/m = 1.76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг и намагниченности насыщения феррита  $M_s$ ;  $\omega_0 = \mu_0 \gamma H_0 \Rightarrow \omega_0 + i\mu_0 \alpha$  – частота гиромагнитного резонанса (ларморова частота), которая определяется величиной внешнего постоянного поля подмагничивания  $H_0$  (для феррита с потерями она комплексная);  $\alpha$  – коэффициент затухания. На частоте гиромагнитного резонанса  $\omega = \omega_0 = \mu_0 \gamma H_0$  резко возрастают потери (возрастает мнимая часть  $\mu''$  – резонансное поглощение – рис. 6.1). Ширина области резонанса примерно равна  $\Delta H = 2\alpha H_0$ .

Взаимодействие СВЧ-поля  $H_{\text{СВЧ}}$  с ферритом, подмагниченного постоянным магнитным полем  $\vec{H}_0 = H_0 \cdot \vec{e}_z$ , можно разбить на несколько случаев:

1. Совпадение направлений СВЧ-поля и поля подмагничивания:

$$B = \begin{bmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H_{\text{СВЧ}} \end{bmatrix} = \mu_0 \cdot H_{\text{СВЧ}} \cdot \vec{e}_z.$$

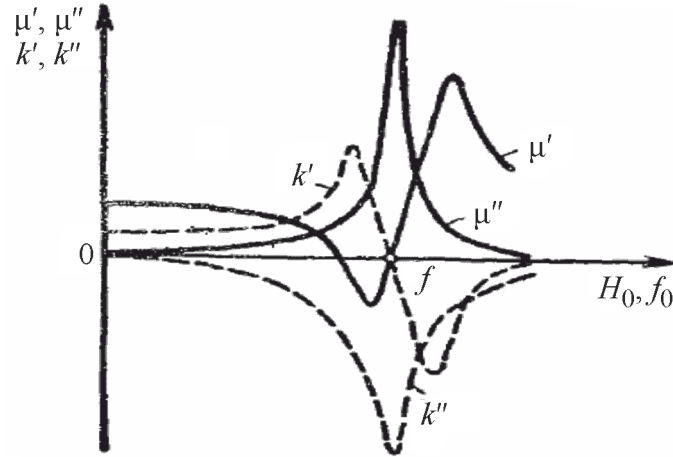


Рис. 6.1. Зависимости параметров тензора магнитной проницаемости феррита от подмагничивающего поля

Невзаимность отсутствует, структура поля не меняется.

2. Перпендикулярное расположение линейного СВЧ-поля (например, по оси  $x$ ) и поля подмагничивания:

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{\text{СВЧ}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \mu \cdot H_{\text{СВЧ}} \cdot \vec{e}_x + ik \cdot H_{\text{СВЧ}} \cdot \vec{e}_y.$$

Меняется структура поля, появляется эллиптическая поляризация вектора магнитной индукции.

3. СВЧ-поле имеет **правую** круговую поляризацию:

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{\text{СВЧ}} \\ -iH_{\text{СВЧ}} \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$= [\mu \cdot H_{\text{СВЧ}} - k \cdot H_{\text{СВЧ}}] \cdot \vec{e}_x + i[k \cdot H_{\text{СВЧ}} - \mu \cdot H_{\text{СВЧ}}] \cdot \vec{e}_y.$$

Вектор индукции имеет также правую круговую поляризацию. Эффективная магнитная проницаемость для правого направления поляризации равна

$$\mu_+ = \mu - k = \mu_0 \cdot \left( 1 - \frac{\omega_s}{\omega + \omega_0} \right).$$

4. СВЧ поле имеет **левую** круговую поляризацию:

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{\text{СВЧ}} \\ -iH_{\text{СВЧ}} \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$= [\mu \cdot H_{\text{СВЧ}} + k \cdot H_{\text{СВЧ}}] \cdot \vec{e}_x + i[k \cdot H_{\text{СВЧ}} + \mu \cdot H_{\text{СВЧ}}] \cdot \vec{e}_y.$$



Вектор индукции имеет левую круговую поляризацию. Эффективная магнитная проницаемость равна

$$\mu_- = \mu + k = \mu_0 \left( 1 + \frac{\omega_s}{\omega + \omega_0} \right).$$

Видно, что для СВЧ-поля с разным направлением поляризации феррит имеет отличающиеся свойства. Зависимости эффективных магнитных проницаемостей (вещественная и мнимая части) для разных направлений поляризации показаны на рис. 6.2.

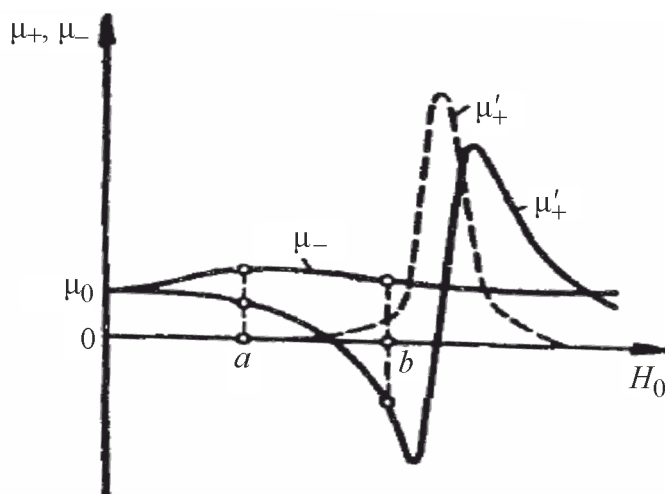


Рис. 6.2. Зависимости эффективных магнитных проницаемостей  $\mu_+$  и  $\mu_-$  от напряженности поля подмагничивания  $H_0$

На графиках можно выделить 4 области использования подмагниченного феррита для поля СВЧ круговой поляризации:

1. *Резонансная область.* Максимальное поле подмагничивания  $H_0 = H_{рез}$ . Эффективное поглощение поля *только правой* круговой поляризации (левая поляризация поглощается слабо). Это свойство используется для создания невзаимных поглотителей (вентилей).

2. *Дорезонансная область.* Здесь  $\mu_-$  больше  $\mu_+$  (сечение *a* на рис. 6.2). В этой области можно использовать разницу свойств феррита для создания невзаимных фазовращателей и циркуляторов.

3. *Дорезонансная область* – область, где  $\mu_- > 0$ ,  $\mu_+ < 0$  (сечение *b*) характерна выталкиванием поля СВЧ правой поляризации из феррита (поскольку магнитная проницаемость для этого поля отрицательна). Используется для разработки невзаимных устройств со смещением поля.

4. *Дорезонансная область с плавным регулированием*  $\mu_+$  путем изменения поля подмагничивания. Используется в ферритовых фазовращателях с плавным изменением фазы.

Возможные реализации ферритовых управляющих устройств СВЧ представлены на рис. 6.3. Наиболее важными невзаимными устройствами являются вентили и циркуляторы. Рассмотрим волноводные конструкции вентиля и циркулятора, которые исследуются в лабораторной работе.

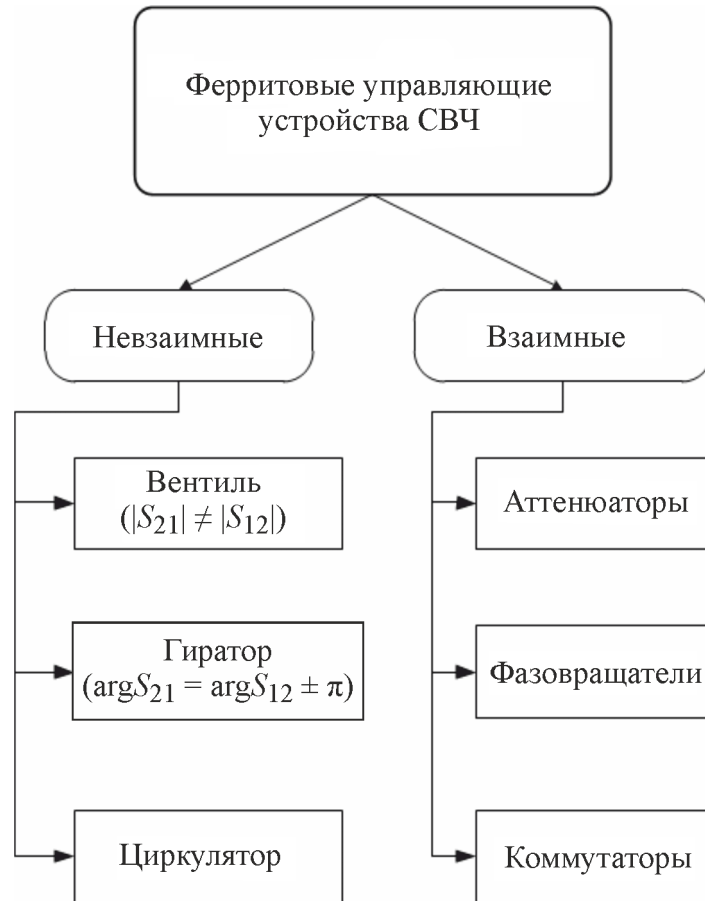


Рис. 6.3. Классификация ферритовых устройств СВЧ

Ферритовый вентиль – СВЧ-устройство с односторонним прохождением электромагнитной волны (малым затуханием волны, проходящей в одном направлении, и большим – для волны обратного направления). Нашли применение два типа волноводных вентилях:

1. *Резонансные вентили.* Принцип действия таких вентилях основан на явлении гиромангнитного резонанса. Ферритовая пластинка располагается в области круговой поляризации волны основного типа и подмагничивается до значения, соответствующего гиромангнитному резонансу на рабочей частоте (рис. 6.4). Потери энергии при резонансе оказываются малыми для одного направления распространения и большими для другого. Недостатком такого вентиля является большое значение напряженности поля подмагничивания (что ведет к увеличению размеров и массы магнита), а также плохой теплоотвод тепла от ферритовой пластины.

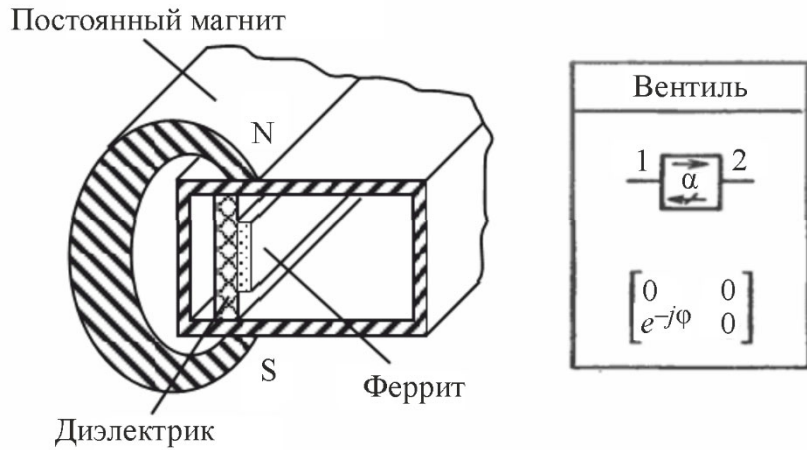


Рис. 6.4. Конструкция резонансного вентиля в прямоугольном волноводе

2. *Вентили со смещением поля.* Принцип действия основан на явлении смещения поля, существующем в линиях передачи, содержащих намагниченные ферритовые элементы. Значение подмагничивающего поля  $H_0$  выбирают таким, чтобы для обратной волны правой поляризации эффективная проницаемость была бы  $\mu_+ < 0$  и поле не проникало бы внутрь феррита. Для прямой волны  $\mu_- \approx \mu_0$ , и феррит можно рассматривать как обычный диэлектрик. Подбором толщины ферритовой пластинки и намагничивающего поля можно обеспечить распределение поля, показанное на рис. 6.5.

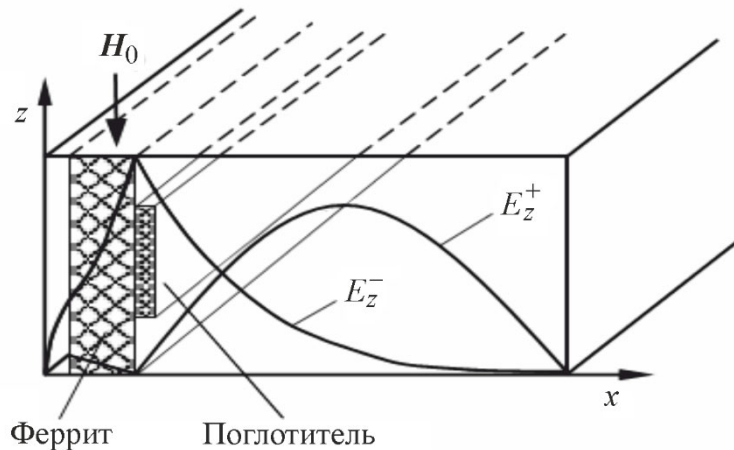


Рис. 6.5. Волноводный вентиль со смещением поля

Поле имеет минимальное значение в месте расположения пластинки. Обратная волна в этом месте имеет максимум. Если на поверхность феррита наклеить слой поглотителя, то прямая волна пройдет без ослабления, а обратная – затухнет. Такие вентили выгодно отличаются от резонансных меньшими габаритами и массой, поскольку намагничивающее поле в них в 1,5–2 раза меньше, чем в резонансных.

3. *Волноводный Y-циркулятор* представляет собой  $H$ -плоскостное Y-сочленение прямоугольных волноводов, в центре которого помещен ферритовый цилиндр (рис. 6.6).

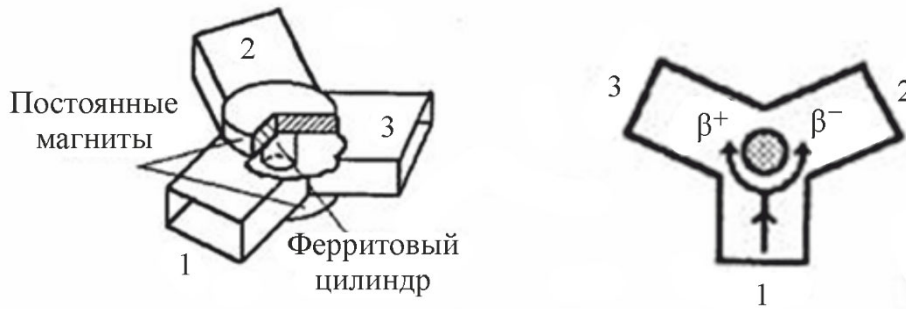


Рис. 6.6. Волноводный Y-циркулятор

Все прямоугольные волноводы, образующие плечи тройника, рассчитаны на одноволновый режим работы. Принцип действия Y-циркулятора – использование разных значений эффективной магнитной проницаемости для волн левой  $\mu_-$  и правой  $\mu_+$  поляризации в дорезонансной области (см. рис. 6.2, сечение  $a$ ). Предположим, что в плече 1 циркулятора возбуждена волна  $H_{10}$ , распространяющаяся внутрь циркулятора. Если в центре поместить ферритовый цилиндр и намагнитить его перпендикулярно плоскости сочленения, то волна из плеча 1, падая на цилиндр, возбудит в нем две волны с круговой поляризацией, векторы которых вращаются в противоположных направлениях. В результате дифракции волны на цилиндре возникают две волны, одна из которых (левая) обегает ферритовый цилиндр по часовой стрелке, а другая (правая) – против часовой стрелки. Из-за разной эффективной проницаемости ферритового вкладыша скорости волн  $\beta^-$  и  $\beta^+$  разные, поэтому в одном плече они складываются, в другом – вычитаются. Подбирая размеры цилиндра и значение подмагничивающего поля, можно добиться того, что результирующее магнитное поле будет иметь форму двух петель (рис. 6.7), одна из которых связана с возбуждающим плечом 1, а вторая – с плечом 2. Плечо 3 в этом случае будет развязано от плеч 1 и 2.

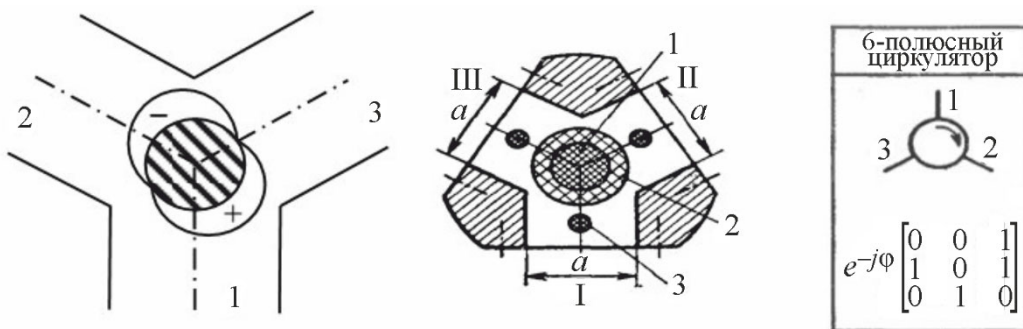


Рис. 6.7. Распределение поля в Y-циркуляторе и его матрица рассеяния

При подаче сигнала на порт 2 вся мощность будет передаваться в плечо 3, а плечо 1 будет развязано. Для улучшения согласования волноводов с ферритом на последний надевают диэлектрическое кольцо. Циркулятор часто используют как вентиль – на развязанное плечо ставят согласованную нагрузку. Преимущество такого устройства по сравнению с обычными вентилями – в хорошем теплоотводе у внешней СВЧ-нагрузки.

## 6.2. Ферритовые фильтры СВЧ-диапазона

Для фильтров СВЧ с электрической перестройкой по частоте (а также для генераторов, управляемых напряжением) часто используют ферродиэлектрические резонаторы. Ферритовый СВЧ-резонатор представляет собой сферу из железо-иттриевого граната (Yttrium-Iron-Garnet – YIG) диаметром 200...700 мкм. При размещении в поле электромагнита, создающего поле подмагничивания напряженностью  $H = 20...40$  мТл, сфера имеет свойства колебательной системы (резонатора) на частотах от 2 до 50 ГГц с эквивалентной добротностью до  $(2...3)10^3$ . Резонансная частота пропорциональна значению поля подмагничивания (и, соответственно, току в катушке подмагничивания). ЖИГ-фильтры имеют линейные, хорошо воспроизводимые перестроечные характеристики по частоте в пределах двух-трех октав. Однако для них характерна низкая скорость перестройки частоты, что объясняется высокой инерционностью схемы подмагничивания феррита.

На рис. 6.8 показан ферритовый фильтр, использующий коаксиальные порты. ЖИГ-сфера помещена в ортогональные петли связи и подмагничивается внешним полем  $H_0$ . Вдали от ферромагнитного резонанса входной и выходной порты «развязаны», так как переменное магнитное поле, создаваемое током входной рамки, вызывает в сфере малую намагниченность, линейно-поляризованную в направлении, перпендикулярном к выходной рамке. Вблизи ферромагнитного резонанса намагниченность образца велика и имеет поляризацию, близкую к круговой. Она наводит ток в выходной рамке, обеспечивая передачу энергии на выход фильтра.

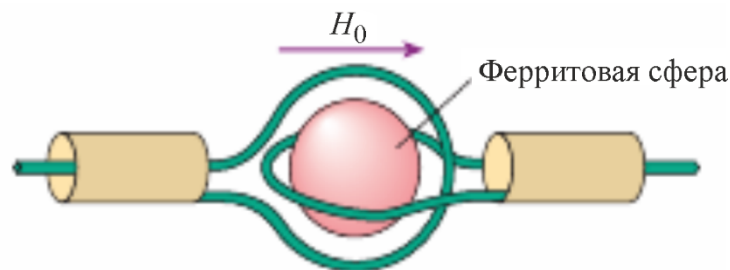


Рис. 6.8. Схема СВЧ-фильтра на ЖИГ-сфере

Такие фильтры имеют на резонансной частоте потери  $\sim 0,5 \dots 1$  дБ и полюсу пропускания порядка единиц или десятков мегагерц. Недостатком фильтра с одним ферритовым резонатором является малая крутизна спада АЧХ за пределами полосы пропускания (около  $-6$  дБ на октаву). Для получения более избирательных фильтров в одной конструкции объединяют несколько ЖИГ-сфер. При этом потери, вносимые фильтром в полосе пропускания, несколько возрастают до  $2 \dots 3$  дБ.

### 6.3. Технические данные измерителя КСВН и ослабления Р2-61

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

Технические данные прибора:

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

Прибор состоит из блока генератора (ГКЧ 61) и измерителя-индикатора Я2Р-67. В состав прибора входит комплект направленных ответвителей с детекторами СВЧ (рис. 6.9).

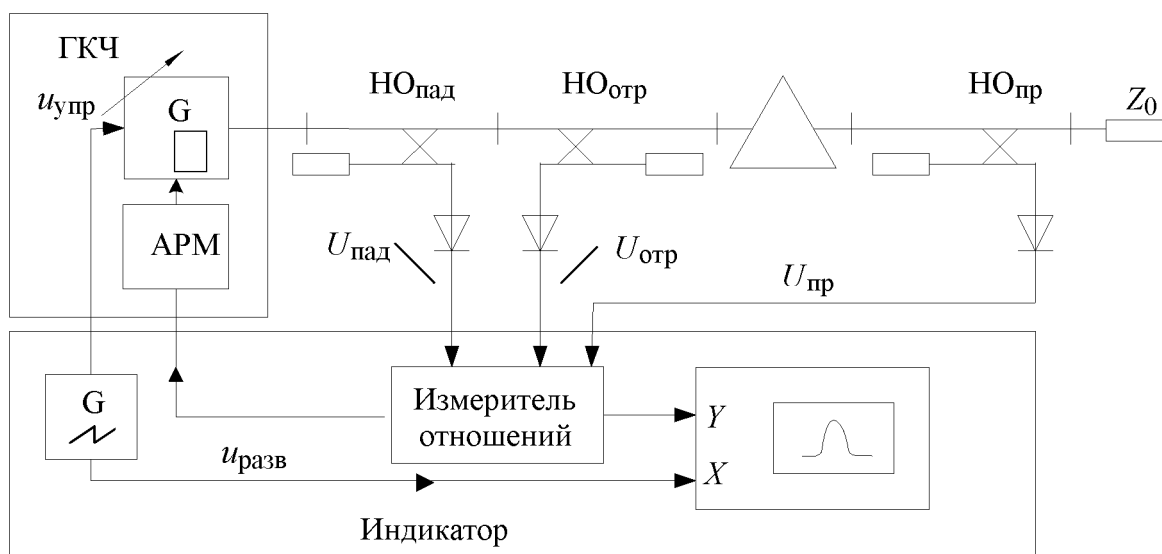


Рис. 6.9. Структурная схема панорамного измерителя Р2-61

Направленность ответвителей порядка 38 дБ, коэффициент преобразования детекторов 2 мВ/мВт (с учетом ослабления НО).

Генератор качающейся частоты обеспечивает ручную перестройку и автоматическое качание частоты в пределах установленных границ F1, F2. Главные требования к ГКЧ – широкий диапазон перестройки частоты при минимальной вариации амплитуды, отсутствие побочных колебаний и гармоник. ГКЧ построен на основе автогенератора с ЖИГ-сферой и управляется по частоте пилообразным напряжением развертки. Для стабилизации амплитуды используют систему автоматической регулировки мощности (АРМ) (рис. 6.10).

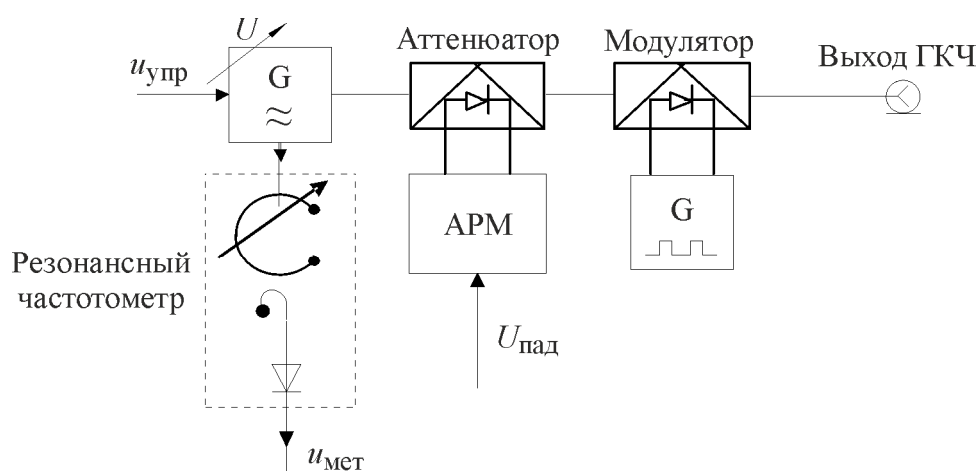


Рис. 6.10. Структурная схема генераторного блока измерителя КСВН и ослабления Р2-61

Сигнал ошибки для АРМ вырабатывается путем сравнения протектированного сигнала падающей волны ( $U_{пад}$ ) и опорного напряжения ( $U_{оп}$ ). Регулирующим элементом АРМ является электрически управляемый полупроводниковый аттенуатор, устанавливаемый на выходе генераторного блока. Регулировкой опорного напряжения АРМ можно менять выходную мощность генератора.

Контроль работы системы АРМ проводят, подавая на индикатор сигнал падающей волны. В случае правильной работы АРМ на экране индикатора должна получиться 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. Вид этой зависимости называют *собственной АЧХ* прибора.

Для работы низкочастотного индикаторного блока (усилителей и измерителей отношений) используют амплитудную модуляцию (манипуляцию) СВЧ-сигнала. При этом проще усилить выходные измерительные сигналы и фильтровать их от помех. Частоту модуляции выбирают порядка десятков килогерц, форма сигнала модуляции – прямоугольные импульсы (меандр). Модуляцию выполняют с помощью полупроводникового коммутатора, установленного в тракт выходного сигнала генератора.

Низкочастотная часть измерителя Р2-61 – это индикаторный блок (рис. 6.11). Он имеет общий измерительный канал для сигналов отраженной и проходящей волн ( $A$ ), которые подают на его вход в зависимости от измеряемого параметра. Переключение режимов измерения (отраженная – проходящая) проводят перестановкой НО в измерительном тракте. Дополнительный канал падающей волны ( $C$ ) служит для работы системы АРМ и контроля равномерности собственной АЧХ генератора.

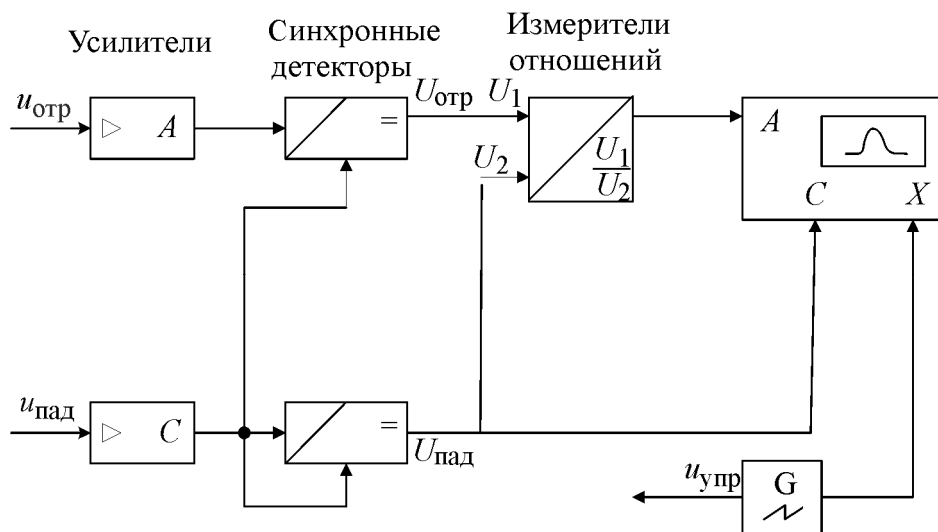


Рис. 6.11. Измерительный блок анализатора КСВН и ослабления Р2-61

На измерительный блок подают продетектированные НЧ-сигналы падающей, отраженной или проходящей волны. Эти сигналы поступают на узкополосные усилители и далее – на синхронные детекторы (СД). Последние позволяют получить постоянные напряжения, пропорциональные квадратам амплитуд (мощности) падающей  $U_{пад} \sim P_{пад}$  и отраженной/проходящей волн ( $U_{отр}$ ,  $U_{пр}$ ). В качестве опорного сигнала детектора используют усиленный сигнал падающей волны. Преимущество СД – их хорошие фильтрующие свойства и помехозащищенность.

Выделенное напряжение сигнала отраженной или прошедшей волны подают на измеритель отношения и далее на канал  $Y$  осциллографического



индикатора. На канал  $X$  подают сигнал от генератора пилообразного напряжения, который размещен также в индикаторном блоке. Длительность прямого хода пилообразного напряжения определяет время анализа частотной характеристики. В приборе используют стандартные значения 0,08, 1 и 10 с, предусмотрен режим работы от внешнего управляющего напряжения, а также ручная перестройка частоты. Последний режим 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 частотомеров.

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). Совмещая метку с интересующей точкой исследуемой характеристики, по табло отсчитывают ее частоту.

Вертикальная шкала осциллографического индикатора имеет размерность квадрата модуля коэффициента отражения/передачи. Перед измерениями шкалу калибруют по двум уровням. Первая калибровка – по нулевому уровню сигнала – обычно делается при настройке прибора. Совмещают линию развертки в отсутствие измерительного сигнала. Калибровка единичного уровня коэффициента отражения делается с короткозамыкателем, установленным на конце НО отраженной волны. Регулировкой усиления измерительного канала совмещают кривую отраженной волны с линией единичного коэффициента отражения вертикальной шкалы индикатора (отметка КСВН =  $\infty$ ). Для измерения ослабления 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  $A = 0$  дБ).

Вертикальная шкала измерителя после калибровки соответствует значениям  $|S_{11}|^2$  или  $|S_{21}|^2$ . Чтобы не пересчитывать вручную эти величины в рабочие параметры (КСВН и ослабление), используют *электронный визир*. В индикаторе предусматривают дополнительные шкалы КСВН и ослабления [дБ], связанные с линией электронного визира (горизонтальная линия на экране). Совмещая его с выбранными точками частотной характеристики, по шкалам отсчитывают результат измерения КСВН или ослабления.

## 6.4. Задание и указания к выполнению работы

### 6.4.1. Подготовка установки к работе

1. Соберите измерительный тракт прибора для исследования частотных характеристик ослабления, подключив НО проходящей волны к направленному ответвителю падающей волны согласно рис. 6.12.

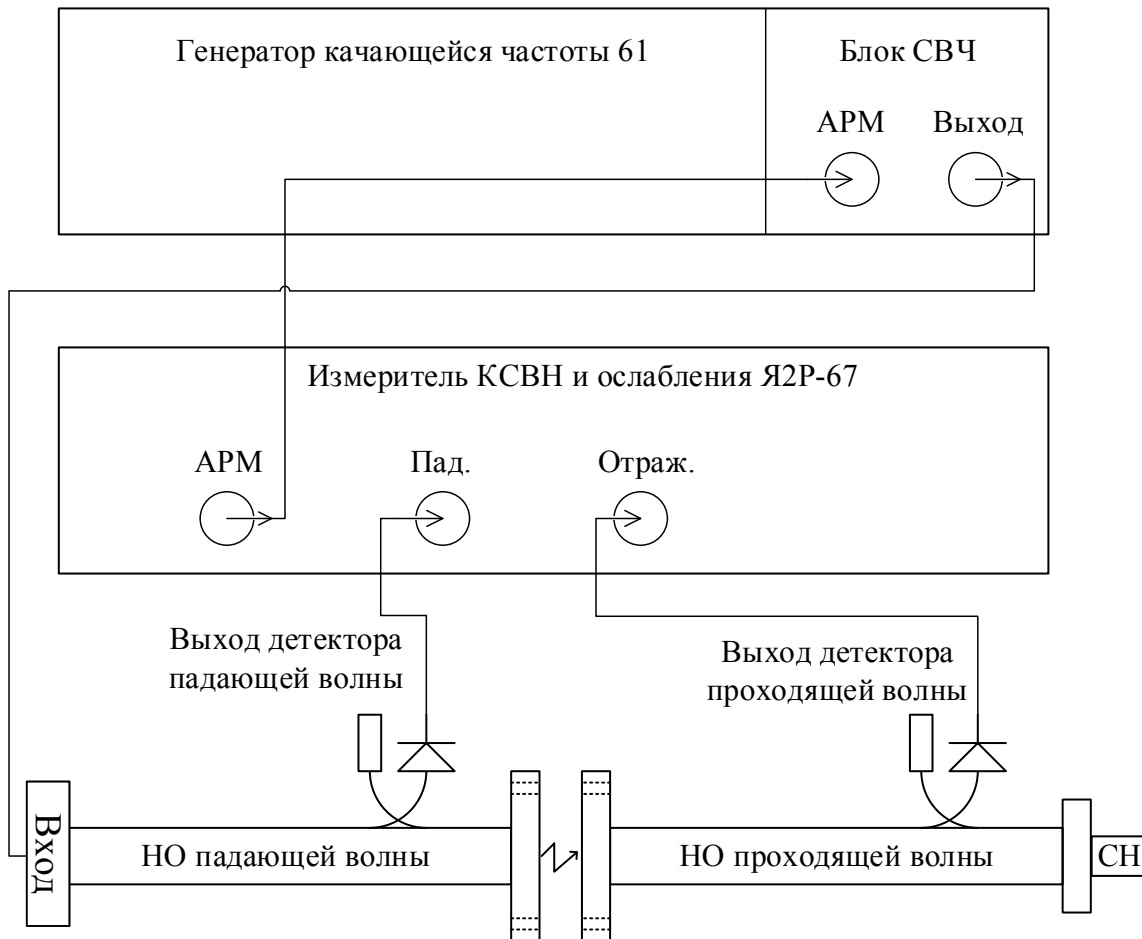


Рис. 6.12. Схема измерительной установки с измерителем КСВН и ослабления Р2-61

2. Установите исходное положение органов управления ГКЧ 61:

- АМ – ВНУТР.;
- ВР. ПЕРЕСТРОЙКИ – 0,08;
- РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ – F1 F2;
- режим отображения частоты – F<sub>1</sub>.

На блоке СВЧ:

- ВНЕШ. – АМ;
- тумблер СВЧ – включен (положение вверх).

На индикаторном блоке:

- переключатель ПРЕДЕЛЫ – в положении ПАД.;

– **КОРРЕК.**, **–10dB**, **ЛОГ.** – отжаты;

– кнопки выбора полосы индикатора – широкая полоса  $\mathcal{M}$ .

Включите тумблеры – **СЕТЬ ВКЛ** и дайте прибору прогреться.

3. Установите максимальную полосу качания частоты ручками  $F_1 F_0$  и  $F_{2,\Delta F}$ . При этом ручка  $F_1 F_0$  задает начальную частоту качания, а ручка  $F_{2,\Delta F}$  – конечную. Поставьте регулятор **УРОВЕНЬ** (на блоке СВЧ) в крайнее левое положение. Переключатель **ПРЕДЕЛЫ** (на индикаторном блоке) – в положение **ПАД.** При этом система АРМ не работает (слабый сигнал). Затем отрегулируйте этими ручками режим работы АРМ так, чтобы получить более-менее равномерный сигнал от направленного ответвителя падающей волны.

#### **6.4.2. Калибровка измерителя**

1. Калибровку прибора в режиме измерения ослабления осуществляют при непосредственном соединении НО падающей и проходящей волн. Для соединения НО используются быстросъемные трубки либо винты с М4 с накатом. Согласованная нагрузка на выходе НО проходящей волны остается подключенной на протяжении всех измерений.

2. Включите режим перестройки **F1 F2** и установите максимальную полосу качания частоты ручками  $F_1 F_0$  и  $F_{2,\Delta F}$ .

3. Поставьте переключатель **ПРЕДЕЛЫ** в положение 0 дБ. На экране будет воспроизводиться собственная АЧХ прибора в режиме измерения ослабления. Установите визир (ручкой **ОТСЧЕТ** на индикаторном блоке) на отметку 0 дБ и ручкой **КАЛИБР.** по возможности совместите АЧХ с линией визира.

4. Измерьте неравномерность собственной АЧХ с помощью электронного визира по шкале **дБ**. Истинное значение ослабления необходимо вычислять путем вычитания из значения по шкале **дБ** значения переключателя **ПРЕДЕЛЫ**, о чем свидетельствует надпись **–dB**. Для уточнения частоты отсчета можно применить режим ручной перестройки частоты. Цифровой индикатор частоты в зависимости от текущего режима отображения и перестройки может отображать одну из следующих частот  $F_0, F_1, M_1, M_2, F_{2,\Delta F}$ . Активный режим отображения подсвечивается при помощи светодиодов над кнопками выбора режима отображения. Зарисуйте или сфотографируйте вид собственной АЧХ. В дальнейшем для сохранения калибровки прибора ручки **ПАД.**, **КАЛИБР.**, **УРОВЕНЬ** трогать нельзя.

### 6.4.3. Измерение частотных характеристик ослабления вентиля и циркулятора

1. Установите в измерительный тракт волноводный вентиль в *обратном* направлении включения (стрелка на вентиле направлена в сторону генератора). Обратите внимание на взаимную ориентацию волноводов, она должна быть одинакова для всех устройств (скрещивание волноводов не допускается).

2. Включите режим перестройки **F1F2** и установите максимальную полосу качания частоты ручками **F1F0** и **F2,ΔF**. Выберите масштаб АЧХ по уровню ручкой **ПРЕДЕЛЫ** так, чтобы можно было наблюдать область максимального ослабления. Зарисуйте или сфотографируйте вид графика. Найдите частоту  $f_0$  и максимальное ослабление вентиля  $A_{\max}$ . Запишите их значения. Определите ширину рабочего диапазона частот вентиля по уровню АЧХ  $-10$  и  $-20$  дБ. Измерьте АЧХ вентиля в обратном направлении передачи по точкам (10–12 точек), для чего используйте метки генераторного блока и электронный визир индикатора. Для отображения на индикаторе частоты первой метки нужно включить режим отображения **M1**.

3. Затем измерьте АЧХ вентиля в прямом направлении передачи. Определите потери вентиля  $A_{\min}$  на центральной частоте  $f_0$  и рассчитайте вентиляльное отношение  $A_{\max} - A_{\min}$ . Результаты измерений сведите в таблицу, по данным которой постройте графики исследуемых АЧХ.

4. Аналогичным образом повторите измерения для циркулятора, включенного как вентиль между портами 1 и 2, а также в обратном направлении – между портами 2 и 1. При этом согласованная нагрузка остается подключенной к порту 3.

### 6.4.4. Исследование электрически управляемого ферритового фильтра СВЧ

1. Установите в измерительный тракт через коаксиально-волноводные переходы исследуемый ЖИГ-фильтр. Подайте от источника постоянного напряжения ток подмагничивания порядка 600 мА. Включите режим перестройки **F1F2** и максимальную полосу качания частоты. Увеличьте чувствительность индикатора (**ПРЕДЕЛЫ** до  $+15 \dots +20$  дБ) и получите на экране АЧХ фильтра. Увеличьте время перестройки частоты до 1 с (для исключения динамических искажений) и подберите ток подмагничивания, так чтобы АЧХ фильтра находилась в центре экрана. С помощью метки **M1** измерьте и запишите частоту настройки фильтра  $f_0$  при данном токе подмагничивания.

2. Оцените полосу пропускания фильтра. Для этого растяните АЧХ, регулируя начальную  $F_1$  и конечную  $F_2$  частоты перестройки прибора ручками  $F_1 F_0$  и  $F_{2,\Delta F}$ . С помощью меток  $M_1$  и  $M_2$  примерно оцените полосу фильтра по уровню  $-3$  дБ от максимума АЧХ.

3. Установите максимальную полосу качания частоты и измерьте перестроечную характеристику – зависимость частоты настройки ЖИГ-фильтра от тока управления. Изменяя ток подмагничивания с шагом  $10$  мА в одну и другую сторону от  $600$  мА, с помощью метки фиксируйте частоту максимума АЧХ. Измерения проведите в пределах всей рабочей полосы прибора. Результаты измерения сведите в таблицу, по данным которой постройте перестроечную характеристику ЖИГ-фильтра.

### **6.5. Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать структурную схему лабораторной установки, таблицы с результатами измерений, графики измеренных зависимостей.

### **6.6. Контрольные вопросы**

1. Укажите назначение панорамных измерителей параметров цепей СВЧ типа Р2.

2. Какие элементы входят в измерительный тракт СВЧ-прибора Р2-61: Как их параметры 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 такое 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 осуществляют для измерения ослабления? для измерения КСВ?

9. Как осуществляют оцифровку шкалы частот прибора Р2-61? Как устроен блок частотных меток?

10. В каком масштабе по вертикали выводится на экран график АЧХ? Как осуществляют отсчет измеренных значений ослабления и КСВ?

## 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА СВЧ, УПРАВЛЯЕМОГО НАПРЯЖЕНИЕМ

В данной лабораторной работе студенты знакомятся с генератором СВЧ, управляемым напряжением, методикой измерения его параметров с помощью СВЧ-частотомера и анализатора спектра.

### 7.1. СВЧ-генераторы, управляемые напряжением

В радиоприемниках СВЧ, в синтезаторах частоты, в различных измерительных приборах (анализаторах параметров цепей, частотомерах и пр.) широко используют генераторы сигналов, частота которых управляется внешним напряжением. Такие генераторы называют ГУН (генераторы, управляемые напряжением, или VCO – Voltage Controlled Oscillator). Они представляют собой автогенератор, содержащий параметрическую частотоподающую цепь (резонатор), рабочая частота которого меняется внешним управляющим напряжением (tuning voltage). Традиционное использование таких приборов – получение сигналов с ЧМ. Другое применение ГУН – построение генераторов со схемой фазовой подстройки частоты (ФАПЧ или PLL – Phase-Locked Loop). В таком генераторе реализовано сравнение фаз сигналов входной, выходной частоты в фазовом детекторе. Напряжение с выхода детектора через петлю отрицательной обратной связи управляет частотой генератора, фиксируя ее на заданном значении. Такие генераторы являются основой синтезаторов СВЧ-диапазона с косвенным принципом синтеза частоты.

При относительно небольшой девиации частоты перестройку резонатора осуществляют *варикапом* – полупроводниковым *варакторным диодом*, барьерная емкость которого зависит от запирающего напряжения смещения. Для ГУН, перестраиваемых в широкой полосе частот, разрабатывают специальные варакторные диоды со сверхрезким *p-n*-переходом, которые позволяют изменять емкость более чем в 4 раза, а частоту, следовательно, – более чем в 2 раза (больше октавы). Применение варикапа в транзисторных генераторах СВЧ позволяет получить достаточно быструю перестройку частоты генератора.

В измерителях АЧХ требуется большой диапазон перестройки по частоте, однако скорость перестройки не так критична. Генераторы с электрическим управлением частотой в измерителях АЧХ принято называть ГКЧ (генераторы

качающейся частоты), поскольку закон измерения частоты в таких приборах обычно периодический. В ГКЧ СВЧ-диапазона нашли широкое применение ферродиелектрические резонаторы на ЖИГ. Перестройка частоты генератора осуществляется за счет изменения частоты ферромагнитного резонанса ферритовой сферы (ЖИГ-сфера). Сферу помещают в зазор электромагнита. Ее резонансная частота линейно зависит от напряженности внешнего подмагничивающего поля, а значит, от тока в катушках электромагнита, пропорционального управляющему напряжению. Частота резонатора такого типа может меняться в широких пределах (до 10 раз).

## 7.2. Основные параметры и характеристики ГУН

*Диапазон частот перестройки ГУН* (frequency range). Относительную полосу перестройки выражают в процентах [%]:

$$BW = \frac{f_B - f_H}{f_{cp}} 100,$$

где  $f_{cp}$  – средняя частота диапазона. Для ГУН с широкой полосой перестройки удобнее использовать коэффициент перекрытия по частоте:

$$k_f = \frac{f_B}{f_H}.$$

*Модуляционная характеристика перестройки ГУН по частоте* (Frequency Tuning Characteristic) – это зависимость частоты сигнала на выходе ГУН от управляющего напряжения.

*Крутизна перестройки ГУН по частоте* (Tuning Sensitivity) [МГц/В]:

$$S_f = \frac{\Delta f}{\Delta U_{упр}}.$$

*Нелинейность перестройки по частоте* (Tuning Non-linearity, Tuning Linearity) – это отклонение от линейного закона изменения частоты ГУН. Ее характеризуют пределами изменения крутизны  $S_f$  по диапазону перестройки управляющего напряжения.

*Мощность выходного сигнала ГУН* (Output Power) количественно определяется мощностью частоты основной гармоники синусоидального сигнала на стандартной нагрузке ГУН (50 Ом) в середине рабочего интервала управляющего напряжения при номинальной температуре окружающей среды (+25 °С). Величина  $P_{вых}$  выражается в децибелах относительно мощности 1 мВт:  $P_{вых}$  [дБмВт или дБм (dBm)].

Отклонение от номинальной мощности на выходе ГУН (Output Power Variation) в диапазоне управляющих напряжений  $P_{\text{вых}}$  ( $U_{\text{упр}}$ ). Часто указывают разность между максимальным и минимальным значениями мощности на выходе ГУН в допустимом интервале изменения управляющего напряжения при номинальной нагрузке [дБ].

Зависимость выходной мощности и частоты от температуры (Output Power/ Frequency Change with Temperature).

Скорость перестройки частоты (время переходного процесса ГУН) (Tuning Speed, Response Time) – это время, которое требуется для установления выходной частоты ГУН на 90 % от ее конечного значения после начала ступенчатой перестройки частоты ГУН. Быстродействие ГУН влияет на полосу пропускания по каналу управления (tuning bandwidth). Она определяется как частота [кГц] гармонического напряжения управления ГУН, при которой девиация частоты выходного сигнала уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз.

Уход частоты ГУН (Post Tuning Drift). При скачкообразном изменении управляющего напряжения ГУН перестроится от начальной частоты  $f_1$  до конечной частоты  $f_2$ . При этом частота  $f_2$  установится до требуемого значения через некоторое время. «Уход» частоты – это отклонение частоты от конечного значения за определенное время после скачкообразного изменения напряжения перестройки (рис. 7.1).

Затягивание частоты ГУН – изменение частоты при вариациях фазы коэффициента отражения от нагрузки (frequency pulling). Определяется как разность между максимальным и минимальным значениями (peak-peak) частоты [МГц p-p] для всех значений фазы коэффициента отражения от 0 до 180° при фиксированном КСВН = 2.

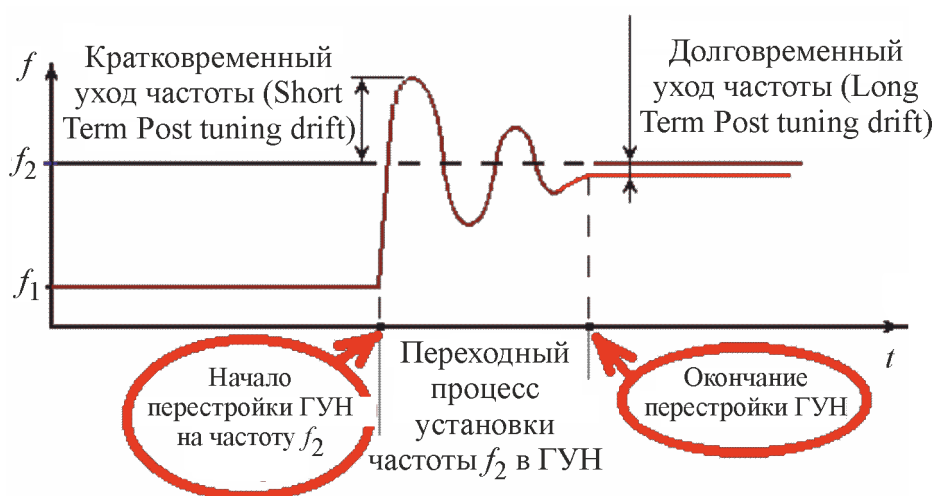


Рис. 7.1. Переходный процесс перестройки ГУН



Коэффициент гармоник выходного напряжения ГУН выражается в децибелах по отношению к несущей [дБн].

Побочные составляющие («спуры» – Spurious Responses, Non-harmonic Spurious Content), присутствующие в спектре выходного сигнала ГУН, выражают относительно первой гармоники в дБн [dBc].

Спектральная плотность мощности (СПМ) фазового шума (phase noise)  $S_{\varphi}(F)$ , где  $F = |f - f_c|$  – отстройка от несущей частоты (carrier offset). Фазовый шум оценивают спектральной плотностью одной боковой полосы (Single Side Band Phase Noise) в полосе 1 Гц по отношению к мощности несущей частоты при заданной отстройке от нее (например, 100 кГц). Фазовый шум выражают в дБн/Гц [dBc/Hz] (например, –100 дБн/Гц при отстройке 100 кГц).

### 7.3. Описание лабораторного макета

В лабораторной работе исследуется СВЧ ГУН, выполненный на гибридной интегральной схеме СВЧ V6009001 2350VCO фирмы Z-Communications ([www.zcomm.com](http://www.zcomm.com)). Паспортные параметры генератора сведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Параметр	Минимальный	Типовой	Максимальный
Диапазон частот, МГц	1250		2360
Выходная мощность, дБм	+8		+13
Уровень гармоник, дБн		–20	–12
Уровень фазового шума, дБн/Гц, при отстройке 100 кГц		–115	–110
Диапазон управляющего напряжения, В		0	20
Крутизна перестройки, МГц/В		60	
Полоса пропускания по каналу управления, кГц		300	
Смещение частоты (Pushing), $S_0 = \Delta f / \Delta U$ , МГц/В		1	1.5
Затягивание частоты (Pulling), МГц		+20	+30
Напряжение питания, В		+12	
Потребляемый ток, мА		30	

Примерная зависимость генерируемой частоты ГУН от напряжения управления для разных температур представлена на рис. 7.2.

Выходная мощность генератора заметно зависит от управляющего напряжения и, следовательно, от частоты. Примерная частотная зависимость мощности на выходе ГУН приведена на рис. 7.3.

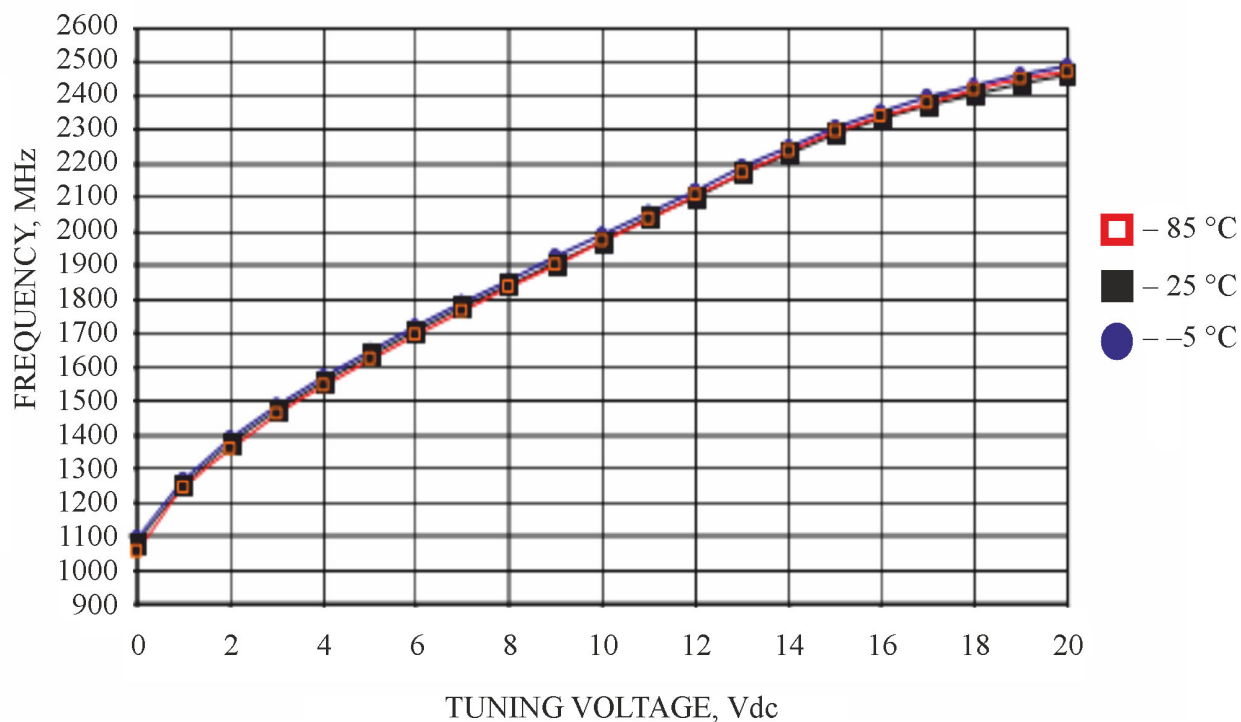


Рис. 7.2. Типовая модуляционная характеристика ГУН V6009001 2350

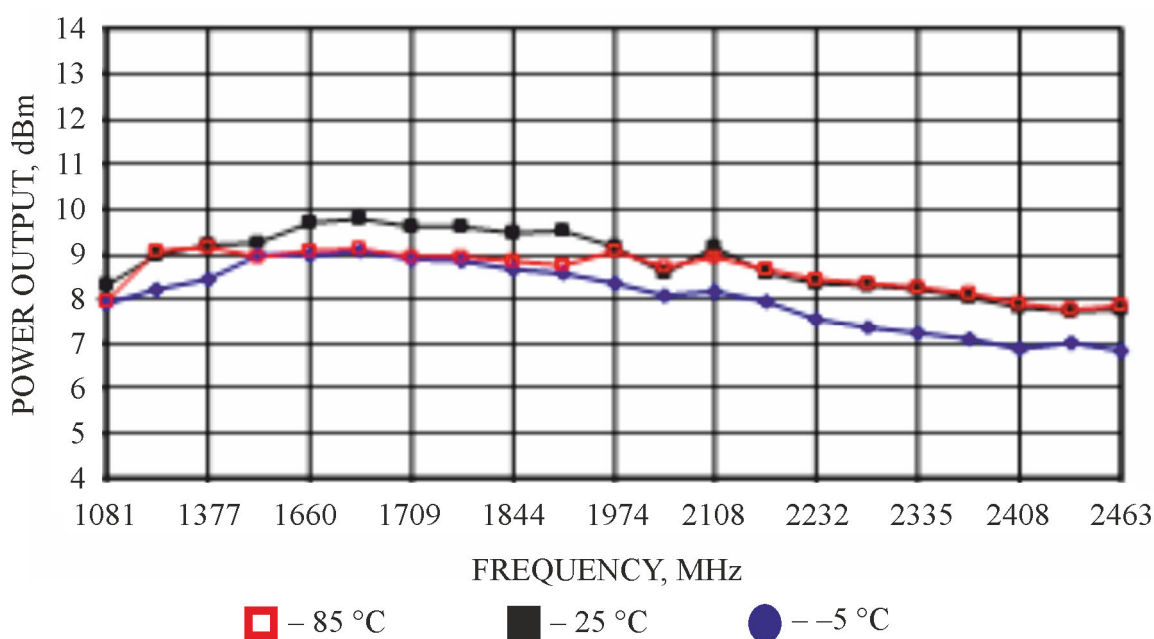


Рис. 7.3. Типовая частотная зависимость выходной мощности в диапазоне перестройки ГУН V6009001 2350

В лабораторной работе для измерения параметров генерируемого сигнала используется СВЧ-анализатор GSP-827, основные параметры которого приведены в табл. 7.2.

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.

Таблица 7.2

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

Для точного измерения частоты генератора используется СВЧ электронно-счетный частотомер (ЭСЧ) Agilent 53181A с пределом измерения частоты 225 МГц в одном канале и 3 ГГц во втором. Он позволяет проводить широкий круг измерений частоты и времени при скорости до 200 измерений в секунду. ЭСЧ обеспечивает разрешение по частоте 10 знаков в секунду. Технические характеристики частотомера представлены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Параметр	Значения
Виды измерений	Частота, отношение частот (с доп. каналом 2), период, пиковое напряжение
Анализ	Автоматические допусковые испытания, математическая обработка (масштабирование и смещение), статистика (минимум, максимум, среднее значение, среднеквадратическое отклонение)
Диапазон частот (варианты комплектации)	От 0 до 225 МГц (1,5; 3; 5 или 12,4 ГГц во втором канале)
Время счета	От 1 мс до 1000 с, автоматический выбор
Разрешение	10 знаков в секунду

Прибор измеряет частоту и период сигналов при уровне входного сигнала от 0,04 до 5 В; период сигнала от 4,44 нс до 10 с. Погрешность внутреннего кварцевого генератора прибора  $\delta_{\text{кв}} = \pm 3 \cdot 10^{-7}$  за 30 сут. Температурная нестабильность генератора менее  $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ .

Прибор Agilent 53181A обеспечивает автоматический и ручной режимы запуска, автоматическую и ручную установку оптимального времени измерения, установку требуемого количества значащих цифр. Установки режимов работы можно запомнить в 20 регистрах прибора и при необходимости вызвать их из памяти.

Микропроцессор обеспечивает ряд математических операций над результатом измерения и статистическую обработку потока данных:

- масштабирование результата (домножение на константу);
- сдвиг результата (добавление константы);
- проведение многократных измерений (количество опытов от 2 до 106) и обработку данных – расчет среднего отклонения, среднего значения, максимального и минимального результата;
- фильтрацию потока данных по предварительно введенным пределам – выводятся только те результаты, которые попадают в эти пределы.

Предусмотрена возможность работы прибора в составе измерительных систем с интерфейсом GPIB (КОП – канал общего пользования, IEEE 488).

В приборе реализован *комбинированный режим* работы частотомера.

Входной сигнал с частотой  $f_x = 1/T_x$  преобразуется в последовательность импульсов. Эти импульсы поступают на первый временной селектор, на который подается также стробимпульс с микропроцессора. Длительность его  $T_{\text{изм}}$  задает общее время измерения частоты (время усреднения). Прошедшие через селектор  $M$  импульсов подсчитываются первым счетчиком. Одновременно формируется другой стробимпульс, начало которого совпадает с первым импульсом, прошедшим через селектор. Конец стробимпульса совпадает с первым импульсом, который *не прошел* на счетчик. Таким образом, сформированный стробимпульс имеет длительность, точно равную  $MT_x$ . Его подают на вход второго временного селектора. На второй вход селектора подают счетные импульсы от образцового кварцевого генератора меток времени с периодом  $T_M$ . Прошедшие через селектор  $N$  импульсов подсчитываются вторым счетчиком. Результат измерения получается в виде отношения показаний счетчиков  $M$ ,  $N$  и метки времени, которое подсчитывается микропроцессором прибора:

$$f_x = \frac{1}{T_x} = \frac{M}{NT_M}.$$

Погрешность дискретности в данном методе зависит от минимальной длительности метки времени  $T_M$ . При этом относительная погрешность измерения составляет

$$\delta f_x = \frac{T_M}{MT_x} \approx \frac{T_M M}{MT_{\text{изм}}} = \frac{T_M}{T_{\text{изм}}}.$$

Здесь учтено, что

$$T_x = \frac{1}{f_x} = \frac{MT_x}{M} = \frac{T_{\text{изм}}}{M}.$$

Таким образом, погрешность дискретности определяется выбранным временем счета и длительностью метки времени и *не зависит* от измеряемой частоты. Эта погрешность определяет разрешающую способность частотомера. Ее указывают обычно для  $T_{\text{изм}} = 1$  с количеством значащих цифр в результате измерения. При опорной частоте 10 ГГц разрешение частотомера составляет 10 значащих цифр в результате измерения.

## 7.4. Задание и указания к выполнению лабораторной работы

### 7.4.1. Подготовка установки к работе

1. Соберите схему измерений согласно рис. 7.4.
2. Отключите красные провода питания ГУН от блока питания. Включите блок питания и установите напряжение питания  $E_{\text{пит}} = 12$  В, напряжение управления  $U_{\text{упр}} = 12$  В. Обратите внимание, что при включении блока питания его выход может быть выключен. Кроме того, у двухканального блока питания может быть несколько режимов регулировки напряжения – независимый, последовательный и параллельный. Включите независимый режим (**Indep.**).

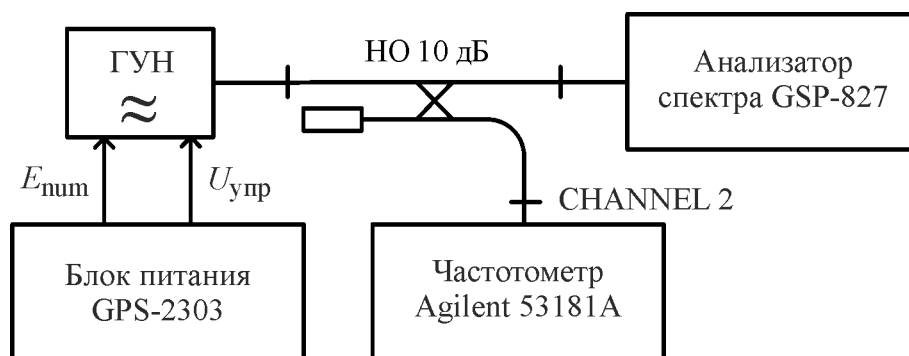


Рис. 7.4. Структурная схема лабораторной установки

3. Подключите черные провода питания ГУН к выходам «←» блока питания, а красные к «→». В случае переплюсовки ГУН выйдет из строя. Выходы **GND** остаются неподключенными.
4. Зарисуйте получившуюся схему подключения и отметьте какой из каналов блока питания подключен ко входу питания  $V_{\text{cc}}$ , а какой ко входу управления  $V_{\text{tune}}$ .
5. Включите частотомер и переведите его в режим измерения частоты по второму каналу **Freq Ch2**.
6. Включите анализатор спектра и установите диапазон качания частоты в пределах **Частота => Start** = 1,3 ГГц, **Частота => Stop** = 2,5 ГГц. На экране должен появиться отклик сигнала ГУН в области частот 1,8...2 ГГц.

7. Отрегулируйте масштаб спектрограммы по уровню **Уровень** => **Ref Level** = 20 dBm, **Scale** = 10 dB.

#### 7.4.2. Измерение модуляционной характеристики ГУН

1. На данном этапе работы измеряется зависимость частоты и мощности выходного сигнала генератора от напряжения управления (модуляции). Установите номинальное напряжение питания  $E = 12$  В. Меняя управляющее напряжение в пределах 0...18 В с шагом 1 В, измеряйте выходную мощность и частоту. Для этого установите метку АС на вершину отклика (используйте режим Поиск Пика (**To Peak**)) и *оцените* частоту и мощность сигнала ГУН по метке АС. Точное измерение частоты делайте с помощью частотомера. Запишите полученные данные в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Генератор VCO № _____			
$U_{упр}$ , В (или $E$ , В)	$f_{ген}$ , МГц (грубо)	$f_{ген}$ , МГц (точно)	$P_{ген}$ , дБм

2. По полученным данным постройте модуляционную характеристику (зависимость частоты от управляющего напряжения) и зависимость выходной мощности от частоты. Сравните их с паспортными характеристиками, приведенными ранее.

3. По графику модуляционной характеристики определите среднюю крутизну перестройки генератора.

#### 7.4.3. Измерение зависимости частоты и выходной мощности от напряжения питания ГУН

1. Измерьте зависимость параметров сигнала ГУН от питающего напряжения, которая позволяет оценить стабильность генератора.

2. Отрегулировав управляющее напряжение в пределах 0...18 В, установите частоту ГУН порядка 1,8 ГГц при номинальном напряжении питания 12 В.

3. Варьируя напряжение питания в пределах 3...15 В с шагом 1 В, измерьте частоту и мощность выходного сигнала с помощью АС и частотомера. Сведите полученные данные в табл. 7.4.

4. Постройте полученные зависимости.

5. Определите максимальное смещение частоты и максимальное изменение выходной мощности генератора при вариации напряжения питания.

#### **7.4.4. Исследование процесса затягивания частоты ГУН**

На данном этапе работы исследуется влияние несогласованной нагрузки на частоту генерации ГУН.

1. Отрегулировав управляющее напряжение в пределах 0...18 В, установите частоту ГУН порядка 1,8 ГГц при номинальном напряжении питания 12 В.
2. Подключите вместо АС образцовую подвижную нагрузку (слайдер) с КСВН = 2.
3. Меняя положение подвижной нагрузки и фиксируя частоту генерации по частотомеру, найдите точки максимальной и минимальной частоты генерации.
4. Определите разницу этих частот в мегагерцах и сравните ее с паспортным значением затягивания частоты.

#### **7.5. Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать структурную схему лабораторной установки, таблицы с результатами измерений, графики измеренных зависимостей.

#### **7.6. Контрольные вопросы**

1. Что такое ГУН СВЧ? Для каких целей их применяют в измерительной технике?
2. Поясните принцип действия частотомера, используемого в лабораторной работе? Что такое «комбинированный метод» измерения частоты и периода?
3. Чем отличаются СВЧ-частотомеры от ЭСЧ НЧ- и ВЧ-диапазона?
4. Почему в частотомере не один, а два входа для исследуемого сигнала?
5. Что такое модуляционная характеристика ГУН?
6. Для чего в анализаторах спектра СВЧ используют двойное или тройное преобразование частоты?
7. Поясните структурную схему последовательного анализатора спектра. Укажите назначение основных блоков прибора.
8. Поясните эффект затягивания частоты в ГУН.

### **8. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА СВЧ**

В лабораторной работе студенты знакомятся с комбинированным измерителем ФК2-18 и его использованием для измерения параметров диэлектриков на СВЧ. Изучается методика работы с прибором, его настройка и калибровка. В состав лабораторной установки входят также СВЧ-генератор диапа-

зона 8...12 ГГц, коаксиально-волноводные переходы и измерительная ячейка с исследуемым диэлектриком.

### 8.1. Общие вопросы измерения параметров диэлектриков

К электромагнитным параметрам диэлектриков относят диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ , где  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  – действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости вещества. На практике диэлектрик характеризуют относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = \varepsilon' / \varepsilon_0$ , где  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума. Величины  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  характеризуют энергию электрического поля, накапливаемую в диэлектрике, и потери в нем.

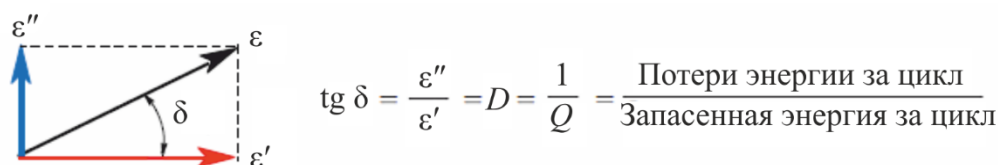


Рис. 8.1. Векторная диаграмма комплексной диэлектрической проницаемости

Если представить комплексную диэлектрическую проницаемость в виде векторной диаграммы (рис. 8.1), то суммарный вектор образует угол  $\delta$  с действительной осью  $\varepsilon'$ . Этот угол является мерой относительных потерь в материале, поэтому тангенс угла потерь  $\operatorname{tg} \delta = D = \varepsilon'' / \varepsilon'$  называют фактором потерь  $D$  или коэффициентом диссипации.

Иногда используют обратную величину – добротность или  $Q$ -фактор.

### 8.2. Методы измерения параметров диэлектриков

Методы измерения параметров диэлектриков на СВЧ можно разделить на несколько групп: резонаторные, фидерные, рефлектометрические (импульсные), методы определения параметров диэлектриков в свободном пространстве. Традиционные методы, основанные на измерении емкости и добротности конденсатора с исследуемым диэлектриком, на СВЧ используют редко из-за низкой точности.

Наиболее точными методами исследования диэлектриков с малыми потерями являются *резонаторные* методы. В них исследуемый образец диэлектрика помещают в объемный резонатор. По смещению собственной частоты и изменению добротности резонатора расчетным путем определяют диэлектрическую проницаемость и фактор потерь. Эти методы одночастотные – для исследования частотных зависимостей надо иметь набор резонаторов.



Менее точными являются методы, основанные на исследовании образца диэлектрика, размещенного в линии передачи (коаксиальной или волноводной). Эти методы в литературе получили название «*фидерные методы*» или «*волноводные методы*». Измерительная ячейка представляет собой отрезок линии передачи, в которой размещают образец исследуемого диэлектрика. В различных вариантах фидерного метода опытным путем определяют либо всю матрицу рассеяния измерительной ячейки (коэффициент отражения, коэффициент передачи), либо отдельные ее параметры (вносимый фазовый сдвиг, ослабление и пр.). Искомые значения диэлектрической проницаемости затем определяют расчетным путем. К достоинствам фидерных методов следует отнести простоту реализации, несложность изготовления измерительной ячейки, возможность применения стандартного оборудования и методик измерения. Однако они имеют невысокую точность измерения  $\operatorname{tg} \delta$  диэлектриков с малыми потерями.

Методы, в которых используются волны *в свободном пространстве*, отличаются от фидерных в основном конструкцией измерительной ячейки. Она включает две рупорные антенны и держатель диэлектрического образца. Расчетная модель такой системы более сложная, однако процедура проведения измерений и обработки опытных данных (коэффициента передачи и коэффициента отражения) принципиально не отличается от фидерного метода.

*Рефлектометрические*, или импульсные, методы основаны на зондировании образца исследуемого вещества, расположенного в коаксиальном тракте, короткими видеоимпульсами или перепадами напряжения с длительностью фронта порядка единиц или десятков пикосекунд. Фиксация временного отклика стробоскопическим осциллографом с последующей обработкой рефлектограммы позволяет рассчитать частотные зависимости диэлектрической проницаемости и потерь. Метод не требует многократных перестроек аппаратуры, легко автоматизируется. К недостаткам следует отнести невысокую точность, дороговизну и дефицитность используемых приборов.

### **8.3. Волноводный метод измерения параметров диэлектриков**

В лабораторной работе изучается волноводный (фидерный) метод измерения параметров диэлектриков, использующий измерительную ячейку в виде отрезка прямоугольного волновода. Методы, основанные на использовании прямоугольных волноводов, применяются обычно в диапазоне длин волн от 1 до 10 см. На более коротких волнах применение волноводов становится

нецелесообразным из-за чрезмерного уменьшения размеров образцов. Также нерационально применение волноводов и при более длинных волнах ( $> 10$  см) из-за непомерно больших размеров ячейки. Другая проблема волноводного метода – возникновение волн высших типов в отрезке, заполненном диэлектриком с большой проницаемостью. Это вносит серьезные погрешности в расчетную модель.

В работе используется измерительная ячейка в виде толстого фланца – отрезка волновода, длина которого примерно четверть длины волны. Комплексный коэффициент передачи ячейки определяется с помощью СВЧ-измерителя ФК2-18 в частотном диапазоне 8...12 ГГц.

#### 8.4. Математическое моделирование измерительной ячейки

Измерительная ячейка может быть представлена в виде трех отрезков прямоугольного волновода. Центральный отрезок длиной  $L$  заполнен диэлектриком, два других – воздухом. Расчетная модель отрезка линии с диэлектриком включает три каскадно включенных четырехполюсника. Это стыки линий с разными волновыми сопротивлениями, включенными навстречу друг другу, и отрезок линии передачи с диэлектриком. Граф расчетной модели представлен на рис. 8.2. Здесь  $S_{ij}$  – элементы матрицы рассеяния стыков пустого и заполненного волновода;  $e^{-i\theta} = e^{-i\gamma L}$  – коэффициент передачи отрезка волновода с диэлектриком. Он учитывает влияние электрической длины  $\theta$  образца

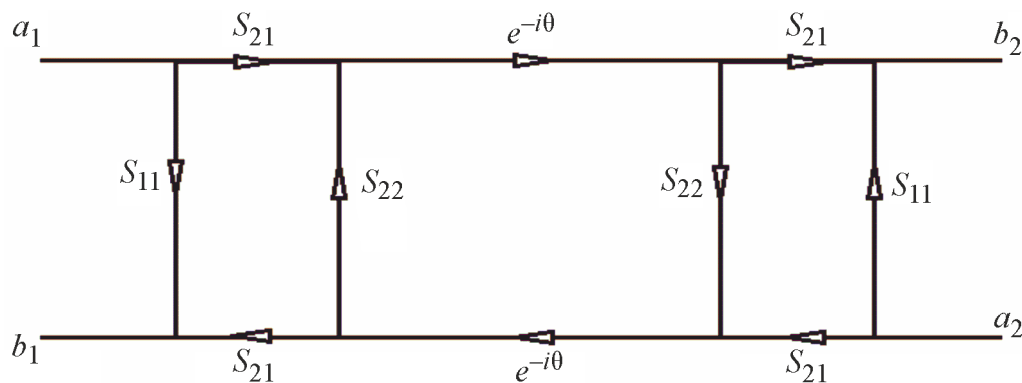


Рис. 8.2. Направленный граф исследуемого образца диэлектрика

с физической длиной  $L$  на постоянную распространения волны основного типа:

$$\gamma = \beta - i\alpha, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon' - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}, \quad \alpha = \frac{\pi\epsilon''}{\lambda \sqrt{\epsilon' - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}},$$

$$S_{11} = \frac{n-1}{n+1}, \quad S_{22} = -S_{11}, \quad S_{21} = \frac{2\sqrt{n}}{n+1}, \quad n = \frac{k}{\beta} = \frac{2\pi/\lambda}{\beta}.$$

Здесь  $\gamma$  – комплексная постоянная распространения;  $\beta$ ,  $\alpha$  – коэффициент фазы и постоянная затухания волны основного типа в диэлектрике с потерями;  $k$  – постоянная распространения волны в свободном пространстве.

С помощью правила некасающегося контура получим уравнение для коэффициента передачи измерительной ячейки:

$$\hat{S}_{21} = \frac{S_{21}^2 e^{-i\theta}}{1 - S_{22}^2 e^{-2i\theta}}.$$

Для обработки опытных данных используется программный калькулятор (файл Eps.mcd), реализованный в пакете Mathcad. Калькулятор решает следующую задачу: по измеренному ослаблению  $\Delta A$  и фазе коэффициента передачи  $\Delta\phi$  при помещении диэлектрика в ячейку он позволяет найти диэлектрическую проницаемость исследуемого материала и его фактор потерь. Входными данными являются экспериментально полученные значения модуля и аргумента коэффициента передачи, сечение волновода, длина исследуемого образца, частота, на которой был проведен эксперимент. Выходным параметром является комплексная диэлектрическая проницаемость (рис. 8.3).

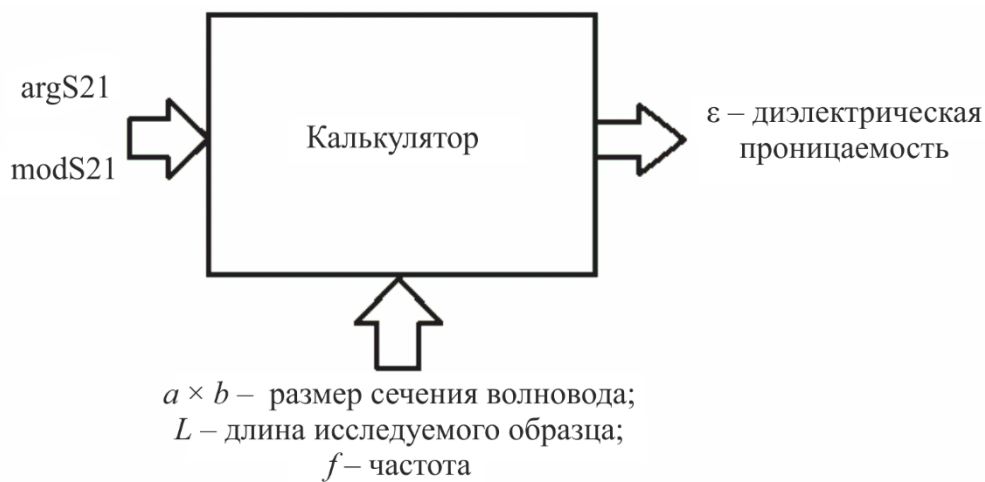


Рис. 8.3. Общий принцип работы калькулятора

Для решения этой задачи используются функции решения нелинейных уравнений Find и Minerr. В случае диэлектриков с малыми потерями удобно использовать двухступенчатый алгоритм поиска решения. На первом шаге вводят экспериментально полученные вариации фазового сдвига и ослабления, а также примерное значение диэлектрической проницаемости и нулевой

фактор потерь (начальная точка поиска). Далее осуществляется поиск значения диэлектрической проницаемости. На втором шаге реализован поиск минимума нелинейного уравнения по двум координатам с помощью функции Minerr. В качестве приближения используется значение диэлектрической проницаемости, полученное на предыдущем этапе. Успешность поиска результата во многом зависит от удачного начального приближения. Для диэлектриков с большими потерями первый шаг может не давать разумного приближения, поэтому его можно пропустить.

В качестве проверки полученных решений используется программа моделирования измерительной ячейки в пакете Microwave Office (MWO 10). Для начала выбираем три одинаковых отрезка волновода (модель RWG\_TE<sub>mn</sub>) и соединяем их между собой. В настройках каждого элемента указываем необходимое сечение волновода (23×10 мм) и тип волны, проходящей в системе (TE<sub>10</sub>).

В центральном элементе задаем полученную ранее в калькуляторе диэлектрическую проницаемость и длину образца. Остальные волноводные части представляем как отрезки волновода, заполненные воздухом с длиной, равной нулю. Для подключения портов используем стандартные идеальные модели коаксиально-волноводных переходов COAXRWG\_TE10 с портами по 50 Ом (рис. 8.4).

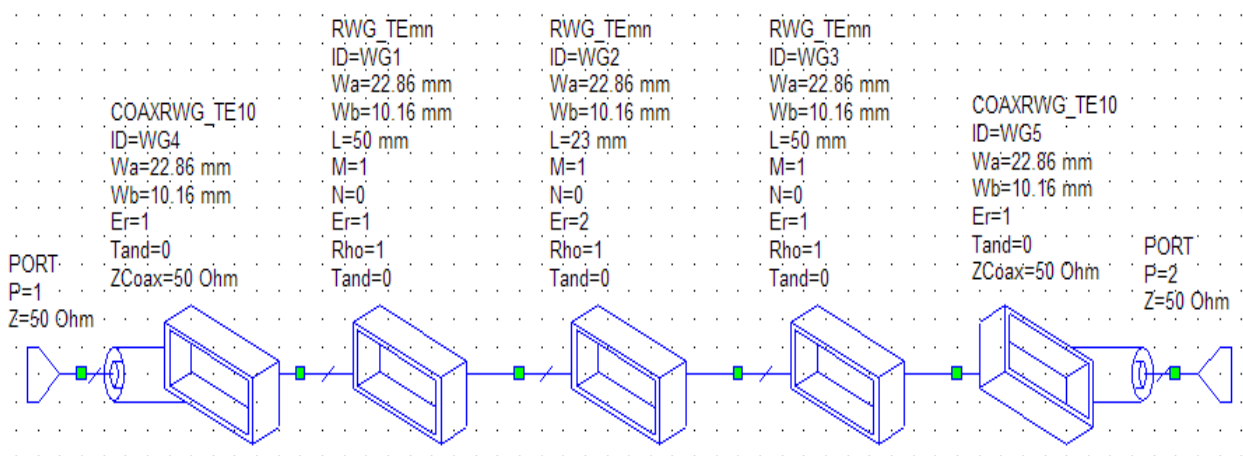


Рис. 8.4. AWR – модель измерительной волноводной ячейки

В результате моделирования получаем зависимости аргумента и модуля коэффициента передачи от частоты (рис. 8.5), которые сравниваем с экспериментальными данными на частотах измерения.

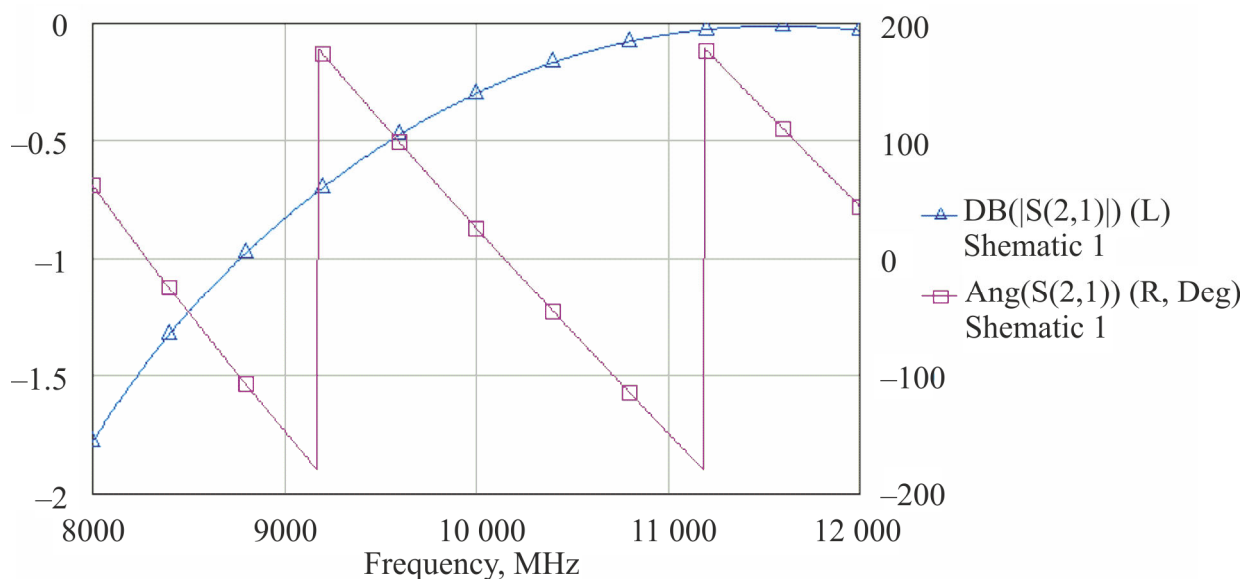


Рис. 8.5. Результаты расчета коэффициента передачи волноводной ячейки

Данная модель позволяет сравнить расчеты в Mathcad-калькуляторе с более точным решением MW Office.

### 8.5. Технические характеристики амплифазометра ФК2-18

Комбинированный измеритель разности фаз ФК2-18 является многофункциональным прибором для измерения модуля и фазы комплексных коэффициентов передачи СВЧ-устройств на фиксированных частотах. Краткие технические данные прибора:

- диапазон рабочих частот – 110 МГц...12 ГГц;
- пределы измерения разности фаз  $0... \pm 180^\circ$  с разбивкой на поддиапазоны  $\pm 6, \pm 18, \pm 60, \pm 180^\circ$ ;
- пределы измерения модуля коэффициента передачи (ослабления) 60 дБ при мощности входного сигнала  $10^{-3} \dots 10^{-11}$  Вт;
- основная погрешность измерения разности фаз  $[...^\circ]$  не превышает  $\pm(1 + 0,036\varphi_K + 0,075A_x)$ , где  $\varphi_K$  – конечное значение шкалы установленного поддиапазона;  $A_x$  – ослабление исследуемого устройства;
- основная погрешность измерения ослабления [дБ] не более  $\pm(0,5 + 0,02A_K + 0,03A_x)$ , где  $A_K$  – предел шкалы измерения ослабления;  $A_x$  – измеряемое значение ослабления;
- предел качания частоты в панорамном 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  $\pm 5^\circ$  на частотах 4...12,05 ГГц.

Измеритель разности фаз ФК2-18 представляет собой двухканальный супергетеродинный приемник-преобразователь СВЧ с измерительным блоком. Принцип работы прибора – перенос сигнала СВЧ на более низкие частоты и определение его параметров низкочастотным измерительным блоком (НЧ-фазометром). Структурная схема СВЧ-тракта прибора представлена на рис. 8.6.

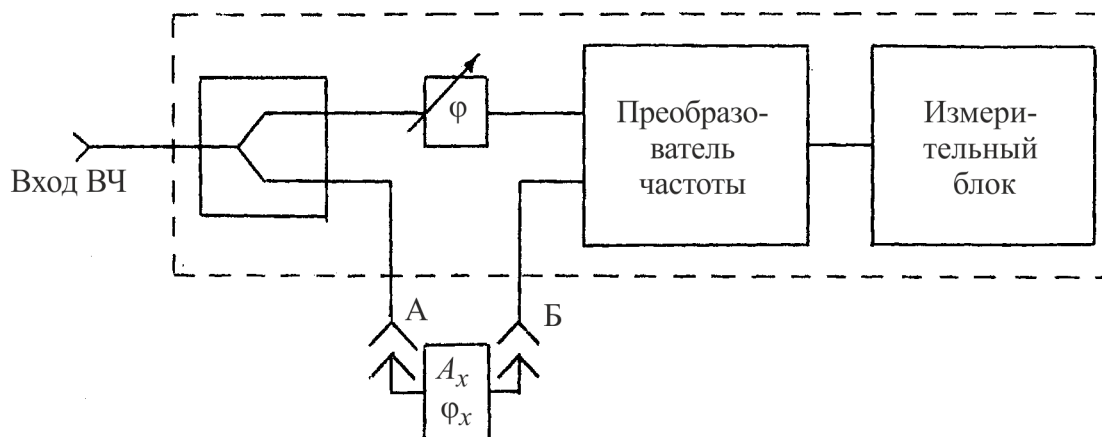


Рис. 8.6. Структурная схема измерителя разности фаз ФК2-18

Сигнал, подаваемый на вход ВЧ-прибора от внешнего генератора, делят пополам 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 U-образную коаксиальную линию переменной длины (тромбонный ФВ). Градуировка ФВ выполнена в единицах длины  $L_2$  [см]. При этом истинная длина линии в 2 раза больше значения цифрового индикатора  $L_2$ , так как отображается длина только одного плеча тромбонного ФВ. Таким образом длина линии  $L = 2 \cdot L_2$ . Величина  $L$  позволяет вычислить вносимый фазовращателем сдвиг фазы на любой частоте  $f$ :

$$\Delta\varphi = kL = 360^\circ Lf(3 \cdot 10^{-8}).$$

Структурная схема преобразователя частоты представлена на рис. 8.7.

Опорный и измерительный сигналы подают на два смесителя стробоскопического типа. Такой смеситель представляет собой электронный быстродействующий ключ, управляемый коротким стробимпульсом. Импульс вырабатывают путем дифференцирования перепада напряжения с малой ( $< 0,1$  нс) длительностью нарастания. Этот перепад формируют подачей управляющего импульса на СВЧ-диод с накоплением заряда.

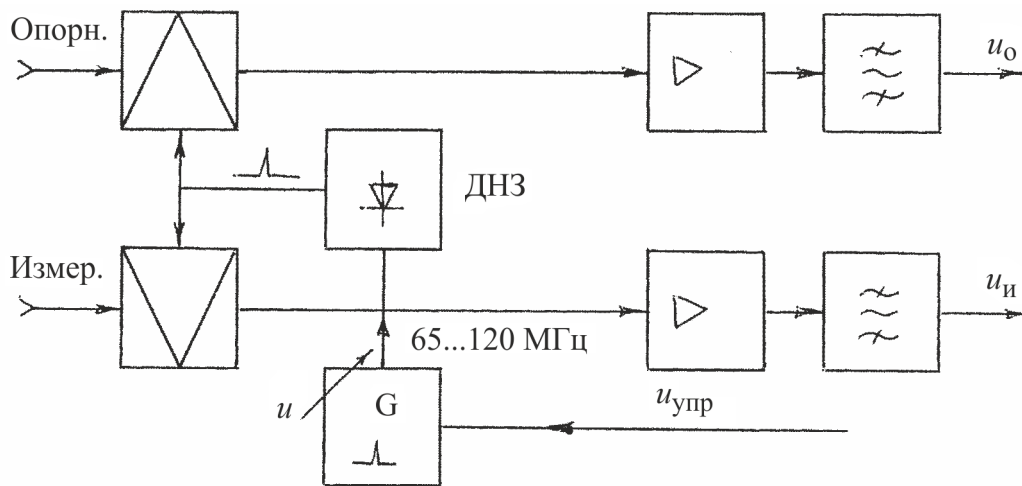


Рис. 8.7. Структурная схема преобразователя частоты

Генератор управляющих импульсов в режиме поиска перестраивается по частоте  $f_{Г}$  напряжением в пределах 65...120 МГц до тех пор, пока не будет выполнено условие

$$f_{вх} - nf_{Г} = f_{ПЧ1} = 19,722 \text{ МГц},$$

где  $n$  – номер одной из гармоник стробимпульса;  $f_{ПЧ1}$  – промежуточная частота. Выходные сигналы со смесителей опорного и измерительного каналов фильтруют, усиливают и подают на низкочастотный измерительный блок, структурная схема которого представлена на рис. 8.8.

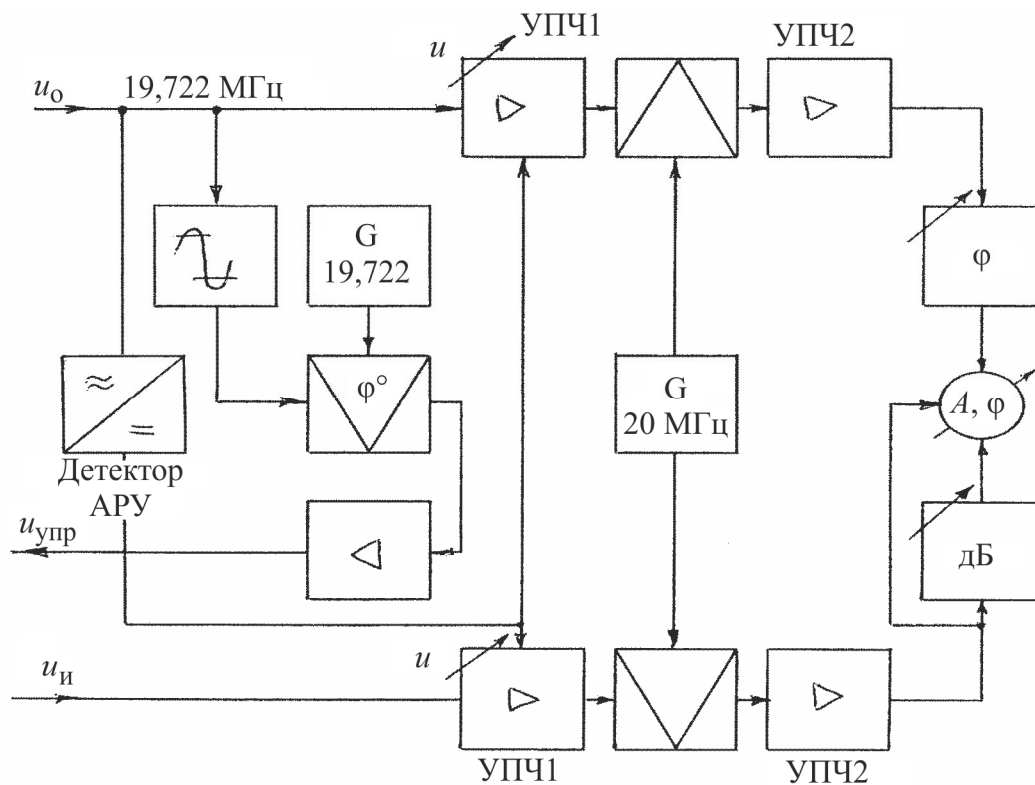


Рис. 8.8. Структурная схема НЧ измерительного блока

Опорный сигнал поступает на систему фазовой автоподстройки частоты, управляющую частотой генератора стробимпульсов. Система ФАПЧ включает в себя опорный кварцевый генератор частоты 19,722 МГц, фазовый детектор и усилитель постоянного тока (УПТ). Если условие преобразования частоты не выполняется ни для какого номера гармоники стробимпульса, то на вход управления генератора с выхода фазового детектора поступает пилообразное напряжение. Оно подстраивает генератор до вхождения системы ФАПЧ в синхронизм (режим поиска). В дальнейшем система ФАПЧ автоматически удерживает частоту генератора, сохраняя условие захвата частоты.

Сигналы опорного и измерительного каналов поступают на входы УПЧ1, охваченных цепью автоматической регулировки усиления (АРУ). Управляющий сигнал АРУ вырабатывается детектированием опорного сигнала, его величину контролируют 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  $f_{ПЧ2}$  равна 278 кГц. Преобразованный сигнал опорного канала поступает на плавный некалиброванный фазовращатель **ФАЗА**, позволяющий регулировать фазу в пределах  $\pm 40^\circ$  для установки нуля индикатора (калибровка по фазе). Предусмотрена также плавная калибровка уровня сигнала плавным регулятором **АМПЛИТУДА**.

В измерительном канале сигнал разделяется на два. Один сигнал проходит через ступенчатый аттенюатор (с шагом перестройки 1 дБ в пределах 0...60 дБ). Этот аттенюатор применяют в качестве образцового для измерения ослабления методом замещения. Второй сигнал подают на индикатор помимо аттенюатора и используют при измерении фазового сдвига.

Индикаторный блок прибора представляет собой комбинацию фазометра и амплитудного детектора (НЧ-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 логарифмический усилитель и стрелочный прибор. Шкала ослаблений градуирована в децибелах.

В индикаторном блоке предусмотрены 3 диапазона для измерения ослабления: 3, 10 и 30 дБ. На стрелочном индикаторе нанесены 2 шкалы:  $-30...30$  для диапазонов 3 и 30 дБ и  $-10...10$  для диапазона 10 дБ. При работе в диапазоне 3 дБ показания прибора нужно делить на 10. Для измерения разности фаз



предусмотрены 4 диапазона: 6, 18, 60, 180° и 2 шкалы: 6 и 18. При работе в диапазонах 60 и 180° показания прибора нужно умножать на 10.

### **8.6. Состав лабораторной установки**

В лабораторную установку входят измеритель разности фаз ФК2-18 и внешний СВЧ-генератор с диапазоном частот, соответствующим рабочему диапазону волновода  $23 \times 10$  мм (8...12 ГГц), а также комплект коаксиально-волноводных переходов и измерительная ячейка с исследуемым диэлектриком. Для фиксации волноводов используются направляющие штыри в переходах. Измерительная ячейка представляет собой толстый волноводный фланец – держатель диэлектрического образца. Исследуемый материал полностью заполняет сечение волновода.

### **8.7. Задание и указания к выполнению работы**

#### **8.7.1. Подготовка лабораторной установки к работе**

Генератор СВЧ должен быть соединен с разъемом ВЧ на задней панели прибора ФК2-18. Если необходимо снизить уровень мощности генератора, нужно на его выход включить фиксированный аттенюатор 10 или 20 дБ.

1. Включите прибор ФК2-18 и генератор СВЧ, дайте им прогреться в течение 15...20 мин. На генераторе включите ручной режим перестройки частоты **РУЧ**, отключите внутреннюю модуляцию выходного сигнала нажатием кнопки **НГ** и включите подачу мощности на выходной разъем кнопкой **СВЧ**.

2. Переключатель **ДИАПАЗОН ЧАСТОТ GHz** прибора ФК2-18 установите в положение, соответствующее используемому диапазону частот (8...12 ГГц). Установите на генераторе рабочую частоту, на которой будут выполняться измерения (первая частотная точка порядка 8,5 ГГц). Отрегулируйте ручкой **СТАБИЛЬНОСТЬ** режим работы преобразователя так, чтобы индикатор **ОПОРНЫЙ УРОВЕНЬ** прибора ФК2-18 показывал бы ток в пределах 50...80 мкА. Этим обеспечивается оптимальный режим работы системы ФАПЧ преобразователя.

Лабораторная установка готова к работе.

#### **8.7.2. Калибровка прибора ФК2-18**

Задача калибровки – устранить систематические погрешности, связанные с наличием фазовых сдвигов в измерительном тракте и неодинаковыми ослаблениями в опорном и измерительном каналах.

1. Сначала выполните калибровку уровня нулевого ослабления. Для этого установите следующее положение органов управления:

- кнопочный переключатель **dB – φ** – в положение **30 дБ**;
- переключатель **ФАЗА φ°** – в положение **0**.

2. Затем переключателем **ОСЛАБЛЕНИЕ дБ** и ручкой **АМПЛИТУДА** установите нулевое показание стрелочного индикатора. Повторите установку нуля на пределах **10** и **3 дБ** переключателя **dB – φ**. Запишите калибровочное значение ослабления аттенюатора  $A_K$  (положение переключателя **ОСЛАБЛЕНИЕ дБ**). Прибор откалиброван для измерения модуля коэффициента передачи (ослабления).

3. Проведите калибровку нулевого фазового сдвига. На переключателе **dB – φ** нажмите кнопку **180°**. Ручками **ДЛИНА ОПОРНОГО КАНАЛА (См)** блока СВЧ и **ФАЗА** измерителя установите нулевое показание стрелочного индикатора. Повторите операцию и уточните калибровку на пределах **60**, **18** и **6°** переключателя **dB – φ**. Прибор откалиброван для проведения фазовых измерений.

4. Калибровку прибора следует повторять на каждой частоте измерений, а также по прошествии 5...10 мин из-за дрейфа частоты генератора.

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

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

1. Запишите показания шкалы фазовращателя **ДЛИНА ОПОРНОГО КАНАЛА (См)**  $L_1$ , установленного при калибровке прибора по нулевому фазовому сдвигу.

2. На переключателе **dB – φ** установите предел **180°**. Вращая ручку **ДЛИНА ОПОРНОГО КАНАЛА (См)** 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).

3. Последовательно переходя на более узкие пределы (до **6°**), установите точное положение фазовращателя, соответствующее нулевому фазовому сдвигу.

4. Запишите второе показание **ДЛИНА ОПОРНОГО КАНАЛА (См)**  $L_2$ . Удвоенная разность зафиксированных показаний  $\Delta L = \lambda = 2 \times |L_2 - L_1|$  соответствует длине линии, обеспечивающей на рабочей частоте фазовый сдвиг  $360^\circ$ .

Эта удвоенная разность и есть длина волны  $\lambda$  входного колебания. *Обратите внимание, что поскольку для изменения электрической длины линии опорного сигнала используется U-образная (тромбонная) линия задержки, значение на цифровом индикаторе либо разность значений нужно всегда умножать на 2.* Рассчитайте значение рабочей частоты  $f$  по формуле

$$f[\text{ГГц}] = 29.98 / \lambda [\text{см}].$$

Сравните полученный результат со значением частоты на генераторе и определите погрешность ее установки.

#### **8.7.4. Измерение модуля и фазы коэффициента передачи измерительной ячейки с исследуемым диэлектриком**

Измерьте модуль и фазу коэффициента передачи ячейки с диэлектрическим образцом.

1. Убедитесь, что измерительная установка находится в исходном состоянии. Уровни нулевого ослабления и фазового сдвига на данной частоте находятся в нуле.

2. Убедитесь, что переключатель **ФАЗА  $\varphi^\circ$**  установлен в исходное (нулевое) положение.

3. Запишите положение аттенюатора  $A_K$ , установленное при калибровке (калибровочное показание аттенюатора **ОСЛАБЛЕНИЕ dB**). Две цифры означают десятки и единицы децибел.

4. Установите в ячейку отрезок фторопласта длиной  $L = 23$  мм. Измеряемый диэлектрик должен быть помещен по центру переходного фланца так, чтобы диэлектрик не застревал в волноводе. Выполните грубое измерение фазового сдвига, вносимого диэлектрическим образцом. Для этого используйте максимальный диапазон измерения фазы (на переключателе **dB –  $\varphi$**  нажмите кнопку **180°**). Искомый фазовый сдвиг  $\Delta\varphi_{\text{exp}}$  отсчитывается непосредственно по шкале ( $\Delta\varphi_{\text{exp}} = \varphi_{\text{шк}}$ ) с учетом знака.

5. Для точного измерения используйте метод замещения (компенсационный метод). Переключением встроенного фазовращателя **ФАЗА  $\varphi^\circ$**  добейтесь положения стрелки вблизи нулевого значения шкалы. Полярность вносимого образцового сдвига меняют тумблером индикатора « $\pm$ ». Далее переключите шкалу в положение **18°** (при необходимости – в положение **6°**) и отсчитайте остаточное значение фазового сдвига  $\varphi_{\text{шк}}$  (показания стрелочного индикатора). Точное значение измеряемого фазового сдвига равно  $\Delta\varphi_{\text{exp}} = \varphi_{\text{шк}} \pm \varphi_{\text{ФВ}}$ , где  $\varphi_{\text{ФВ}}$  – показание переключателя **ФАЗА  $\varphi^\circ$**  с учетом знака тумблера « $\pm$ ». После

измерения верните переключатель **ФАЗА  $\varphi^\circ$**  в исходное (нулевое) положение. Результаты грубого и точного измерений сведите в табл. 8.1.

6. Измерьте ослабление в диэлектрическом образце, для чего поставьте переключатель **dB –  $\varphi$**  в минимальное положение **3 дБ** и отсчитайте значение модуля коэффициента передачи [дБ] по шкале прибора. Ослабление будет равно модулю коэффициента передачи с обратным знаком  $\Delta A_{\text{exp}} = -A_{\text{шк}}$ . Для малого ослабления уточнять результат нет необходимости.

7. Если ослабление велико, то целесообразно использовать метод замещения с использованием калиброванного аттенюатора прибора. Для грубой оценки ослабления используйте шкалу **30 дБ**. Затем установите минимальный предел измерения ослабления **3 дБ** (переключатель **dB –  $\varphi$** ). Если прибор «зашкаливает», то увеличьте ослабление  $A_{\text{отс}}$  аттенюатора **ОСЛАБЛЕНИЕ dB** блока СВЧ до тех пор, пока стрелка не установится в пределах шкалы. В этом случае модуль коэффициента передачи  $\Delta A_{\text{exp}}$  определяется выражением  $\Delta A_{\text{exp}} = (A_{\text{к}} - A_{\text{отс}}) - A_{\text{шк}}$  [дБ], где  $A_{\text{шк}}$  – показание стрелочного индикатора (с учетом знака). После измерения модуля коэффициента передачи методом замещения восстановите на аттенюаторе **ОСЛАБЛЕНИЕ dB** величину калибровочного ослабления  $A_{\text{к}}$ . Результаты измерений для данного образца сведите в табл. 8.1.

Таблица 8.1

$f$ , ГГц	$\Delta \varphi_{\text{exp}} = \arg S_{21}, \dots^\circ$		$\Delta A_{\text{exp}} = - S_{21} $ , дБ	
	Грубо	Точно	Грубо	Точно
Материал:				
8,5				
Материал:				
8,5				
Материал:				
8,5				

8. Аналогичным образом проведите исследование фторопластового образца длиной 15 мм и одного образца с большими потерями длиной 8 мм.

9. Повторите калибровку и измерения для всех 3 образцов на частотах порядка 9 и 10,5 ГГц.

### **8.7.5. Обработка опытных данных и расчет параметров диэлектрика**

1. Для обработки полученных данных используйте программный калькулятор **eps.mcd**. Введя экспериментально полученные изменения ослабления  $\Delta A_{\text{exp}}$  и фазы коэффициента передачи  $\Delta \varphi_{\text{exp}}$  при помещении диэлектрика в ячейку, найдите диэлектрическую проницаемость исследуемого материала и его фактор потерь. Для этого необходимо подобрать начальные значения вещественной и мнимой частей проницаемости, близкие к ожидаемым.

2. Для диэлектриков с малыми потерями целесообразно применить двухэтапный поиск: сначала по данным фазовых измерений определяется приближенное значение диэлектрической проницаемости (без учета потерь), затем это значение подставляется в качестве начального в блок поиска окончательного решения.

3. Проверьте полученное решение, построив частотную зависимость модуля и фазы коэффициента передачи измерительной ячейки с диэлектриком и без него в модели MW Office (**waveguide\_eps.emp**). Используйте полученные опытным путем параметры диэлектрика. Сравните полученные изменения ослабления  $\Delta A_{\text{exp}}$  и фазы  $\Delta \varphi_{\text{exp}}$  с полученными в эксперименте на тех же частотах, на которых проводились измерения.

## **8.8. Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать структурную схему лабораторной установки, таблицы с результатами измерений и расчетов, графики измеренных зависимостей параметров диэлектрика от частоты, выводы относительно соответствия диэлектрической проницаемости фторопласта справочному значению ( $\epsilon = 1,9 \dots 2,2$ ).

## **8.9. Контрольные вопросы**

1. Что такое угол диэлектрических потерь материала? Как он связан с постоянной затухания волны в волноводе?

2. Какие проблемы возникают при использовании волноводного метода для измерения материалов с большим  $\epsilon'$ ?

3. Укажите назначение фазометра ФК2-18. Какие измерительные задачи можно решать с его помощью?

4. Для чего в состав фазометра включен плавный фазовращатель? Как с его помощью измеряют частоту входного сигнала?

5. Как осуществляется калибровка фазометра по модулю и фазе коэффициента передачи?

6. Для чего в приборе используют стробоскопическое преобразование частоты? В чем преимущества такого способа по сравнению с традиционным?

7. Каким методом измеряют фазовый сдвиг после преобразования частоты на НЧ?

8. В каких случаях используют метод замещения при измерении ослабления и фазового сдвига прибором ФК2-18?

9. Чем отличается фазометр СВЧ от панорамного измерителя комплексных коэффициентов передачи СВЧ-устройств?

## Список рекомендуемой литературы

### *Основная*

Григорьев А. Д., Иванов В. А., Молоковский С. И. Микроволновая электроника: учеб. / под ред. А. Д. Григорьева. СПб.: Лань, 2016. 496 с.

Данилин А. А. Измерения в технике СВЧ: учеб. пособие для вузов. М.: Радиотехника, 2008. 184 с.

Данилин А. А., Лавренко Н. С. Измерения в радиоэлектронике: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2017. 408 с.

Лавренко Ю. Е., Грачев С. В. Устройства СВЧ: конспект лекций. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 92 с.

Микроэлектронные устройства СВЧ / под ред. Г. И. Веселова. М.: Высш. шк., 1988. 280 с.

Сазонов Д. М., Гридин А. Н., Мишустин Б. А. Устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1981. 295 с.

Электронные устройства СВЧ: в 2 кн. / под ред. И. В. Лебедева. М.: Радиотехника, 2008. 752 с.

### *Дополнительная*

Андронов Е. В., Глазов Г. Н. Теоретический аппарат измерений на СВЧ. Т. 1: Методы измерений на СВЧ. Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. 801 с.

Афонский А. А., Дьяконов В. П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007. 548 с.

Афонский А. А., Дьяконов В. П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике / под ред. проф. В. П. Дьяконова. М.: ДМК Пресс, 2011. 688 с.

- Билько М. И. Измерение мощности на СВЧ. М.: Сов. радио, 1976. 168 с.
- Будурис Ж., Шеневье П. Цепи сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1979. 286 с.
- Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ-устройств. М.: Радио и связь, 1987. 432 с.
- Дансмор Джоэль П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. М.: ТЕХНО-СФЕРА, 2018. 736 с.
- Дьяконов В. П. Сверхскоростная твердотельная электроника. Т. 1, 2. М.: ДМК Пресс, 2013. 1176 с.
- Измерения в электронике: справ. / под ред. В. А. Кузнецова. М.: Энергоатомиздат, 1987. 512 с.
- Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 1, 2. М.: Связь, 1972. 988 с.
- Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений: пер. с англ. М.: Мир, 1990. 535 с.
- Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная база / под ред. А. М. Кудрявцева. М.: Радиотехника, 2006. 208 с.
- Силаев М. А., Брянцев С. Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. М.: Сов. радио, 1970. 245 с.
- Стариков В. Д. Методы измерения на СВЧ с применением измерительных линий. М.: Сов. радио, 1972. 144 с.
- Хибель М. Основы векторного анализа цепей. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 500 с.

## Содержание

Список сокращений и их англоязычные эквиваленты .....	3
1. Исследование частотных характеристик фильтров СВЧ.....	5
2. Скалярный измеритель АЧХ СВЧ-устройств .....	25
3. Исследование балансного СВЧ-смесителя.....	38
4. Измерение параметров транзисторного усилителя СВЧ .....	51
5. Исследование электрически управляемых свч-аттенюаторов на PIN-диодах .....	63
6. Измерение параметров ферритовых СВЧ-устройств .....	70
7. Исследование генератора СВЧ, управляемого напряжением .....	86
8. Измерение параметров диэлектриков на СВЧ .....	95
Список рекомендуемой литературы.....	110

Дмитрий Михайлович Воскресенский  
Александр Алексеевич Данилин  
Вадим Александрович Сосновский

### Измерения на СВЧ

Лабораторный практикум

Редактор И. Г. Скачек

---

Подписано в печать 25.11.21. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Печ. л. 7,0.  
Гарнитура «Times New Roman». Тираж 95 экз. Заказ .

---

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5