



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

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

Кафедра теоретических основ радиотехники

Д.М. Воскресенский, А. А. Данилин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы по дисциплине

“Измерения на СВЧ”

(электронный вариант)

ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛАНСНОГО

СВЧ СМЕСИТЕЛЯ

АНАЛИЗАТОРОМ СИГНАЛОВ

Agilent N9010A

Санкт-Петербург

2025 г.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛАНСНОГО СВЧ-СМЕСИТЕЛЯ АНАЛИЗАТОРОМ СИГНАЛОВ AGILENT N9010A

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

3.1. СВЧ-смесители и их параметры

В измерительных приборах высоких (ВЧ) и сверхвысоких (СВЧ) частот (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 полупроводниковых диодов) и *гетеродина* (маломощного генератора СВЧ). На выходе предусмотрен фильтр или усилитель (УПЧ) с полосно-пропускающим фильтром (ППФ), выделяющим сигнал с промежуточной частотой (ПЧ).

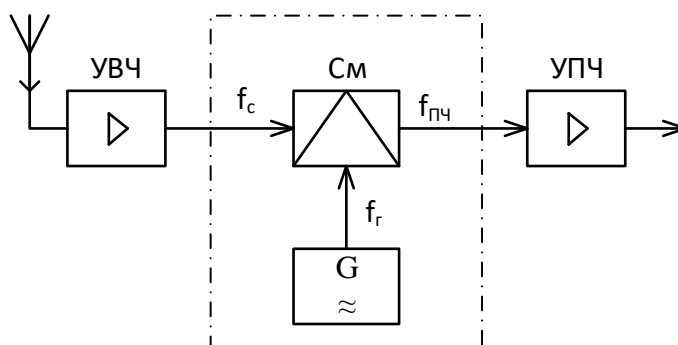


Рис. 3.1. Структурная схема преобразователя частоты

Преобразование частоты сигнала происходит за счет нелинейности характеристик смесительных диодов, в качестве которых используют точечно-контактные диоды (ТКД) и диоды с контактом Шотки (ДШ). Последние обладают более крутой вольтамперной характеристикой (ВАХ) (рис. 3.2 – штриховая линия) по сравнению с точечными полупроводниковыми диодами (рис. 3.2 – сплошная линия). Диоды Шоттки характерны лучшей электрической и механической прочностью, однако требуют повышенной мощности гетеродина. Иногда в смесителях применяют обращенные туннельные диоды (ОД), у

которых используется обратная ветвь ВАХ (рис. 3.2 – штрихпунктирная линия).

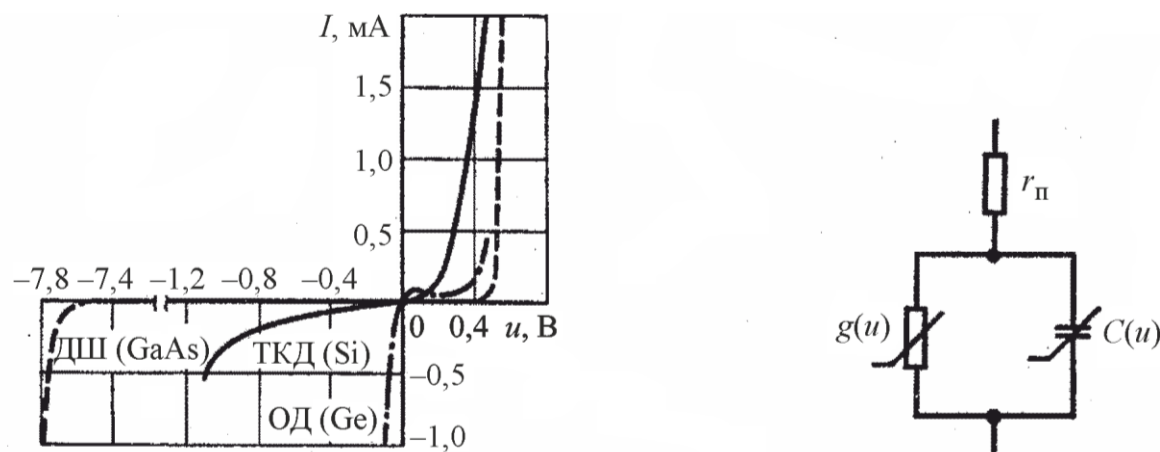


Рис. 3.2. ВАХ смесительных диодов и их эквивалентная схема

Упрощенная эквивалентная схема смесительного диода содержит сопротивление потерь r_{Π} , 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.

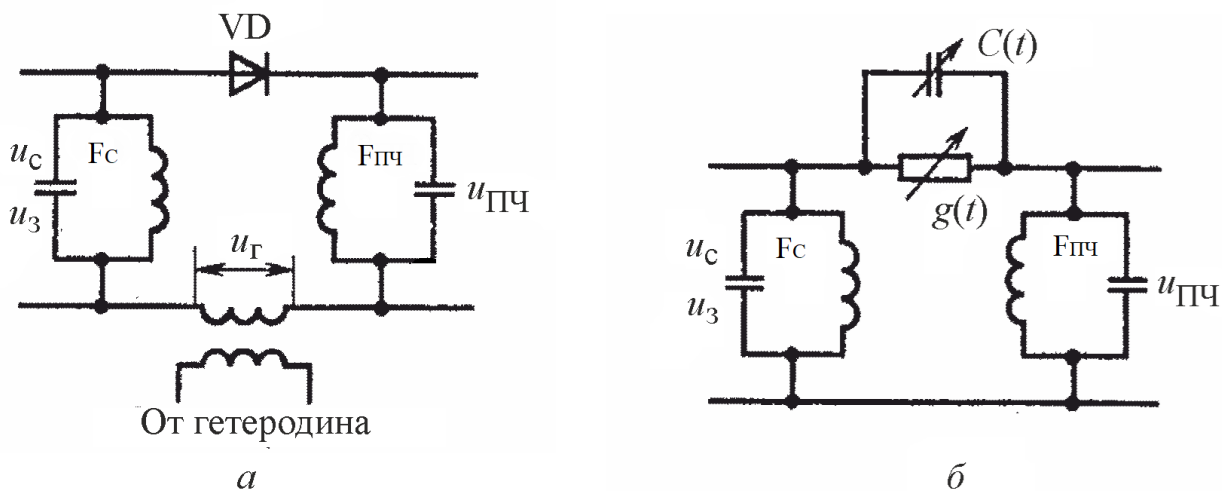


Рис. 3.3. Схемы однодиодного смесителя: а – электрическая; б – эквивалентная

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 ге-

теродина. 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 $\pm m\omega_c \pm n\omega_r$, где m и n – целые числа.

На выходе смесителя фильтром ПЧ чаще всего 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 – частота сигнала ниже частоты гетеродина $\omega_{ПЧ} = \omega_r - \omega_c$ («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).

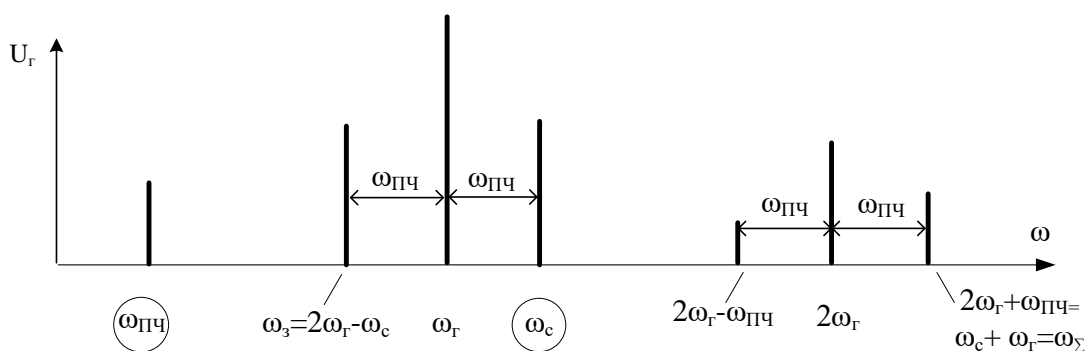


Рис. 3.4. Спектр комбинационных составляющих смесителя с верхней боковой полосой

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* $\omega_3 = \omega_r - \omega_{ПЧ}$ 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 внешние помехи на частоте зеркального канала приема.

Основным недостатком одноктактных 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).

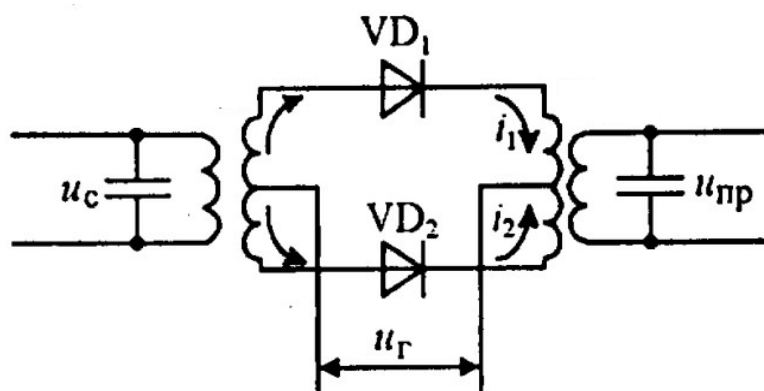


Рис. 3.5. Двухдиодный балансный смеситель

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 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.

Балансная схема имеет меньший коэффициент шума. Вся мощность гетеродина приложена к диодам и не поступает в нагрузку и в источник сигнала. Это позволяет уменьшить требуемый 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).

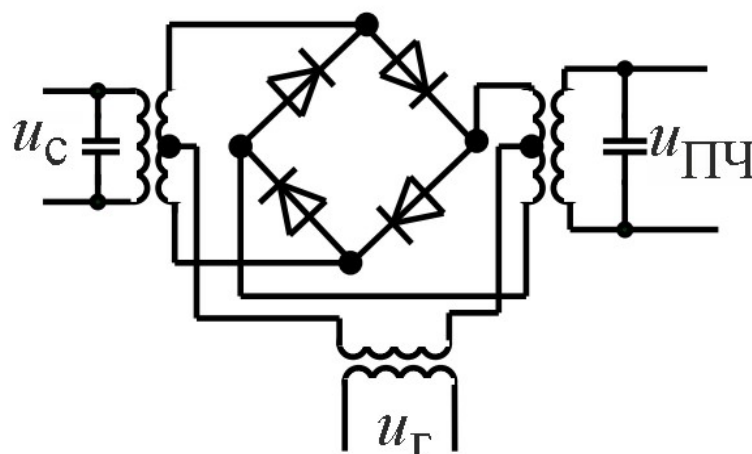


Рис. 3.6. Кольцевой балансный смеситель

Благодаря симметрии трансформаторов и диодов обеспечивается хорошая развязка входов сигнала, гетеродина и выхода ПЧ, малый уровень потерь сигнала, 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.

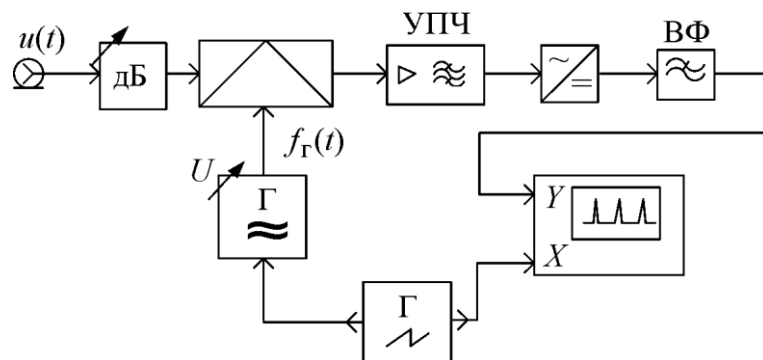


Рис. 3.7. Структурная схема АС последовательного типа

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:

$$f_z(t) = f_{c_n} + \Delta f_a \frac{u_{ypr}(t)}{U_{ypr \max}}$$

Перестройку частоты гетеродина производят генератором пилообразного напряжения $u_{ypr}(t)$. Он задает время анализа (T_a), т. е. время, за которое АС сканирует заданный диапазон частот спектра (полосу анализа Δf_a). 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_c , то на выходе смесителя возникают колебания с комбинационными частотами, в том числе с частотой $f_c - f_r(t)$. Этот сигнал подают на вход узкополосного усилителя промежуточной частоты (УПЧ), в данном случае называемый радиопередателем, 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 $f_c - f_c(t_0) = f_{ПЧ}$, 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 гармонических составляющих 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 гармоник, расположение откликов на оси X соответствует частотам гармонических составляющих входного сигнала.

Отклик АС на гармонику 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

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

где Δf_a и T_a – полоса обзора и время анализа; $A = 1 \dots 2$ – коэффициент, зависящий от формы АЧХ фильтра; $\Delta f_{УПЧ}$ – 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:

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

При широкой полосе анализа и узкой полосе пропускания $\Delta f_{УПЧ}$ требуемое время анализа может достигать десятков секунд и более. Поэтому полоса пропускания УПЧ делается регулируемой, что позволяет подобрать оптималь-

ное 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 компромиссная 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). Чаще используют логарифмические шкалы относительного уровня гармоник в децибел-милливаттах [дБм]. Для точного измерения частоты гармоник метод калиброванных шкал не подходит из-за невысокой стабильности частотной шкалы АС. Вместо этого иногда 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 анализатора. 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 сигналов N9010A компании Agilent Technologies

В лабораторной работе используется анализатор сигналов N9010A, который является современным анализатором спектра с расширенными измерительными возможностями. Он предназначен для исследования спектров в диапазоне до 3.6 ГГц. Он позволяет:

- измерять 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 цветной жидкокристаллический индикатор. В качестве гетеродина смесителя использован СВЧ-синтезатор с цифровым управлением, что позволяет существенно улучшить точность измерения частоты гармоник (частотное разрешение 2 Гц). Основные параметры анализатора приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Параметр	Значение	Погрешность
Диапазон частот	9 кГц...3.6 ГГц	Определяется опорным источником частоты
Полоса обзора	0 Гц, 10 Гц...3.6 ГГц	
Полоса пропускания УПЧ (RBW)	10 Гц ..3 МГц с шагом 10%, 4,5,6 и 8 МГц	±1..2 %
Коэффициент прямоугольности АЧХ УПЧ	4.1:1	по уровням минус 60/минус 3 дБ
Число частотных точек	От 1 до 20001	
Число отчетов на экране	До 1001	
Входное сопротивление	50 Ом	КСВН не более 1,5
Диапазон входных уровней сигнала	–100...+23 дБм	Неравномерность АЧХ: ±0.27 дБ
Спектральная плотность шумов	До –163 дБм/Гц	с дополнительным предусилителем -172 дБм/Гц

Вход АС имеет разъем N-типа; 50 Ом; КСВН входа <1,5. Максимальный уровень входного сигнала +30 дБм, постоянное напряжение не более 25 В. Время анализа регулируется в пределах 1 мс...4000 с. Полосу пропускания видеофильтра можно менять в пределах 10 Гц...8 МГц.

Прибор имеет низкий уровень собственных фазовых шумов. Плотность мощности фазовых шумов составляет –128 дБн/Гц на частоте 1 ГГц при отстройке от несущей на 10 кГц. Прибор обеспечивает дополнительные функциональные возможности:

– измерение мощности в канале и соотношения мощностей в смежных каналах, измерение пропускной способности канала связи;

- обработку спектрограмм (поиск пикового значения; накопление; замораживание; математическая обработка);
- маркерные измерения (до 12 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. Его схема (рис. 3.8) представляет собой двойной кольцевой балансный смеситель на СВЧ диодах с симметрирующими трансформаторами.

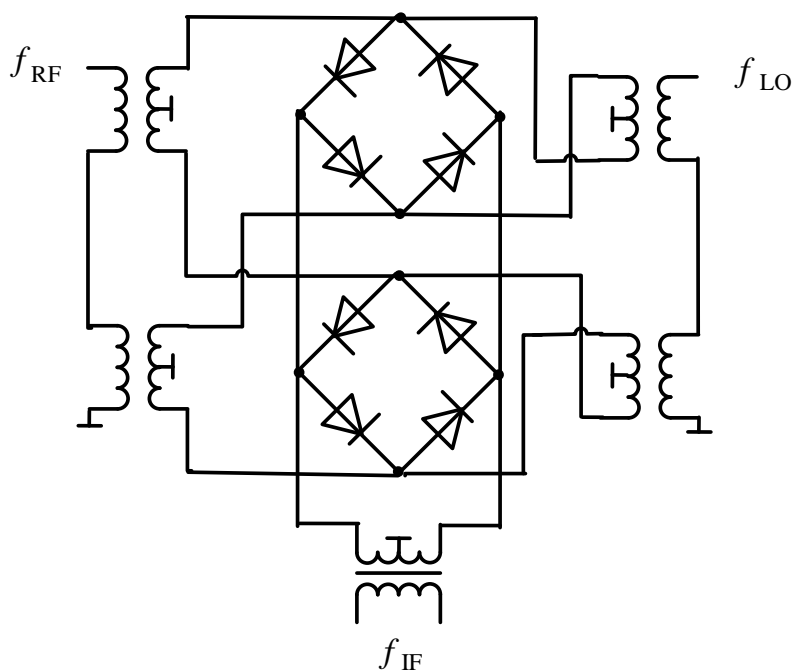


Рис. 3.8. Двойной балансный смеситель SYM-25DHW

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 (ФНЧ) с частотой среза 800...900 МГц. В состав лабораторной установки входят также два измерительных СВЧ-генератора N9310A (диапазон частот 9 кГц...3 ГГц) и анализатор сигналов N9010A фирмы Agilent.

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.

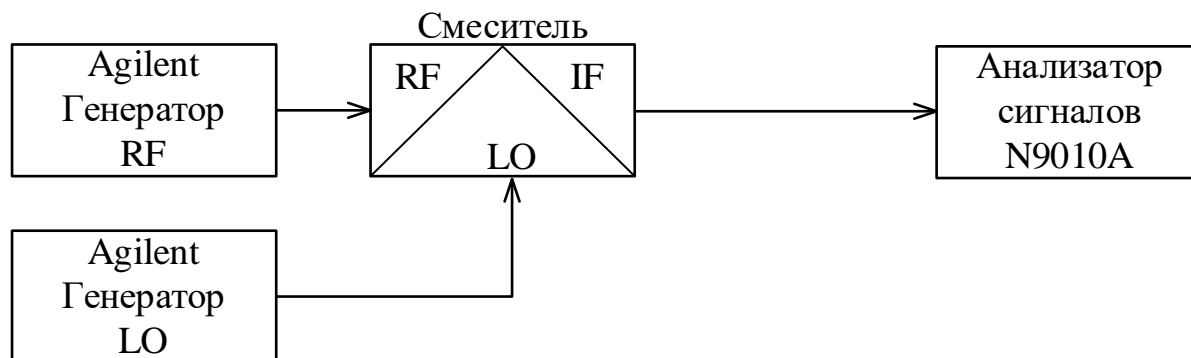



Рис. 3.9. Схема измерительной установки без ФНЧ

2. Соедините генератор сигнала гетеродина с разъемом LO, а генератор входного сигнала – с разъемом RF смесителя. Установите частоту на выходе гетеродина (LO) $f_T = 900$ МГц, уровнем +17 дБм [dBm]. Установите частоту входного ВЧ-сигнала (RF) $f_T = 1000$ МГц, уровень -10 дБм. Частоты генераторов соответствуют работе смесителя с верхней боковой полосой.

Отключите модуляцию сигналов кнопкой **MOD On/Off** и включите выходы генераторов нажатием кнопок **RF On/Off**. На выходе смесителя (IF), кроме преобразованного сигнала с частотой 100 МГц, должны появиться комбинационные составляющие с частотами $mf_c \pm nf_s$.

3. Амплитудный спектр полного выходного сигнала в диапазоне до 3,6 ГГц исследуйте с помощью АС. Включите анализатор спектра длительным нажатием кнопки . Включите автоматическую настройку параметров АС **Freq => Auto Tune**. При этом на экране появится отклик гармоника с частотой ПЧ. Далее установите полный обзор АС по частоте (**Span => Full Span**) и полосу пропускания радиофильтра УПЧ (**BW=>Res BW 3 МГц**). Для сглаживания шумов выберите узкую полосу видеофильтра **BW => Video BW 3 кГц**.

Установите отсчетный уровень спектрограммы **AmpTD => RefLevel 0 дБм**, цену деления шкалы уровня **AmpTD => ScaleDiv 10 дБ**. Сфотографируйте полученную спектрограмму или сделайте скриншот экрана в формате .jpg.

Для этого подключите сменный USB-накопитель к USB-разъему на передней панели АС и выберите режим сохранения снимка экрана **Save => Screen Image => Save as...** .С помощью манипулятора «мышь» выберите место сохранения файла **Computer => Removable Storage** и введите удобное имя файла.

4. По вертикальной шкале уровня спектра оцените амплитуды гармонических составляющих (методом калиброванных шкал). Результаты занесите в табл. 3.2. С помощью маркера (электронной метки) проведите точное измерение мощностей и частот гармоник. Для этого включите одиночный маркер (**Marker => Select Marker 1**), режим маркера **Marker => Normal**. На экране появится один маркер в виде зеленого ромбика. Частота и уровень спектральной составляющей в точке расположения маркера выводятся в правой верхней части экрана. Последовательно устанавливайте маркер на вершины откликов гармоник, используя режим поиска пика (**PeakSearch => Next Pk Right (Left)**). Запишите в табл. 3.2 точные значения частот гармоник и их уровень (мощность в дБм).

Таблица 3.2

Параметр	Измеренное значение				
Оценка уровня гармоник по шкале, дБм					
Мощность гармоник (P_n) (маркер), дБм					
Частота гармоник (маркер), МГц					

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

3.5.2. Измерение коэффициента преобразования смесителя (потерь преобразования)

В этом пункте работы измеряется частотная зависимость потерь преобразования смесителя в диапазоне 1000...3500 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 подав-

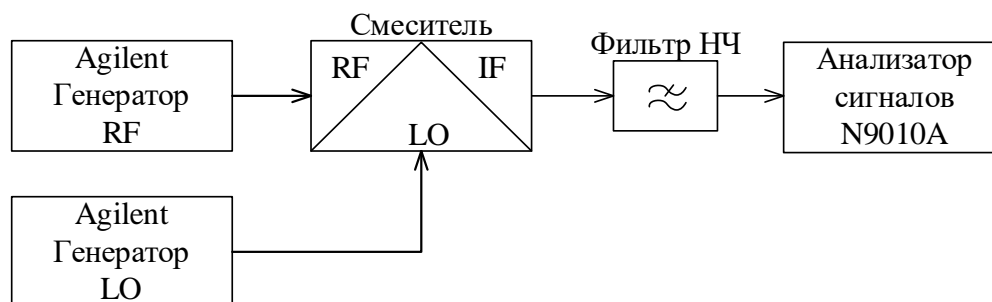


Рис. 3.10. Схема измерительной установки с ФНЧ

ления высших комбинационных составляющих (рис. 3.10).

Установите начальную частоту сигнала (RF) 1000 МГц, частоту гетеродина (LO) – 1100 МГц (нижняя боковая полоса смесителя). 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 (**PeakSearch** => **Next Peak**) и сделайте его частоту центральной частотой полосы обзора (**PeakSearch** => **CF**). Далее установите следующие параметры АС: полоса обзора **Span** 10 МГц, полоса пропускания фильтра УПЧ **BW** => **Res BW** 100 кГц, полоса видеофильтра **BW** => **Video BW** 3 кГц.

2. Установите маркер на вершину отклика ПЧ и измерьте его амплитуду U_T , дБм. Учитывая, что уровень входного сигнала -10 дБм, потери преобразования будут равны A , дБ $(-U_T - 10)$. Результат занесите в табл. 3.3. Повторите измерение для частоты гетеродина 900 МГц (верхняя боковая полоса смесителя).

Таблица 3.3

Частота сигнала, МГц	Потери преобразования A , дБ	
	Нижняя боковая полоса	Верхняя боковая полоса
1000		
...		
2900		

3. Проведите аналогичные измерения на частотах сигнала 1500, 2000, 2500, 2900 МГц. На каждой частоте сигнала устанавливайте частоту гетеродина дважды: на 100 МГц больше и меньше, чем частота сигнала. Результаты изме-

рений 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 **BW** => **Res BW** 1 кГц, полоса видеофильтра **BW** => **Video BW** 1 кГц.

2. Установите на генераторе входного сигнала (RF) частоту 2500 МГц, режим амплитудной модуляции (**АМ - вкл**), коэффициент модуляции 100 %, частоту модуляции 10 кГц. На генераторе гетеродина (LO) должна быть установлена частота 2400 МГц. Получите на экране спектр преобразованного АМ сигнала на ПЧ 100 МГц (рис. 3.11) и измерьте и запишите амплитуды его гармо-

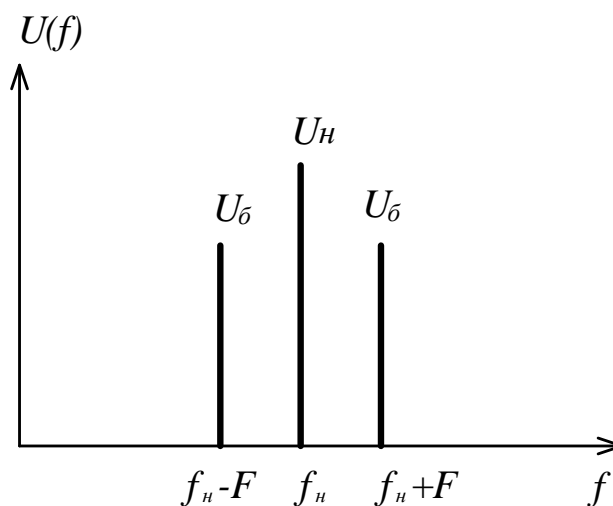


Рис. 3.11. Спектр АМ сигнала

нических составляющих.

Рассчитайте коэффициент модуляции преобразованного сигнала $m, \% = 2 \cdot 10^{\frac{U_б - U_H}{20}} \cdot 100\%$, где U_H – уровень несущей АМ сигнала (дБм), $U_б$ – уровень боковой составляющей (дБм). Сравните его с установленным на генераторе. Погрешность измерения коэффициента модуляции не должна превышать 10%. Сфотографируйте спектрограмму АМ сигнала, или сделайте снимок экрана на диск. Выключите на генераторе режим АМ.

3. Включите на генераторе режим частотной модуляции входного сигнала (**FM - вкл**) с девиацией 20 кГц и частотой модуляции 1 кГц. Для сглаживания спектрограммы включите режим усреднения графика (**Trace/Detector => Trace Average**). Измерьте ширину спектра ЧМ колебания по его огибающей. Для этого вручную установите маркер в точки слева и справа от центра спектра по уровню примерно -10 дБ относительно значения в максимуме спектра. Запишите нижнюю и верхнюю граничные частоты спектра и рассчитайте его ширину. Сравните ее с установленной девиацией частоты. Сфотографируйте вид спектра ЧМ сигнала, или сделайте снимок экрана на диск. Отключите режим сглаживания спектрограммы (**Trace/Detector => Clear Write**).

3.6. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- протокол измерений;
- структурную схему лабораторной установки;
- таблицы с результатами измерений;
- спектры комбинационных составляющих для верхней и нижней боковой полосы;
- графики измеренных зависимостей: зависимость коэффициента преобразования смесителя для верхней и нижней боковой полосы;
- скриншоты экрана АС;
- расчет коэффициента модуляции АМ сигнала;
- расчет ширины спектра ЧМ сигнала.

3.7. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте измерительные задачи, решаемые анализатором спектра последовательного типа.
2. Поясните структурную схему последовательного анализатора спектра. Укажите назначение основных блоков прибора.
3. Что такое рабочий диапазон частот и полоса обзора спектроанализатора и чем они отличаются?
4. Почему в анализаторах спектра применяют линейный закон изменения частоты во времени? Какие искажения возможны при нелинейном законе?
5. Как производят измерение амплитуд спектральных составляющих в спектроанализаторах последовательного типа?

6. Как выполняется измерение частоты спектральных составляющих в анализаторе спектра?
7. Какие параметры анализатора спектра определяет полоса пропускания УПЧ? В каких случаях ее необходимо подбирать?
8. Почему в ряде случаев анализ спектра необходимо делать в течение значительного времени (единицы и десятки секунд)? Что происходит, если установить малое время анализа?
9. Из каких соображений выбирают полосу пропускания видеофильтра АС? В каком случае эту полосу делают узкой?
10. Что такое прямой и зеркальный каналы спектроанализатора? Для чего в анализаторах спектра используют двойное или даже тройное преобразование частоты?
11. Почему в преобразователях частоты мощность сигнала гетеродина выбирают значительно больше, чем мощность входного сигнала?
12. Какие основные комбинационные составляющие можно наблюдать на выходе смесителя?
13. Почему уровень шума на выходе однодиодного смесителя выше, чем у двухдиодного (балансного) смесителя?
14. Почему уровень мощности гетеродина преобразователя с балансным смесителем может быть меньше, чем для однодиодного смесителя?
15. В каких единицах измеряют мощность в анализаторах спектра? Какова связь между дБ, дБм и Вт?

Литература

1. Данилин А.А. Измерения в радиоэлектронике сверхвысоких частот: Учеб. пособие для вузов.- СПб: Лань, 2025.-348с.
2. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ: Учеб.пособие для вузов.- М.: Радиотехника, 2008.-184с.
3. Воскресенский Д.,М., Данилин А.А., Сосновский В.А. Измерения на СВЧ:лаб. Практикум /Под. ред. А.А.Данилина.- СПб.: Изд.СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021.- 112с.
4. Данилин А.А. , Лавренко Н.С. Измерения в радиоэлектронике: Учебное

- пособие /Под. ред. А.А.Данилина - Спб.: Изд-во «Лань», 2017. -408с
5. Нефедов Е.Н. Устройства СВЧ и антенны: Учеб. пособие для студентов ВУЗов, -М.: Издательский центр «Академия», 2009. - 384с
 6. Лавренко Ю.Е., Грачев С.В. Устройства СВЧ: конспект лекций. Спб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. -92с
 7. Хелзайн Пассивные и активные цепи СВЧ. –М.:Радио и связь, 1981.-200с.
 8. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1981 -295с.
 9. Микроэлектронные устройства СВЧ. Под ред. Г.И. Веселова, 1988-280с.

Оглавление

3. ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛАНСНОГО СВЧ-СМЕСИТЕЛЯ АНАЛИЗАТОРОМ СИГНАЛОВ AGILENT N9010A	2
3.1. СВЧ-смесители и их параметры.....	2
3.2. Анализаторы спектра СВЧ-радиосигналов.....	6
3.3. Краткие технические данные СВЧ-анализатора сигналов N9010A компании Agilent Technologies	9
3.4. Описание лабораторной установки	11
3.5. Задание и указания к выполнению работы	13
3.5.1. Измерение полного спектра комбинационных составляющих на выходе смесителя.....	13
3.5.2. Измерение коэффициента преобразования смесителя (потерь преобразования).....	14
3.5.3. Исследование преобразования частоты модулированных сигналов .	16
3.6. Содержание отчета	17
3.7. Контрольные вопросы	17
Литература.....	18