



**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**

---

А. А. Данилин

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторной работы по дисциплине

“ Измерения на СВЧ”

(электронный вариант)

**Измерение параметров транзисторного  
усилителя СВЧ**

Санкт-Петербург

2025 г.

## 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 с минимальными искажениями его формы, спектрального состава и без ухудшения отношения сигнал/шум.

По назначению выделяют усилители малого, среднего и высокого уровней 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).

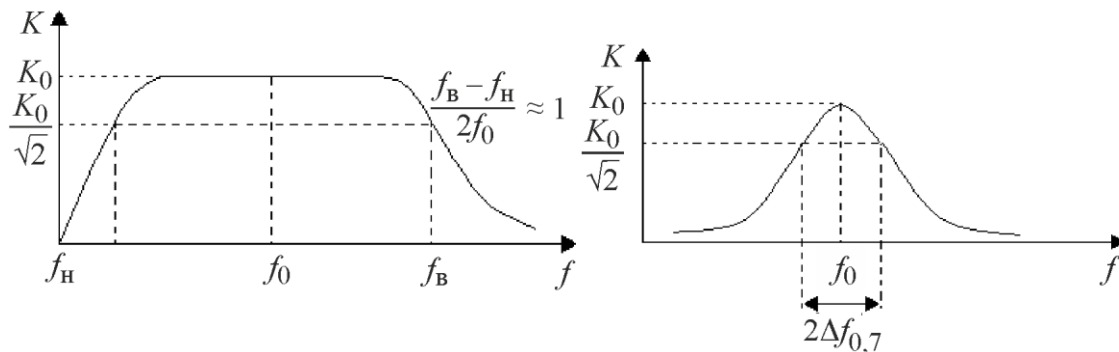


Рис. 4.1. АЧХ СВЧ-усилителей: а – широкополосный; б – узкополосный

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 полупроводниковые. 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 Шотки 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 превы-

шения тока стока (либо коллектора) при работе на «аварийную» нагрузку (XX или КЗ).

Основой расчета и анализа транзисторного МШУ СВЧ является структурная (физическая) модель, т. е. эквивалентная схема транзистора, содержащая сосредоточенные элементы и зависимые источники сигнала. 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 используют более простые бесструктурные матричные модели транзистора. Транзистор СВЧ как эквивалентный четырехполюсник может быть описан, к примеру, параметрами  $u$  или  $h$ , которые обычно используются на более низких частотах. Для измерения этих параметров необходимо обеспечить режимы XX 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 тогда, когда транзистор правильно нагружен, т. е. сопротивление 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).

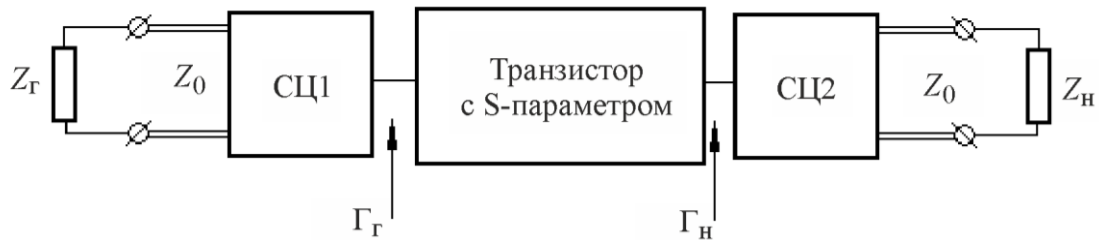


Рис. 4.2. Структурная схема однотактного усилительного каскада

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);  $\Gamma_{\Gamma}$  и  $\Gamma_{\text{Н}}$  – коэффициенты отражения на входе и выходе транзистора.

#### 4.2. Рабочие параметры усилителей СВЧ

*Коэффициент усиления по мощности.* Под коэффициентом усиления по мощности ( $K_{\text{У}}$ ) 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

$$K_{\text{У}} = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}} = |S_{21}|^2. \quad (4.1)$$

*Амплитудно-частотная характеристика* – это зависимость коэффициента усиления по мощности ( $K_{\text{У}}$ ) от частоты входного сигнала. Обычно АХЧ имеет сложный характер, определяемый частотными свойствами активных элементов (диодов, транзисторов), качеством согласования с источником сигнала и нагрузкой, 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  $K_{\text{У}} = P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}$  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:  $\Delta K_{\text{У}} = K_{\text{У max}} - K_{\text{У min}}$  [дБ]. При усилении широкополосного сигнала возможны искажения его формы, вызванные отклонением от линейного закона ФЧХ усилителя. Количе-

ственной характеристикой таких явлений служит значение неравномерности группового запаздывания сигнала (ГВЗ) в рабочей полосе частот:

$$\text{ГВЗ}(f) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial(\Phi_{\text{ЧХ}})}{\partial f}. \quad (4.2)$$

*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 теплового шума резистора с сопротивлением, равным входному сопротивлению усилителя. Обычно коэффициент шума выражают в децибелах:  $NF = 10 \lg(F_{\text{ш}})$ .

*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 в середине частотного диапазона). Масштабы по осям графика АХ выбирают логарифмическим (рис. 4.3). В области малых значений входного сигнала эта характеристика обычно линейна. При увеличении уровня входного сигнала реальная характеристика будет отклоняться от идеальной из-за проявляющейся нелинейности усилителя. В области ограничения (компрессии) сигнала АХ имеет загиб. Точка, где отклонение АХ от линейной зависимости составляет 1 дБ, называется *точкой компрессии* (однодецибельной точкой компрессии, 1 dB compression point, P1dB) (рис. 4.3).

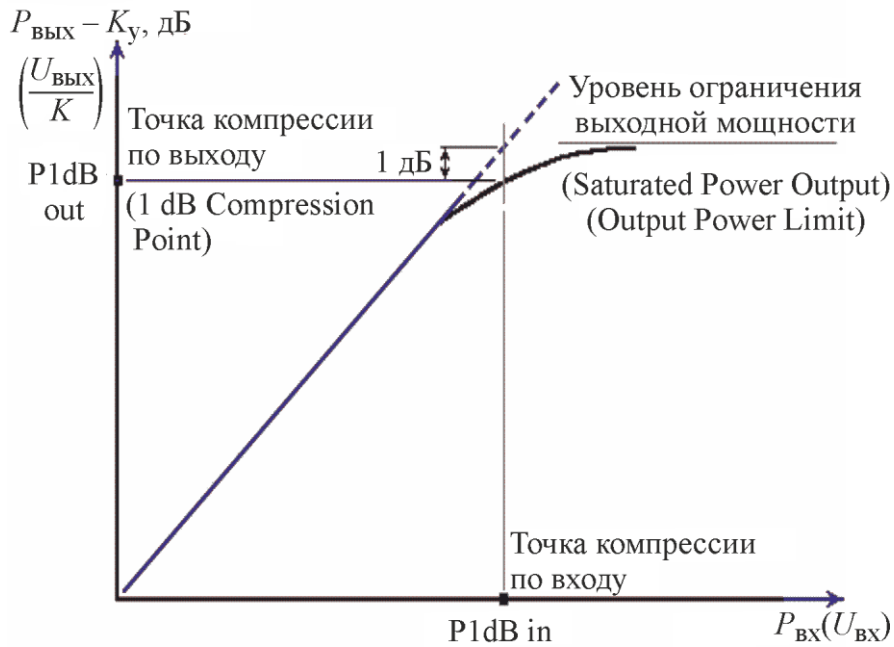


Рис. 4.3. Амплитудная характеристика СВЧ-усилителя

Точку компрессии задают соответствующим уровнем входного сигнала (input compression point P1dB in). Иногда указывают и уровень выходного сигнала в этой точке (output compression point – P1dB out). Чем больше значение сигнала в точке компрессии, тем выше линейность 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):

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}, \quad (4.3)$$

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 соот-

ношению уровней только 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. 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 пересечения АХ по первой гармонике и АХ второй гармоники. Такой обобщенный параметр нелинейности называют *точкой пересечения второго порядка* (SOI – Second-Order Intercept Point или SHI – Second Harmonic Intercept). Иными словами, точка пересечения SHI – это точка на АХ 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 дБм (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.

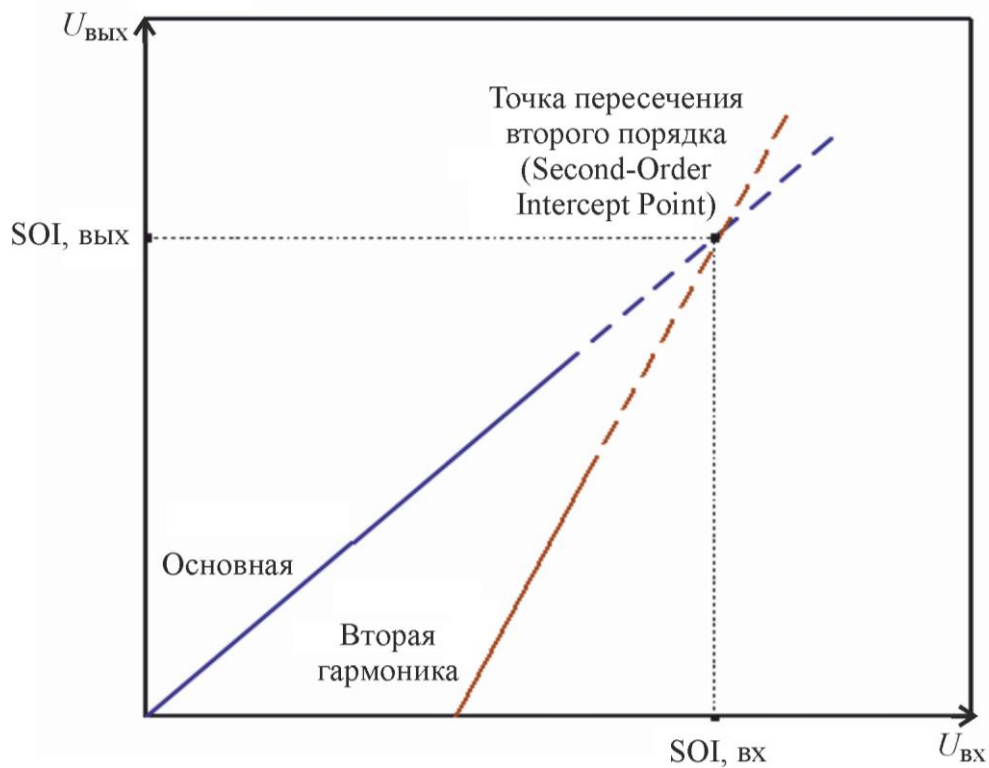


Рис. 4.4. Точка пересечения второго порядка

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 минимальному уровню, соответствующему чувствительности усилителя. Таким образом, снизу динамический диапазон ограничен уровнем собственных шумов устройства, сверху – проявляющимися нелинейными эффектами.

### 4.3. Описание лабораторной установки

В лабораторной работе исследуется монолитный интегральный усилитель ММІС АТ-RF3030-21 на микросхеме Mini-Circuits ERA-3. Усилитель имеет следующие паспортные параметры:

- усиление на частоте 2 ГГц – не менее 16 дБ;
- точка компрессии по выходу 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. 4.5. В ней предусмотрены развязывающие конденсаторы на входе и выходе, а также НЧ-фильтр для подачи напряжения питания. Напряжение питания Vcc подается на усилитель через ограничительный резистор, что позволяет использовать источник питания 12 В (но не более 15 В).

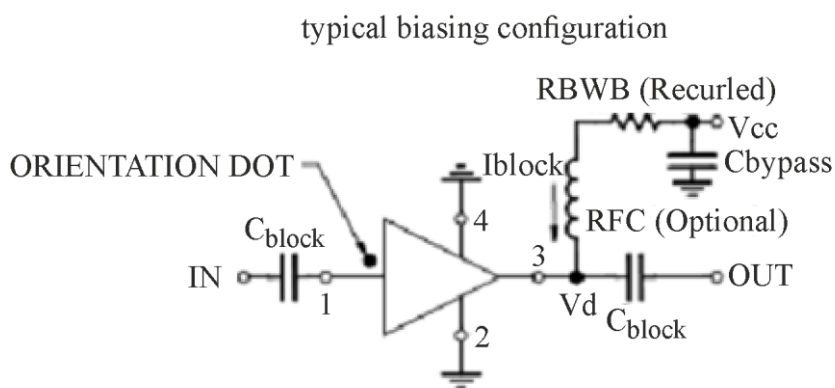


Рис. 4.5. Схема интегрального СВЧ-усилителя

Для исследования характеристик усилителя используется 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

дьюма,  $1024 \times 768$  пикселей. Сохранение данных и дистанционное управление прибором возможно по интерфейсам USB или LAN.

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  $\pm 0.7$  дБ;
- суммарная амплитудная погрешность  $\pm 0,5$  дБ (95 %);

Прибор имеет в составе следящий генератор, что позволяет измерять АЧХ в диапазоне частот от 10 МГц до 6 ГГц.

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 обеспечивает много режимов модуляции, имеет сенсорный ЖК-индикатор, обеспечивает связь с внешними устройствами по интерфейсам USB и LAN.

Для соединения элементов измерительного тракта лабораторной работы используются кабели N-Male – SMA-Male и коаксиальный переход SMA-Female – SMA-Female. На вход анализатора постоянно подключен фиксирован-

ный аттенюатор 10 дБ. Аттенюатор необходим для защиты входных цепей АС от перегрузок.

## 4.4. Задание и указания к выполнению работы

### 4.4.1. Измерение АЧХ транзисторного усилителя СВЧ

1. Соедините «на проход» переходом типа F-F кабели, идущие от портов **RF OUTPUT** и **RF INPUT** спектроанализатора. Включите питание спектроанализатора. Установите режим измерения АЧХ с помощью следящего генератора (Mode => Stimulus / Response) в частотном диапазоне 100...6000 МГц. Затем проведите калибровку (**Normalize => Continue**).

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 – «+»). Задайте отсчетный уровень (Reference Level) шкалы Y анализатора, равный 50 дБ. Для этого нажмите **AMPTD Y => Ref Level** и введите **50 dB**. На экране появится частотная характеристика коэффициента передачи усилителя в выбранном диапазоне частот. С помощью маркера (**Marker**) измерьте ее неравномерность (разницу максимального и минимального уровней в полном диапазоне частот) и коэффициент усиления на частоте 2 ГГц. Измерьте и сведите в таблицу данные АЧХ усилителя в 10-15 точках рабочего диапазона. Сфотографируйте и сделайте снимок экрана (**Print**) в файл на USB-накопителе. Сохраните численные данные АЧХ на USB-накопителе (**Save => Type => Measurements Result; Return => Save Now**). Формат файла данных – текстовый с расширением .xls.

#### 4.4.2. Измерение АХ и точки компрессии P1dB

1. Подключите вход усилителя к генератору АК ИП-3208. Включите генератор и установите на нем частоту 750 МГц, уровень сигнала, равный -30 дБм, модуляция сигнала отключена **MOD => Off**. Включите сигнал на выходе **RF ON/OFF => ON**,
2. Подключите выход усилителя к входу спектроанализатора.
3. На анализаторе спектра включите режим спектрального анализа (Mode => Spectrum Analyzer). Установите частотный диапазон 500...2500 МГц, полосы пропускания радио- и видеофильтров **BW => ResBW = 1 MHz**, **BW => VBW => Auto**. В этом режиме прибор автоматически выберет время анализа порядка 2.5 с.
4. Установите отсчетный уровень графика Ref level равным 10 дБм (**AMPTD => Ref Level = +10 dBm**), цену деления шкалы **Scale/div = 10 dB**.
5. Измерьте зависимость амплитуды первой и второй гармоники выходного сигнала от уровня входного сигнала. Для этого установите маркер на первую гармонику (750 МГц). Меняя уровень входного сигнала в пределах -30...+20 дБм с шагом 5 дБм, фиксируйте уровень первой гармоники. Результаты измерений сведите в таблицу 1.

Таблица 1

$P_{in}$ , дБм	$P_{F1}$ , дБм	$P_{F2}$ , дБм
-30		
-25		
...		
+20		

6. Определите точку, где АХ отклоняется от линейной зависимости на 1 дБ (однодецибелная точка компрессии P1d, рис. 4.3). Для этого в окрестности предполагаемой точки компрессии (-10 ... 0 дБм) увеличивайте входную мощность с шагом 1 дБм, фиксируя приращение выходной мощности. Занеси-

те результаты в таблицу 1. Сравните результат измерения P1dB с паспортным значением.

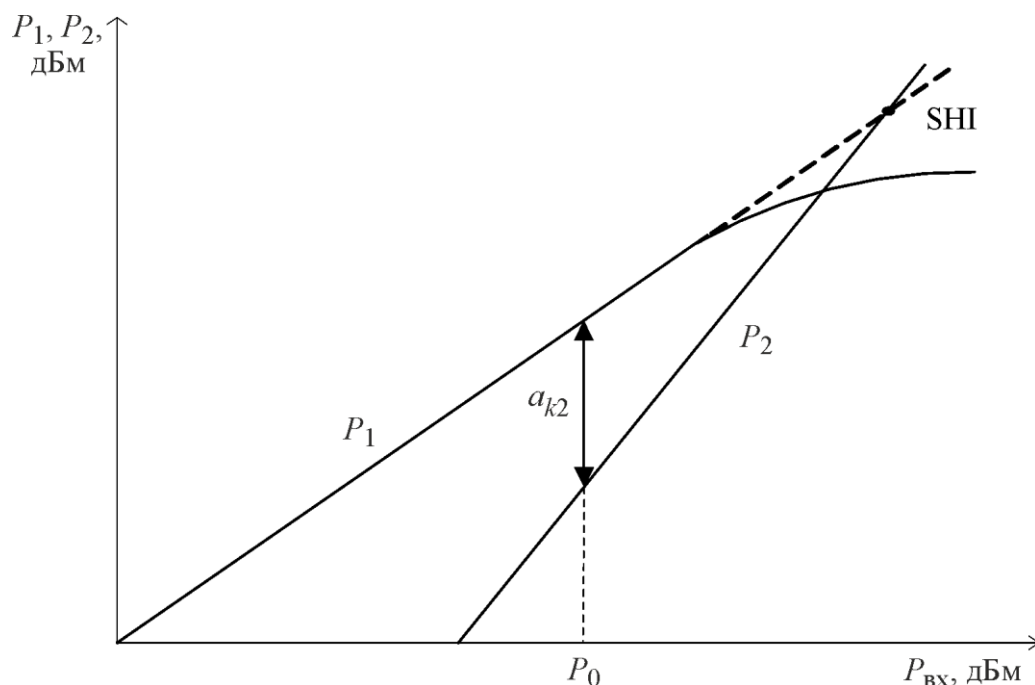


Рис. 4.6. Определение точки пересечения со второй гармоникой

7. Повторите измерения амплитудной характеристики для второй гармоники (частота которой 1,5 ГГц). Результаты сведите в таблицу 1.

8. По результатам измерений постройте амплитудную характеристику по первой и второй гармонике (зависимость от амплитуды гармоники от входного сигнала), рис. 4.6.

9. Аппроксимируйте зависимости прямыми линиями и определите точку пересечения SHI (точку пересечения второго порядка, рис. 4.6) следующим способом. Выберите уровень входного сигнала  $P_0$  в центре измеренной зависимости  $P_2(P_{вх})$  и определите разницу 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]:

10. Рассчитайте значение точки пересечения второй гармоники с первой по формуле (4.4).

$$SHI = P_1(P_0) + a_k = 2P_1(P_0) - P_2(P_0) \quad (4.4)$$

### 4.4.3. Измерение фазового шума выходного сигнала усилителя

(выполняется по указанию преподавателя)

Качество гармонического сигнала можно оценить по его спектральной плотности мощности. В идеале она должна представлять собой дельта-функцию. Фактически она содержит шумовой пьедестал, спадающий по уровню по мере отстройки от частоты несущего колебания. Уровень шума является мерой кратковременной нестабильности фазы сигнала и измеряется с помощью анализатора спектра. Вид спектрограммы гармонического сигнала (сигнала «несущей» мощности  $P_n$ ) с фазовыми шумами приведен на рис. 4.7.

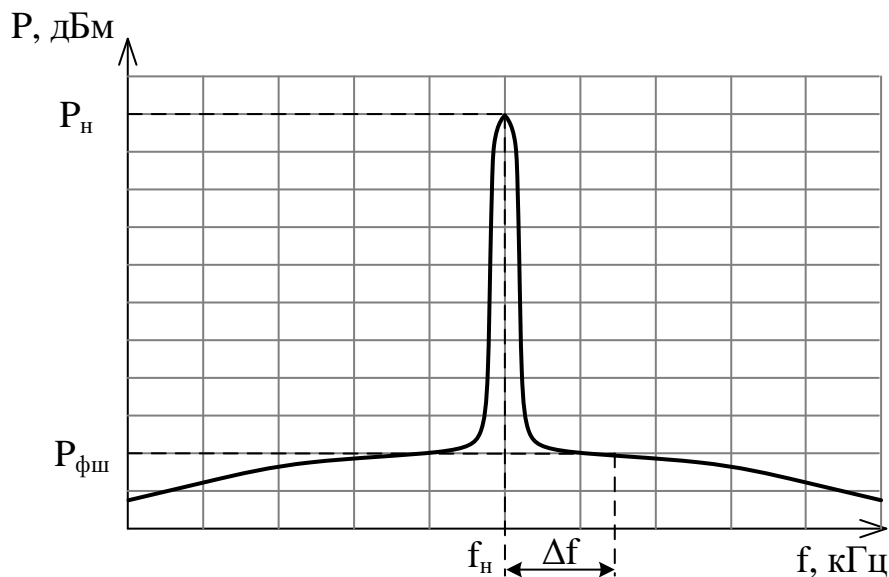


Рис. 4.7. Спектрограмма фазового шума выходного сигнала усилителя

Численно уровень фазового шума оценивают его мощностью  $P_{\text{фш}}$ , измеренной при заранее заданной отстройке  $\Delta f$  относительно несущего колебания. Эту мощность относят к мощности несущего колебания  $P_n$  и выражают в логарифмических единицах дБн (дБ относительно несущей)

$$\Delta P_{\text{фш}} = 10 \lg(P_{\text{фш}} / P_n), \text{ дБн} \quad (4.5)$$

Таким образом, оценка уровня фазового шума с помощью анализатора спектра сводится к измерению уровня несущего колебания  $P_n$  и измерению уровня фазового шума  $P_{\text{фш}}$  при заданной отстройке относительно несущей  $\Delta f$ . Если измерение уровня шума производилось при полосе пропускания

УПЧ анализатора спектра (RBW), не равной 1 Гц, то результат измерения уровня шума надо привести к единичной полосе пропускания, получив, тем самым, спектральную плотность мощности шума  $W_{фш}$ :

$$\begin{aligned} W_{фш} &= \Delta P_{фш}[\text{дБн}] - 10\lg(\text{RBW}[\text{Гц}]) = \\ &= P_{фш}[\text{дБм}] - P_{н}[\text{дБм}] - 10\lg(\text{RBW}[\text{Гц}]), \text{ дБн} / \text{Гц} \end{aligned} \quad (4.6)$$

В лабораторной работе исследуется фазовый шум сигнала генератора АКПП-3208, прошедшего через усилитель СВЧ. Порядок работы следующий:

1. Установите уровень сигнала на выходе генератора +10 дБм при частоте 750 МГц. Включите сигнал на выходе **RF** => **ON**, модуляция сигнала отключена **MOD** => **Off**.

2. Установите центральную частоту спектроанализатора 750 МГц (**Freq Channel** => **Center Freq** = 750 MHz); полосу анализа – 1 МГц (**Span X Scale** => **Span** => **1 MHz**); полосу пропускания фильтра ПЧ (RBW) ~ 500 Гц (**BW** => **ResBW** = **500 Hz**) ; полосу пропускания видео фильтра – 1 Гц (**BW** => **VideoBW** = **1 Hz**).

3. Установите отсчетный уровень графика спектрограммы Ref level равным +20 дБм (**AMP TD** => **Ref Level** = +20 dBm), цену деления шкалы **Scale/div** = 20 dB. На экране должен наблюдаться отклик сигнала генератора с шумовым пьедесталом (рис. 4.7).

4. Уточните центральную частоту спектроанализатора. Для этого отключите все маркеры (**Marker** => **Off**) и вновь установите маркер на вершину отклика сигнала, используя кнопку **Peak Search**. Затем сместите центральную частоту анализа на частоту маркера (**Marker** → => **Mkr** -> **CF**). Сохраните скриншот полученной спектрограммы согласно указаниям п. 4.4.1.

5. Отключите выходной сигнала генератора (кнопкой **RF ON/OFF**). Запишите средний уровень собственного шума спектроанализатора при отключенном сигнале генератора. Затем включите выходной сигнала генератора (кнопкой **RF ON/OFF**).

6. Измерьте уровень сигнала несущей  $P_n$  в нормальном режиме работы маркера (**Marker => Normal**). Результат занесите в таблицу 2.

Таблица 2

	RBW=500 Гц		RBW=5000 Гц	
$P_n$ , дБм				
$\Delta f$ , кГц	$\Delta P_{\text{фш}}$ , дБн	$W_{\text{фш}}$ , дБн/Гц	$\Delta P_{\text{фш}}$ , дБн	$W_{\text{фш}}$ , дБн/Гц
10 кГц				
100 кГц				
200 кГц				

8. Включите дельта-маркер (**Marker => Delta**). В данном режиме прибор показывает разность амплитуд и частот между маркером **1** несущей частоты и дельта-маркером  **$\Delta 1$** . Разность частот (отстройка по частоте) между точками **1** и  **$\Delta 1$**  обозначается  **$\Delta MKR1$** . Перемещение маркера  **$\Delta 1$**  осуществляется при помощи колесика на передней панели анализатора спектра.

9. Измерьте относительный уровень фазового шума  $\Delta P_{\text{фш}}$  [дБн], равный разности уровней дельта-маркера и основного маркера, при отстройках 10 кГц, 100 кГц, 200 кГц. Рассчитайте спектральную плотность мощности фазового шума по формуле (4.6). Результаты измерения и расчета занесите в таблицу 2.

10. Установите полосу пропускания фильтра ПЧ (RBW)  $\sim 5$  кГц (**BW => ResBW = 5 kHz**) и повторите измерения при тех же отстройках.

11. Постройте на одном графике зависимости относительной мощности шума  $\Delta P_{\text{фш}}(\Delta f)$ , дБн при RBW = 500 Гц и 5 кГц. Найдите разницу между ними и дайте теоретическое обоснование такой разнице. На другом графике постройте зависимости уровня спектральной мощности шума  $W_{\text{фш}}(\Delta f)$  при тех же значениях RBW. Сделайте выводы по полученным результатам.

#### 4.5. Обработка данных

Для обработки численных данных, сохраненных спектроанализатором, необходимо установить в региональных настройках на панели управления Windows десятичный разделитель “.” вместо “;”. Это важно для правильного импорта числовых данных из текстового формата в Microsoft Excel. После чего можно открывать сохраненные файлы данных, соглашаясь на неизвестный формат. Если конвертация текста в числа прошла неудачно, то проверьте еще раз региональные настройки, либо сделайте автозамену в тексте документа “.” => “;”.

#### 4.6. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- протокол измерений;
- структурную схему лабораторной установки в режиме измерения АЧХ;
- структурную схему лабораторной установки в режиме измерения АХ и точки компрессии;
- таблицу данных и построенный в Excel график АЧХ усилителя;
- коэффициент усиления, измеренный на частоте 2 ГГц и неравномерность АЧХ в диапазоне измерения; Сравнение коэффициента усиления с паспортным значением;
- график амплитудных характеристик по первой и второй гармонике (рис. 4.6);
- значение измеренной однодецибельной точки компрессии P1dB и сравнение его с паспортным значением;
- результат расчета точки пересечения SHI (точки пересечения второго порядка);
- снимки экрана спектрограммы при измерении фазового шума с различной полосой фильтра RBW;

- графики относительной мощности шума и спектральной плотности мощности шума, построенные на основании данных измерений; Сравнение данных, полученных при разных значениях полосы пропускания (RBW);
- выводы по лабораторной работе.

#### 4.7. Контрольные вопросы

1. Чем широкополосная схема СВЧ транзисторного усилителя отличается от аналогичного блока НЧ или ВЧ устройства?
2. Какими рабочими параметрами характеризуют усилители СВЧ?
3. Какие параметры СВЧ усилителей необходимо измерять, чтобы охарактеризовать их нелинейность?
4. Что характеризует однодецибелльная точка компрессии?
5. Как измеряют точку пересечения второго порядка транзисторного усилителя СВЧ?
6. Чем определяется чувствительность усилителя СВЧ? Как ее измеряют?
7. Что такое «динамический диапазон» усилителя? Чем он ограничен сверху, снизу?
8. Как использовать спектроанализатор без следящего генератора для измерения АЧХ усилителя? Что такое «следящий генератор» спектроанализатора и для чего его применяют?
9. Чем отличается режим работы спектроанализатора со следящим генератором (Stimulus/Response) от обычного (Spectrum Analyzer)? В каких случаях необходимо использовать тот, или иной режим?
10. Что такое отсчетный уровень на спектрограмме? Из каких соображений выбирается его значение?
11. Для чего используют внешние фиксированные аттенюаторы при измерениях спектроанализатором? Как изменится результат измерения амплитуды гармонической составляющей при подсоединении внешнего фиксированного аттенюатора?
12. В каких единицах измеряется относительный уровень фазового шума? Как пересчитать эти единицы в мВт?
13. Как измерить спектральную плотность мощности шума? Как изменится эта величина при увеличении мощности несущей в 2 раза?

## 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. Лавренко Ю.Е., Грачев С.В. Устройства СВЧ: конспект лекций. Спб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. -92с
6. Хелзайн Пассивные и активные цепи СВЧ. –М.: Радио и связь, 1981.- 200с.
7. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1981 -295с.
8. Микроэлектронные устройства СВЧ. Под ред. Г.И. Веселова, 1988-280с.

## Оглавление

4. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ СВЧ	2
4.1. Общие сведения об усилителях СВЧ	2
4.2. Рабочие параметры усилителей СВЧ	5
4.3. Описание лабораторной установки	10
4.4. Задание и указания к выполнению работы	13
4.4.1. Измерение АЧХ транзисторного усилителя СВЧ	13
4.4.2. Измерение АХ и точки компрессии P <sub>1dB</sub>	14
4.4.3. Измерение фазового шума выходного сигнала усилителя	16
4.5. Обработка данных	19

4.6. Содержание отчета	19
4.7. Контрольные вопросы	21
Литература	22