

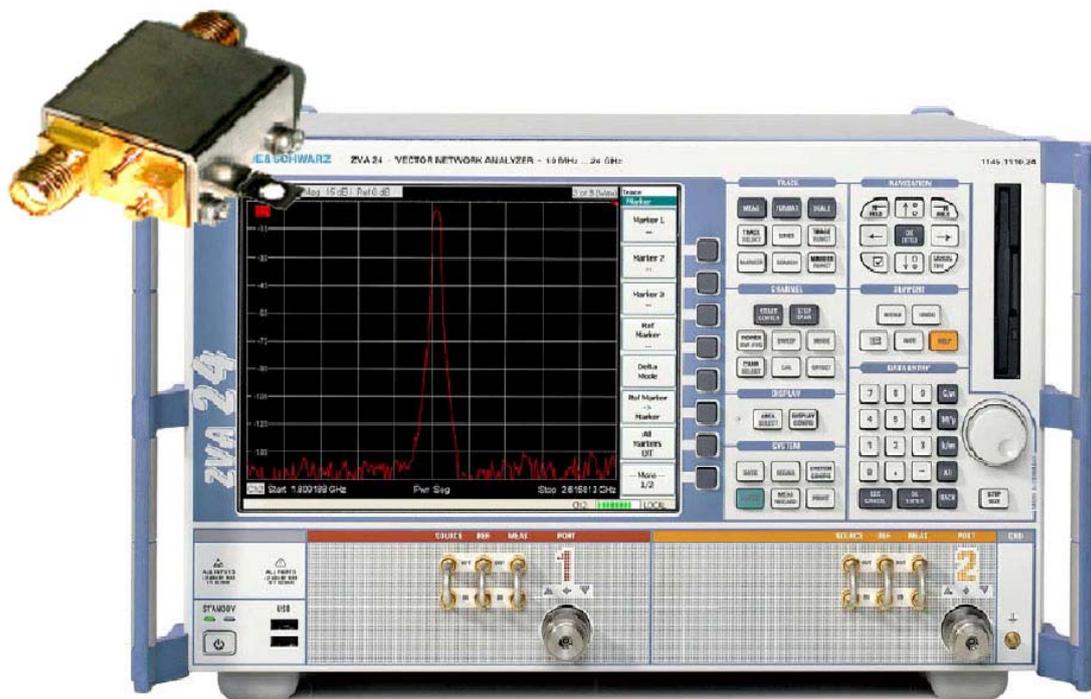


МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М. В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА РАДИОФИЗИКИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

ОПИСАНИЕ К ЗАДАЧЕ СПЕЦПРАКТИКУМА

“ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОТЕЛЬНОГО СВЧ УСИЛИТЕЛЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
RONDE-SCHWARZ ZVB-20 (ZVA-24)”



МОСКВА – 2007 г.

1 Введение

В задаче изучаются основные свойства усилителя СВЧ диапазона. Измеряются такие параметры усилителя как АЧХ, ФЧХ, S-параметры, КСВ, коэффициент гармоник, коэффициенты устойчивости и определяется точка компрессии.

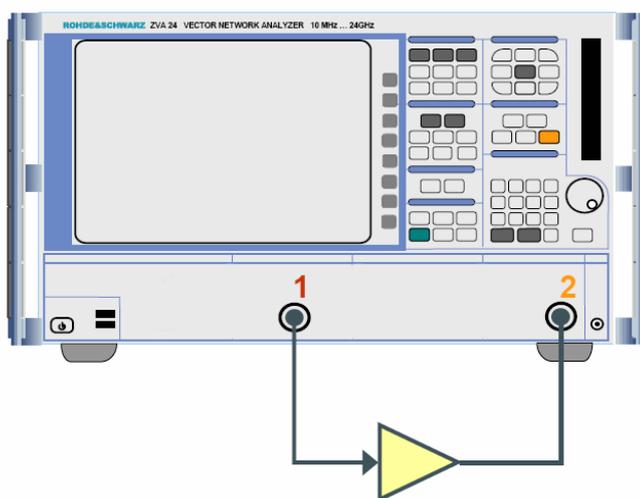


Рис. 1

Для измерения этих параметров применяется векторный анализатор цепей Rohde&Schwarz модель ZVB-20 либо ZVA-24 (в рамках данной задачи может быть применен любой из данных приборов, работа с ними идентична, далее коротко ZVB) с двумя независимыми портами, которые могут работать как в режиме приема сигнала, так и в режиме передачи.

ZVB имеет динамический диапазон 123 дБ, максимальную выходную мощность +13 дБм ($P[\text{дБм}] = 10\log_{10}P[\text{мВт}]$), диапазон свипирования (развертки) по мощности до 50 дБ и ширину полосы промежуточной частоты от 1 Гц до 500 кГц. Современный пользовательский интерфейс прибора построен на платформе “Windows XP” с мастерами и диалоговыми взаимодействиями.

2 Обзор основных характеристик усилителей СВЧ

Если амплитуды сигналов, действующих на входе устройства, значительно меньше предельно допустимых, то можно считать, что устройство работает в линейном режиме. Для количественной оценки свойств компонентов используется ряд общих малосигнальных РЧ параметров и характеристик, которые не учитывают нелинейные явления, возникающие в устройствах, такие как АЧХ и ФЧХ.

АЧХ (Амплитудно-частотная характеристика) - Зависимость коэффициента передачи (для усилителя – коэффициента усиления) от частоты сигнала.

ФЧХ (Фазочастотная характеристика) – Зависимость разности фаз между выходным и входным сигналами усилителя, т.е. вносимого усилителем сдвига фаз, от частоты.

Одними из основных характеристик усилителей являются S-параметры. Они подразделяются на четыре вида:

S_{11} – коэффициент отражения сигнала на входе устройства;

S_{22} – коэффициент отражения на выходе;

S_{21} – коэффициент передачи;

S_{12} – коэффициент изоляции.

Рассмотрим каждый s-параметр подробнее.

2.1 Коэффициент отражения

В случаях, когда импеданс источника сигнала (выходное сопротивление) не согласован с импедансом входа усилителя, часть сигнала отражается от входа, что значительно снижает КПД системы. ZVB способен измерять коэффициент отражения на входе устройства. Это возможно благодаря внутреннему рефлектометру на обоих измерительных портах, которые включаются на прием для измерения как падающего сигнала (a_1) и так же для отраженного сигнала (b_1).

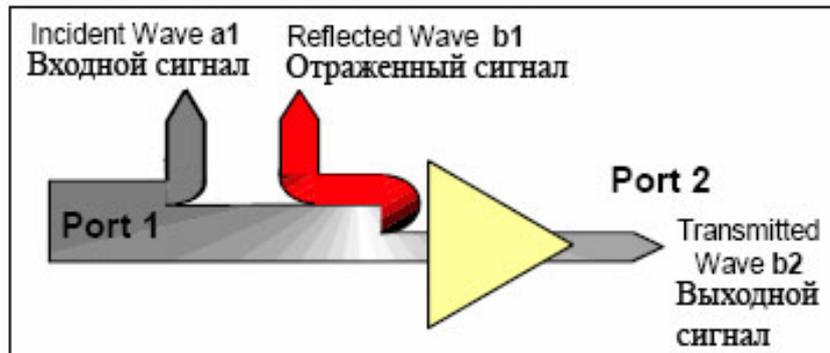


Рис. 2

Этот измеряемый параметр выводится на анализаторе цепей как S-параметр, S_{11} который равен отношению мощности отраженного сигнала b1 к мощности падающего a1:

$$\underline{S}_{11} = \frac{\underline{b}_1}{\underline{a}_1} \Big|_{a_2=0}$$

Этот S-параметр называется коэффициентом отражения, это комплексная величина и может быть представлена различными способами для вывода результата. Комплексность величины означает, что она несет в себе информацию не только об отношении амплитуд, но и сдвиге фаз между набегающей и отраженной волнами.

Потери отражения на входе (возвратные потери, Return Loss) в децибелах вычисляются как десятичный логарифм от модуля коэффициента отражения:

$$\text{Return Loss} = -20 \log(\rho), \quad \rho = |S_{11}|$$

Пример, как это выглядит на экране ZVB:

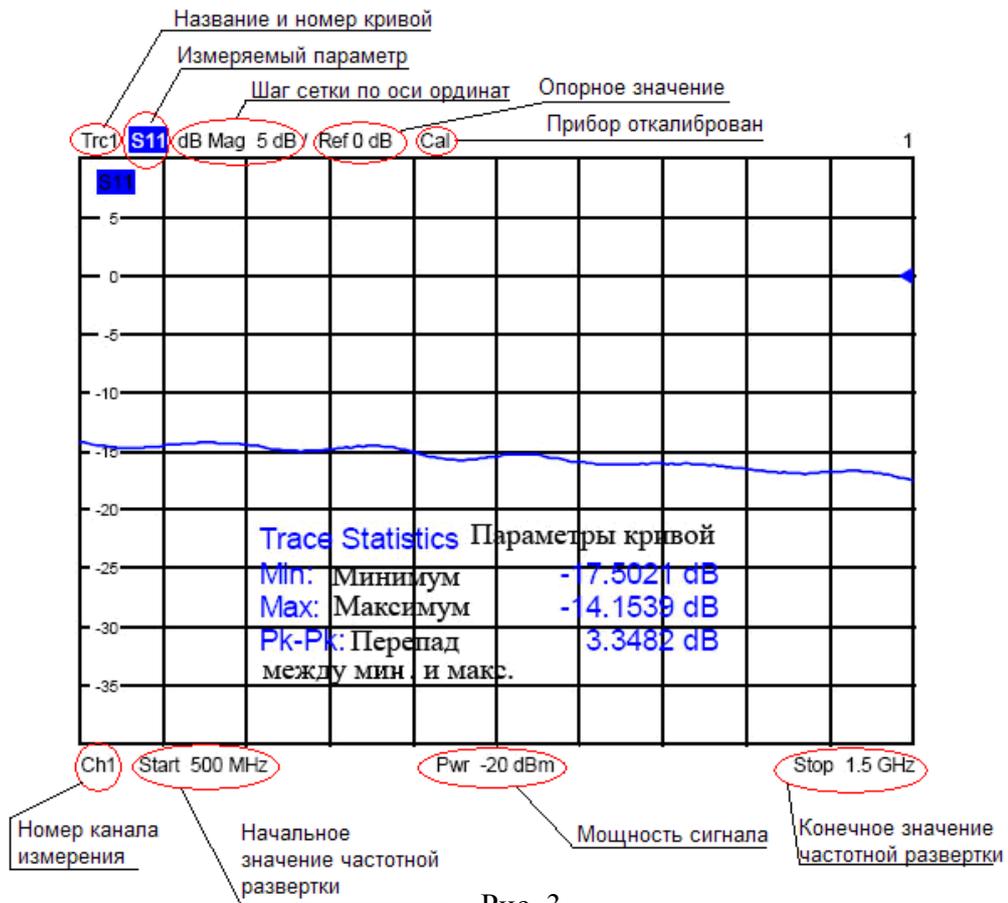


Рис. 3

При измерениях чаще определяется не коэффициент отражения, а так называемый коэффициент стоячей волны – КСВ. Это отношение максимального значения стоячей волны (в пучности) к минимальному (в узле).



Рис.4 Измерительная линия

Для измерения КСВ используются так называемые измерительные линии. Волноводная измерительная линия, схематически показанная на рисунке, представляет собой отрезок волновода, внутрь которого через узкую щель в средней части широкой

стенки введен зонд – штыревая антенна, сигнал с которого поступает на детектор. Обычно в качестве детектора используется диод. Напряжение, возникающее на зонде, пропорционально напряженности поля в той области волновода, куда он помещен. Зонд может перемещаться вдоль волновода, причем его координата фиксируется точным отсчетным устройством. Сигнал, снимаемый с детектора, обычно

пропорционален квадрату напряжения на зонде. КСВН (коэффициент стоячей волны по напряжению) равен:

$$КСВН = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + \rho}{1 - \rho}$$

При идеальном согласовании – отражений нет: КСВ=1, при полном рассогласовании – вся энергия отражается: КСВ→∞.

Бывает, что необходимо комплексное представление коэффициента отражения, для этого применяются диаграммы Вольперта-Смита. Это круговые диаграммы, на которых комплексный коэффициент отражения S_{11} строится в нормализованном виде относительно волнового сопротивления системы.

Диаграмма Вольперта-Смита является удобным и часто используемым инструментом для наглядного отображения комплексных величин (импедансов, S-параметров и др.), расчета цепей согласования, определения устойчивости систем.

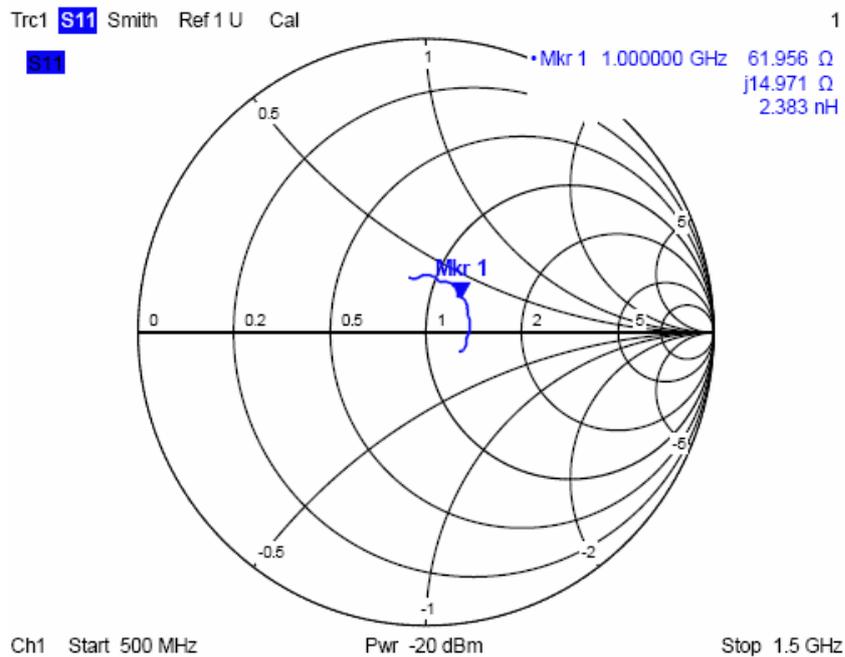


Рис. 5

Масштаб круговых диаграмм является нелинейным. Линии сетки соответствуют точкам постоянного активного и постоянного реактивного сопротивлений. Точки с одинаковым активным сопротивлением располагаются по окружностям. Точки с одинаковым реактивным сопротивлением образуют набор дуг разной кривизны. Все

значения сопротивлений нормированы относительно некоторого волнового импеданса системы Z_0 , как правило, 50 Ом.

На круговой диаграмме линии сетки устроены таким образом, что область положительных активных сопротивлений отображается в виде единичной окружности. Центральная горизонтальная ось соответствует нулевому реактивному сопротивлению (чисто активное сопротивление). Центр диаграммы представляет собой $Z/Z_0 = 1$, которая соответствует волновому импедансу системы (режим согласования, нулевой коэффициент отражения). В левой и правой точках пересечения горизонтальной оси с внешней окружностью импеданс равен нулю (режим КЗ – короткого замыкания) и бесконечности (режим ХХ – холостого хода) соответственно. Внешняя окружность соответствует нулю активного сопротивления (чисто мнимое сопротивление). Верхняя и нижняя половины диаграммы соответствуют положительным (индуктивный характер) и отрицательным (емкостной характер) реактивным сопротивлениям соответственно.

2.2 Коэффициент передачи

Коэффициент передачи вычисляется как отношение мощности сигнала на выходе (b2) устройства к мощности сигнала на входе (a1).

$$\underline{S}_{21} = \left. \frac{\underline{b}_2}{\underline{a}_1} \right|_{a_2=0}$$

Коэффициент передачи является комплексной величиной, он содержит в себе информацию как об отношении амплитуд, так и сдвиге фаз входного и выходного сигналов.

Для усилителей коэффициент усиления вычисляют как логарифм от модуля коэффициента передачи:

$$Gain(dB) = 20 \log |S_{21}|$$

2.3 Коэффициент изоляции

ZVB так же способен проводить обратное измерение, сигнал на усилитель может быть подан на Port2 (выход усилителя) и будет найден обратный коэффициент передачи:

$$\underline{S}_{12} = \left. \frac{\underline{b}_1}{\underline{a}_2} \right|_{a_1=0}$$

Модуль S_{12} называется коэффициентом изоляции и характеризует защищенность входа усилителя от паразитных сигналов, наведенных на выход усилителя:

$$\text{Isolation(dB)} = -20 \text{ Log}|S_{12}|$$

Пример диаграммы на экране ZVB для коэффициента передачи S_{21} и коэффициента изоляции S_{12} :

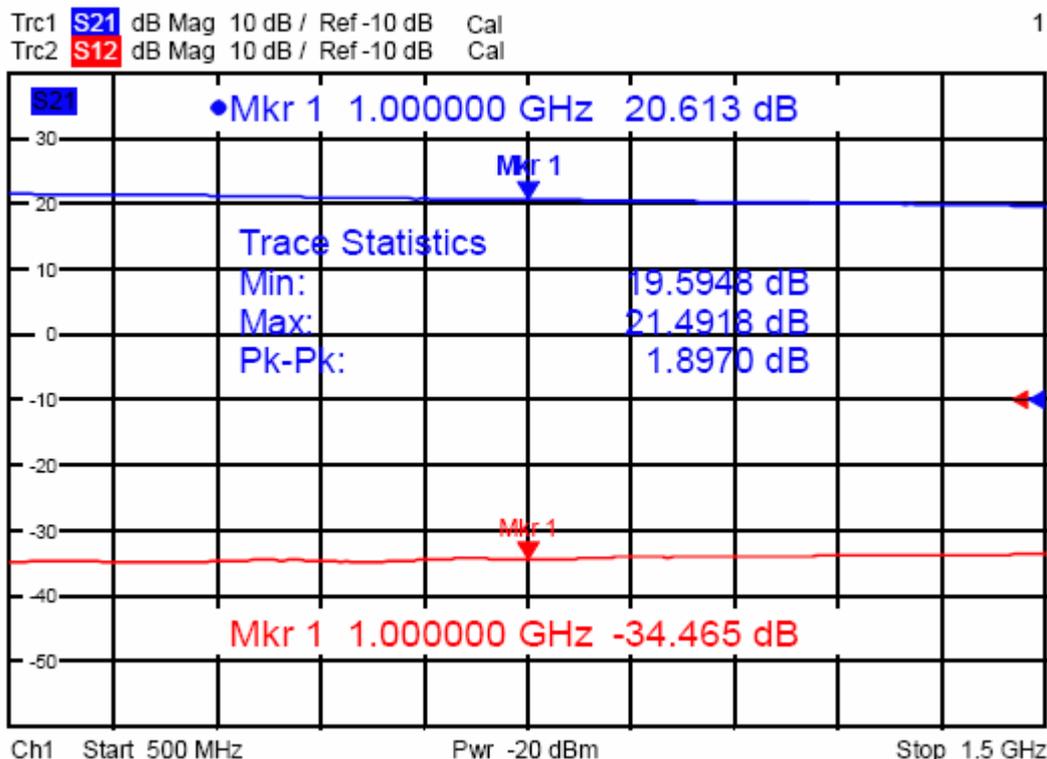


Рис. 6

2.4 Коэффициенты устойчивости

В каскадах усилителей бывает велико влияние внутренних связей и емкостей. Это проявляется в ограничении полосы пропускания и склонности усилителя к самовозбуждению (переходу в режим генерации), вероятность которого тем больше, чем выше коэффициент усиления. Для его оценки существуют коэффициенты устойчивости: K , μ_1 и μ_2 . Они являются действительными функциями (комплексных) S -параметров, определяются следующим образом:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}|^2}{2|S_{12}S_{21}|}$$

$$\mu_1 = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{22} - \bar{S}_{11}(S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21})| + |S_{12}S_{21}|}$$

$$\mu_2 = \frac{1 - |S_{22}|^2}{|S_{11} - \bar{S}_{22}(S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21})| + |S_{12}S_{21}|}$$

где \bar{S}_{ij} обозначает комплексно-сопряженную величину относительно S_{ij} .

K-фактор обеспечивает необходимое условие безусловной устойчивости: Цепь является безусловно устойчивой, если **K**>1 и удовлетворено дополнительное условие. Дополнительное условие проверяется с помощью коэффициентов устойчивости μ_1 и μ_2 .

Коэффициенты μ_1 и μ_2 вместе обеспечивают необходимое и достаточное условие для безусловной устойчивости: Оба условия $\mu_1 > 1$ или $\mu_2 > 1$ являются эквивалентами безусловной устойчивости. Это означает, что μ_1 и μ_2 обеспечивают непосредственное понимание степени устойчивости или потенциальной неустойчивости линейных цепей.

2.5 Коэффициент гармоник

При подаче на вход любого нелинейного устройства синусоидального сигнала на его выходе появляются высшие гармоники (кратные частоты) основного сигнала, и происходит искажение формы входного сигнала. Это происходит из-за нелинейности вольт-амперных характеристик используемых полупроводниковых элементов. Вид сигнала на выходе, амплитуды и соотношение гармонических составляющих зависят от характера нелинейности тестируемого устройства.

Возникающие на выходе нелинейного устройства гармоники полезного сигнала **f1** отстоят достаточно далеко от основного сигнала и могут быть при необходимости отфильтрованы полосовым фильтром, как показано на рисунке.

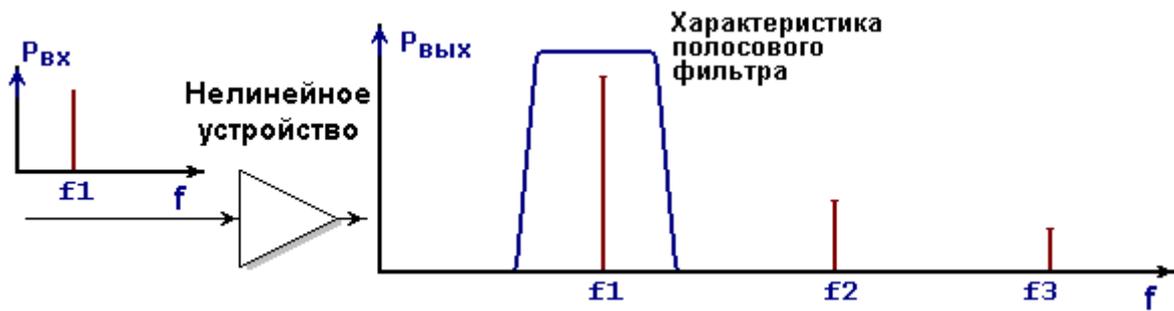


Рис. 7

Гармонические искажения являются одним из основных типов искажений в работе радиоэлектронных устройств. Количественно они оцениваются коэффициентом гармоник (нелинейных искажений), который определяется по следующей формуле:

$$K_2 = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \times 100\%,$$

где U_i - действующее значение напряжения соответствующей гармоники сигнала.

2.6 Коэффициент интермодуляционных искажений

Если на входе нелинейного устройства присутствуют два или более гармонических сигнала, на его выходе возникают интермодуляционные искажения.

Интермодуляция (*Intermodulation*) - явление возникновения на выходе устройства паразитных сигналов (комбинационных частот) при действии на его входе двух или более достаточно мощных сигналов.

В результате взаимодействия сигналов на нелинейных элементах, в конечном итоге, на выходе устройства возникают интермодуляционные продукты вида $\pm mf1 \pm nf2$.

Каждая из интермодуляционных составляющих может быть охарактеризована ее порядком, который равен сумме чисел $m+n$.

При этом на выходе устройства может получаться паразитный сигнал с частотой, равной частоте полезного сигнала или попадающей в полосу пропускания устройства, как это показано на рис.8. Такие помехи обрабатываются в устройстве совместно с полезным сигналом, ухудшая качество выходного сигнала.

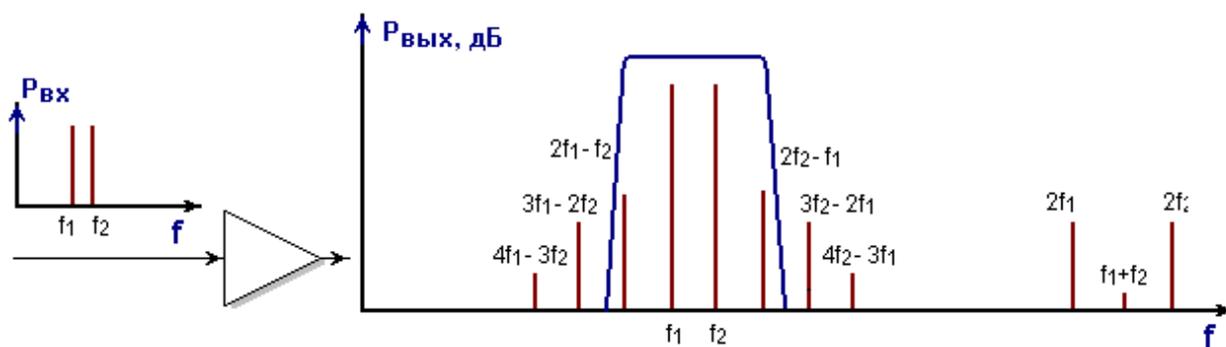


Рис. 8

Коэффициент интермодуляционных искажений показывает мощность продуктов искажений относительно мощности основного сигнала в процентах.

2.7 Коэффициент шума

Каждый элемент радиотехнической системы в большей или меньшей степени генерирует электрический шум. Электроны в проводнике находятся в хаотическом температурном движении, поэтому на каждом сопротивлении, в каждом проводящем канале полевого транзистора возникает так называемый *температурный (тепловой) шум* сопротивления – белый шум, который равномерно распределен по всем частотам. Статистический характер тока, текущего через р-п потенциальный барьер в полупроводниковых диодах и транзисторах, приводит к образованию так называемого *дробового шума*. Генерация и рекомбинация электронов и дырок в полупроводнике также имеет случайный характер и создает так называемый *шум генерации-рекомбинации*. При исследовании шумов в любой радиотехнической системе, все шумы, возникающие в отдельных элементах сети – усилителях, конверторах, кабелях, пассивных элементах – учитываются введением универсального параметра, определяемого для каждого элемента – так называемого *коэффициента шума* прибора. Коэффициент шума определяется, как показатель ухудшения отношения сигнал/шум на выходе прибора по сравнению с этим отношением на его входе. Т.е.:

$$F = \frac{(C/N)_{in}}{(C/N)_{out}}$$

Или, в логарифмических единицах (дБ):

$$F_{(lg)} = 10 \lg \frac{(C/N)_{in}}{(C/N)_{out}}$$

2.8 Точка компрессии

Точка компрессии является мерой верхней границы диапазона линейности нелинейного устройства. Линейность устройства наглядно можно представить, построив график зависимости уровня сигнала на выходе устройства от уровня сигнала на входе, т.е. его *амплитудную характеристику*. Масштаб по осям графика выбирается логарифмическим, для построения используют уровни сигнала, выраженные, как правило, в дБм.

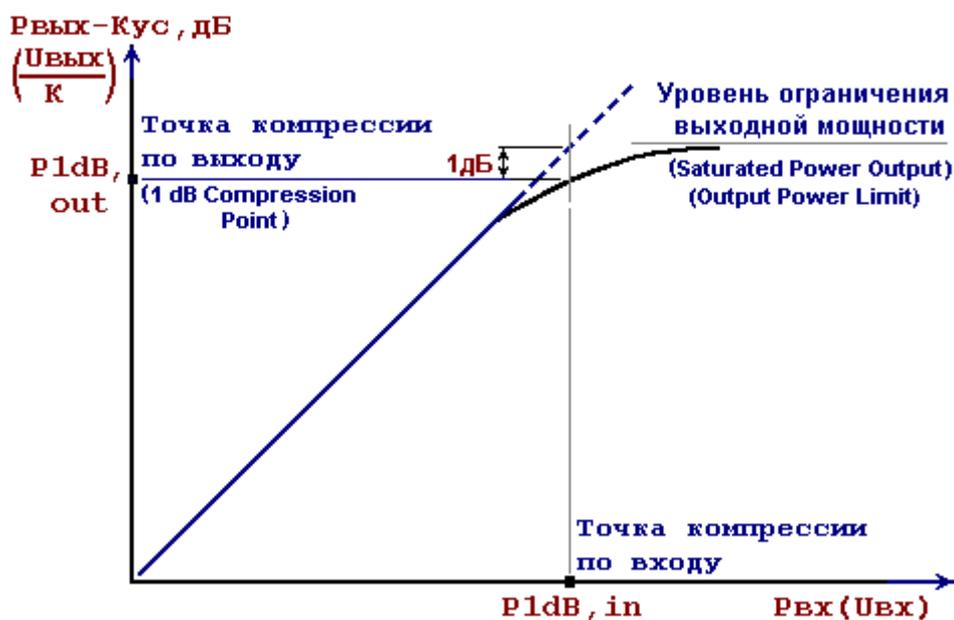


Рис. 9

По горизонтальной оси отложены уровни входных сигналов, по вертикальной — уровни выходных сигналов, приведенные ко входу, т.е. поделенные на коэффициент усиления устройства K . При использовании логарифмических величин вместо деления производится вычитание. В этом случае устройство как бы имеет коэффициент передачи, равный 1, или 0 дБ.

Если подать на вход устройства сигнал достаточно большого уровня, реальная характеристика будет отклоняться от прямой из-за проявляющейся нелинейности устройства.

Точка, где отклонение амплитудной характеристики устройства от идеальной составляет 1 дБ, называется точкой компрессии, или однодецибельной точкой компрессии (*1-dB compression point, P1dB*). Количественно эта точка характеризуется соответствующей величиной выходного сигнала (реже входного) и является верхней границей линейного участка амплитудной характеристики.

3 Описание векторного анализатора цепей ZVB-20

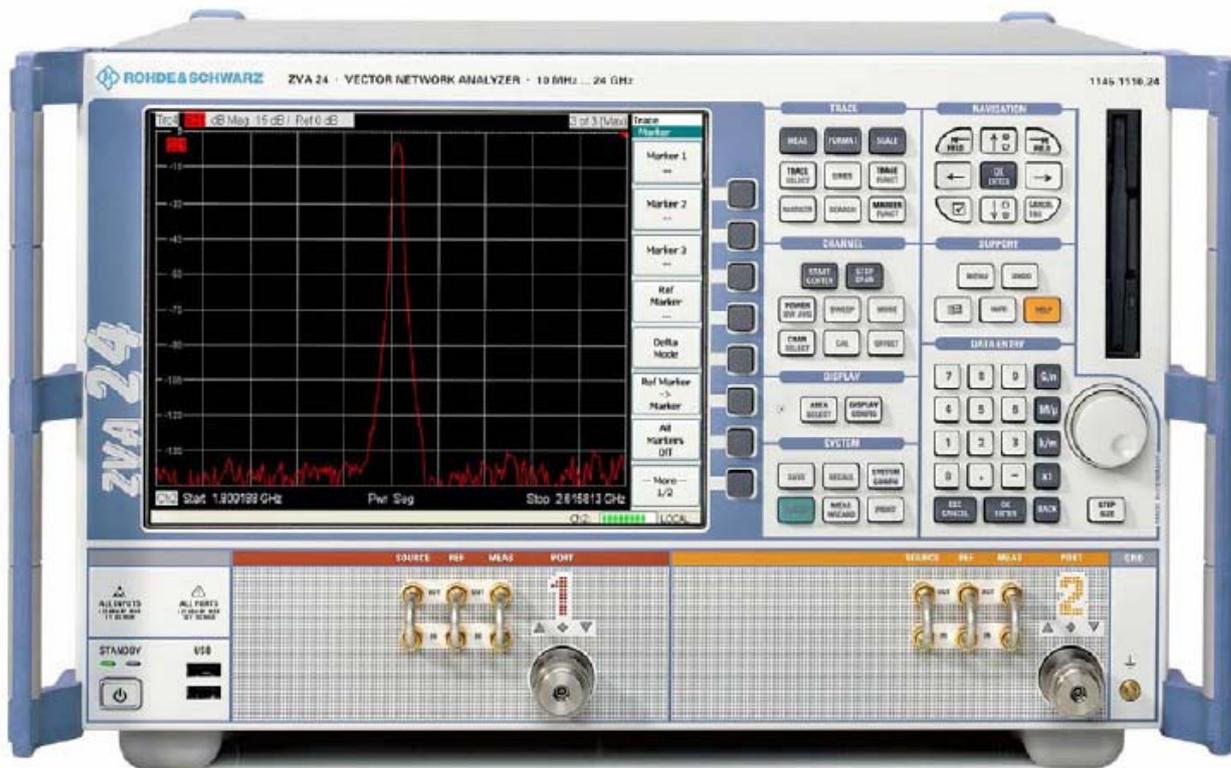


Рис. 10

На передней панели анализатора цепей находятся: VGA-дисплей с панелью функциональных клавиш, клавишные панели и область измерительных портов. Ниже приводится краткое описание органов управления, разъемов и клавишных панелей.

Анализатор снабжен встроенным цветным графическим дисплеем, на который выведены в экранной форме многие элементы управления прибором и окна графиков для отображения результатов.

На передней панели анализатора расположен дисковод 3.5" и разъемы USB. Их можно использовать для переноса данных (результатов) из анализатора.

3.1 Клавиши настройки



Клавиши с клавишных панелей **TRACE** (КРИВАЯ), **CHANNEL** (КАНАЛ) и **DISPLAY** (ЭКРАН) позволяют настраивать соответствующие их названиям параметры анализатора. Каждая из клавиш соответствует выпадающему меню или команде меню графического интерфейса пользователя.

Клавиши клавишной панели **TRACE** открывают доступ ко всем параметрам кривой и функциям выбора, настройки и сохранения различных кривых. Кроме того, меню открывает доступ к функциям маркера, поиска и функции проверки пределов.

- Клавиша **MEAS** (ИЗМЕРЕНИЕ) позволяет выбирать измеряемый (и отображаемый) параметр.
- Клавиша **FORMAT** (ФОРМАТ) определяет формат отображения на экране данных измерения.
- Клавиша **SCALE** (МАСШТАБ) задает вид представления и масштабирование текущей кривой в окне диаграммы, выбранном в подменю Format.
- Клавиша **TRACE SELECT** (ВЫБОР КРИВОЙ) открывает доступ к функциям работы с кривыми и окнами диаграмм.
- Клавиша **TRACE FUNCT** (ФУНКЦИИ КРИВОЙ) позволяет сохранять полученные кривые в памяти и выполнять математические операции над кривыми.
- Клавиша **MARKER** (МАРКЕР) помещает *маркер* на кривую, настраивает свойства маркера и определяет формат численного значения отсчета. С помощью маркера можно производить численное считывание данных с любой точки кривой.
- Клавиша **SEARCH** (ПОИСК) позволяет использовать маркеры для поиска точек с определенными свойствами на кривой.
- Клавиша **MARKER FUNCT** (ФУНКЦИИ МАРКЕРА) позволяет настраивать поведение маркеров (поиск максимума, поиск минимума и др.).



Клавиши клавишной панели **CHANNEL** (КАНАЛ) открывают доступ ко всем параметрам измерительных каналов и функциям активации, изменения настроек и сохранения различных измерительных каналов.

- Клавиша **START CENTER** (СТАРТ ЦЕНТР) или **STOP SPAN** (СТОП ДИАПАЗОН) задает диапазон значений развертки в зависимости от типа развертки. Например, начальная и конечная частота, либо центральная частота и диапазон изменения частоты.
- Клавиша **POWER BW AVG** (МОЩНОСТЬ) задает мощность внутреннего источника сигнала, шаг ослабления аттенюаторов, полосу пропускания фильтров промежуточной частоты (ПЧ) и позволяет настроить функцию усреднения.
- Клавиша **SWEEP** (РАЗВЕРТКА) определяет параметры измерения, включая тип развертки, условия запуска измерений и периодичность измерений.
- Клавиша **MODE** (РЕЖИМ) открывает диалоговое окно **Port Configuration**, определяющее свойства физических и логических (симметричных) измерительных портов.

3.2 Клавиши навигации

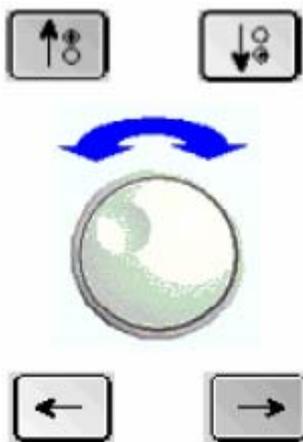


Клавиши клавишной панели **NAVIGATION** (НАВИГАЦИЯ) используются для перемещения курсора по экрану анализатора цепей и экрану справочной системы Help, и доступна к элементам управления на экране.

Клавиши **Left Field** (Левое поле = Tab) и **Right Field** (Правое поле = Shift Tab) позволяют переключаться между несколькими активными элементами управления в диалогах и окнах, например, для доступа ко всем:

- Элементам управления (кнопки, поля ввода числовых и символьных данных, селективные кнопки, опции, окна прокрутки и т.п.) в диалоговом окне;
- Ссылкам в статье справочной системы.

Клавиши **Cursor Up** (Курсор вверх) и **Cursor Down** (Курсор вниз) используются для:



- Прокрутки вверх и вниз соответственно в списках, например, пунктов выпадающего меню, в списках ключевых слов, в содержании справочной системы или в тексте статьи справки;
- Увеличения и уменьшения численного значения параметра.
- Клавиша **Cursor Up** (**Down**) становится недоступной при достижении начала (конца) списка. Нажатие

клавиши **Cursor Up** (**Down**) эквивалентно повороту ручки настройки вправо (влево).

Клавиши **Cursor Left** и **Cursor Right** используются для:

- Перемещения курсора в полях ввода влево и вправо соответственно;
- Открытия и закрытия подпунктов в содержании справочной системы;
- Перемещения по строке меню активного приложения.

Клавиша **OK ENTER** (ВВОД) используется для:



- Активации выбранного элемента управления, например, опции в диалоговом окне или ссылки в статье справочной системы;
- Подтверждения выбора и закрытия диалогового окна с активацией введенных значений.



Нажатие клавиши **OK ENTER** эквивалентно нажатию на ручку настройки или щелчку по экранной клавише **OK ENTER** с экранной клавишной панели **DATA ENTRY** (ВВОД ДАННЫХ).

Клавиша **CANCEL ESC** (ОТМЕНА) используется для:

- Закрытия диалоговых окон без активации введенных параметров
- Завершения работы со справочной системой.

Нажатие клавиши **CANCEL ESC** эквивалентно щелчку по экранной клавише **CANCEL ESC** с экранной клавишной панели **DATA ENTRY**.

3.3 Клавиатура ввода данных

Клавиши клавиатуры **DATA ENTRY** (ВВОД ДАННЫХ) используются для ввода цифровых значений и единиц измерения.

Клавиши от **0** до **9** служат для ввода соответствующих цифр.

Функция клавиш "." и "-" зависит от типа активного поля ввода.



- В поле ввода численных значений клавиши "." и "-" используются для ввода десятичной точки или смены знака числа соответственно. Использование нескольких десятичных точек при вводе чисел не допускается, повторное нажатие "." приведет к отмене первого ввода десятичной точки.

- В поле ввода символьной информации клавиши "." и "-" используются для ввода точки или дефиса соответственно. Оба символа можно использовать любое число раз.

Функция четырех клавиш ввода единиц измерения зависит от типа активного поля ввода.

В поле ввода численных значений клавиши **G/n**, **M/μ**, **k/m** приводят к вводу букв **G**, **M**, **K** соответственно. Нажатие **×I** эквивалентно нажатию **OK ENTER**. Такое нажатие подтверждает предшествующий ввод и закрывает поле ввода (или окно ввода).

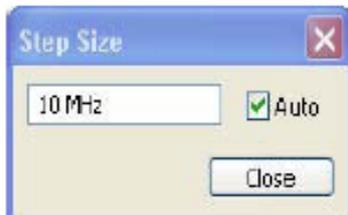


Клавиша **BACK** (НАЗАД) удаляет последний символ перед позицией курсора или выделенную последовательность символов. Если выделено численное значение целиком, то нажатие клавиши **BACK** перемещает курсор в позицию перед первым разрядом этого числа.

3.4 Ручка настройки



Ручка настройки используется для увеличения и уменьшения вводимых численных значений, перемещения курсора по таблице, последовательного перебора букв в строчном редакторе, активации элементов управления, подтверждения ввода (при ее нажатии).



Клавиша **STEP SIZE** (РАЗМЕР ШАГА) открывает окно ввода для выбора шага изменения активного параметра (в единицах измерения активного параметра) между двумя соседними положениями ручки настройки при увеличении или уменьшении численного значения с ее помощью.

4 Краткое техническое описание изучаемого усилителя ZX60-6013E+



Рис.11

В данной работе исследуется широкодиапазонный малошумящий усилитель ZX60-6013E+ фирмы “Mini-Circuits” (США). Он применяется в различных радиоэлектронных устройствах, как буферный усилитель, в сотовой, подвижной и других видах связи, в лабораториях, в измерительной технике.

- Габаритные размеры примерно 20x20x12 мм.
- Диапазон рабочих температур от -45 °С до 80°С.
- Напряжение питания 12 В.
- Максимальная выходная мощность 20 мВт.
- Для входа и выхода применены коаксиальные разъемы типа SMA.

5 Подготовка к работе анализатора цепей ZVB

Для включения прибора обратите внимание на светодиод переключателя Standby



на передней панели. Если он горит желтым цветом, то включен ждущий режим, нажмите переключатель **Standby** (Ожидание) для перехода в рабочий режим, при этом загорится светодиод зеленого цвета. Прибор готов к работе. Питание подается на все его модули, и система активирует процедуру загрузки.

После загрузки программы, установите мощность сигнала на выходе прибора **-30 dBm**, нажав кнопку **POWER BW AVG** и вращая ручку настройки против часовой стрелки.

ВНИМАНИЕ!

НЕ УСТАНАВЛИВАЙТЕ МОЩНОСТЬ СИГНАЛА НА ВЫХОДЕ АНАЛИЗАТОРА БОЛЕЕ 0 dBm. ПРЕВЫШЕНИЕ ЭТОГО ЗНАЧЕНИЯ ПРИВЕДЕТ К ВЫХОДУ ИЗ СТРОЯ ИССЛЕДУЕМОГО УСИЛИТЕЛЯ

Подключите первый порт анализатора к входу усилителя, обозначенному как “IN” на корпусе усилителя, а второй порт к выходу, обозначенному, как “OUT” и подайте питание на усилитель, подключив шнур блока питания к сети 220 В.

6 Измерение характеристик усилителя

Упражнение №1. Определение S-параметров и KСВ усилителя ZX60-6013E

1. Нажмите кнопку **PRESET** (сброс всех настроек).
2. Установите мощность сигнала на выходе прибора **-10 dBm**, нажав кнопку **POWER BW AVG** и вращая ручку настройки.
3. Задайте диапазон частоты измерений, для этого нажмите клавишу **START CENTER** и введите начальное значение **10 MHz** с помощью клавиш клавиатуры **DATA ENTRY**. Затем введите конечное значение частотного диапазона, нажав **STOP SPAN**, и введите **6 GHz**.
4. Нажмите **MEAS**, далее выберите **S21** на экранном меню.

На экране появится частотная характеристика для параметра **S21** (АЧХ усилителя). Для её отображения в удобном масштабе нажмите **SCALE** затем **AUTOSCALE**. Для отображения в **dB** нажмите **FORMAT** и выберите **dB Mag**. Для исследования кривой удобно пользоваться функцией маркера. Нажмите **MARKER**, к кривой будет привязан маркер, который можно перемещать по кривой с помощью вращения ручки. Так можно определить значение кривой в любой точке.

Зарисуйте частотную характеристику и составьте таблицу значений коэффициентов усиления для частот 0.1, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 GHz.

4. Нажмите **MEAS**, далее выберите **S11**.

Аналогично, как и при исследовании параметра **S21**, зарисуйте характеристику и составьте таблицу значений коэффициентов отражения на входе для частот 0.1, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 GHz. *

5. Нажмите **MEAS**, далее выберите **S22**.

Зарисуйте характеристику и составьте таблицу значений коэффициентов отражения на выходе для частот 0.1, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 GHz.

6. Нажмите **MEAS**, далее выберите **S12**.

Зарисуйте характеристику и составьте таблицу значений коэффициентов изоляции для частот 0.1, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 GHz.

7. Нажмите **MEAS**, далее выберите **S21**. Далее **FORMAT** и **SWR**.

Зарисуйте диаграмму и составьте таблицу значений коэффициентов стоячей волны для частот 0.1, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 GHz.

8. Нажмите клавишу **START CENTER** и введите начальное значение **10 MHz** с помощью клавиш клавиатуры **DATA ENTRY**. Затем введите конечное значение частотного диапазона, нажав **STOP SPAN**, и введите **1 GHz**. Нажмите **FORMAT** далее **PHASE**.

Зарисуйте диаграмму для фазочастотной характеристики усилителя.

* Каждый раз при выборе нового измерения необходимо производить масштабирование кривой при помощи кнопки **SCALE** затем **AUTOSCALE**.

Упражнение №2. Определение точки компрессии.

1. Нажмите **PRESET**.
2. Нажмите клавишу **Sweep** на вспомогательной клавиатуре **Channel** для входа в подменю задания параметров развертки.
3. Выберите пункт **Sweep Type – Power** (развертка по мощности). В открытом поле ввода **CW Frequency**, введите фиксированную частоту **6 GHz**, на которой будет производиться измерение.
4. Нажмите кнопку **Start** на клавишной панели **Channel** и задайте начальное значение **-25 dBm**. Затем нажмите **Stop** и задайте так же конечное значение **0 dBm**.
5. Нажмите **Meas** и выберите измеряемый параметр **S21**.
6. Нажмите **FORMAT** затем **dB Mag**. Для отображения в удобном масштабе нажмите **SCALE** затем **AUTOSCALE**.

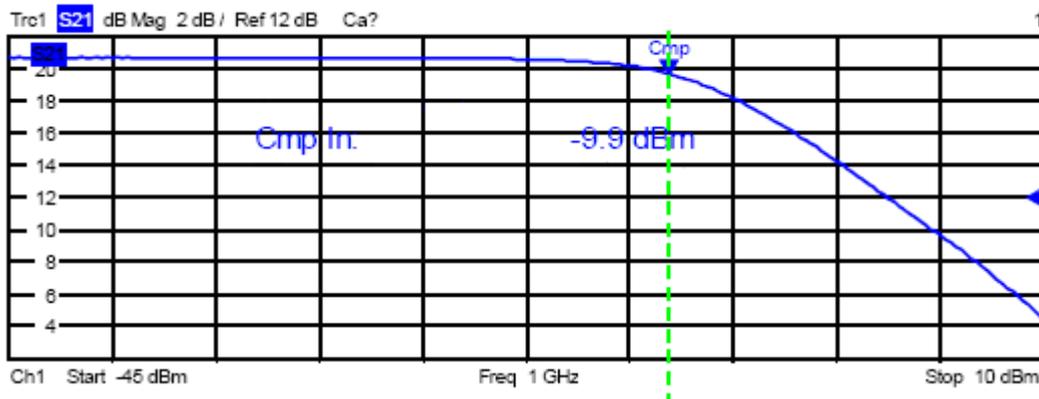


Рис.12

На экране вы увидите график зависимости коэффициента усиления усилителя в dB от мощности сигнала на его входе в dBm (амплитудную характеристику). Нажмите кнопку **MARKER**. В правом верхнем углу экрана отобразятся значения маркера – коэффициент усиления в dB и мощность сигнала на входе в dBm. Двигая маркером по кривой, определите при какой входной мощности спад переходной характеристики составит 1dB. Это будет точка компрессии по уровню 1 dB по входу.

Точка компрессии по выходу определяется по формуле:

$$P_{1dB0} = P_{1dBI} + \text{Gain} - 1 \text{ dB},$$

где P_{1dBI} – мощность сигнала на входе усилителя; Gain – коэффициент усиления на данной частоте.

Результаты упражнения должны содержать точку компрессии усилителя по выходу и по входу на частоте 6 ГГц.

Упражнение №3. Определение коэффициентов гармоник

1. Нажмите **PRESET**.
2. Нажмите клавишу **Sweep** на вспомогательной клавиатуре **Channel** для входа в подменю задания параметров развертки.
3. Выберите пункт **Sweep Type –Log. Frequency**.
4. Установите мощность сигнала на выходе прибора **-10 dBm**, нажав кнопку **POWER BW AVG** и вращая ручку настройки.
5. Нажмите **Format** и выберите **dB Mag**.
7. Нажмите кнопку **START** и выберите значение начальной частоты **20 MHz**. Нажмите кнопку **STOP** и выберите значение конечной частоты **6 GHz**.
8. Нажмите **MODE**. В разделе **Harmonics** выберите **2-nd Harmonic**. Далее нажмите **Relative Measurement**. Нажмите **Meas** и выберите **S21**. На экране появится зависимость от частоты уровня второй гармоники относительно первой – основного тона (в **dB**).
9. Нажмите **SCALE** затем **AUTOSCALE** для удобного масштаба диаграммы.

Зарисуйте диаграмму. Определите уровень искажений по 2-ой гармонике для частот 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 GHz, используя функции маркера.

10. Прделайте те же операции, начиная с п.8, только в разделе **Harmonics** выберите **3-nd Harmonic**.

Зарисуйте диаграмму. Определите коэффициенты для 3-ой гармоники для частот 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 GHz. Результаты упражнения представьте в виде таблицы.

Упражнение №4. Определение коэффициентов устойчивости

1. Нажмите **PRESET**.
2. С помощью мышки зайдите в меню **File** и выберите **New**.
3. Установите мощность сигнала на выходе прибора **-10 dBm**, нажав кнопку **POWER BW AVG** и вращая ручку настройки.
4. Задайте диапазон частоты входного сигнала, для этого нажмите клавишу **START CENTER** и введите начальное значение **20 MHz** с помощью клавиш клавиатуры **DATA ENTRY** и подтвердите ввод нажатием **OK ENTER**. Затем введите конечное значение частотного диапазона, нажав **STOP SPAN**, и введите **6 GHz**.
5. Нажмите **MEAS**, далее – **More** – выберите **Stability Factor**.
6. Выберите коэффициент устойчивости типа **K** и нажмите **OK**.

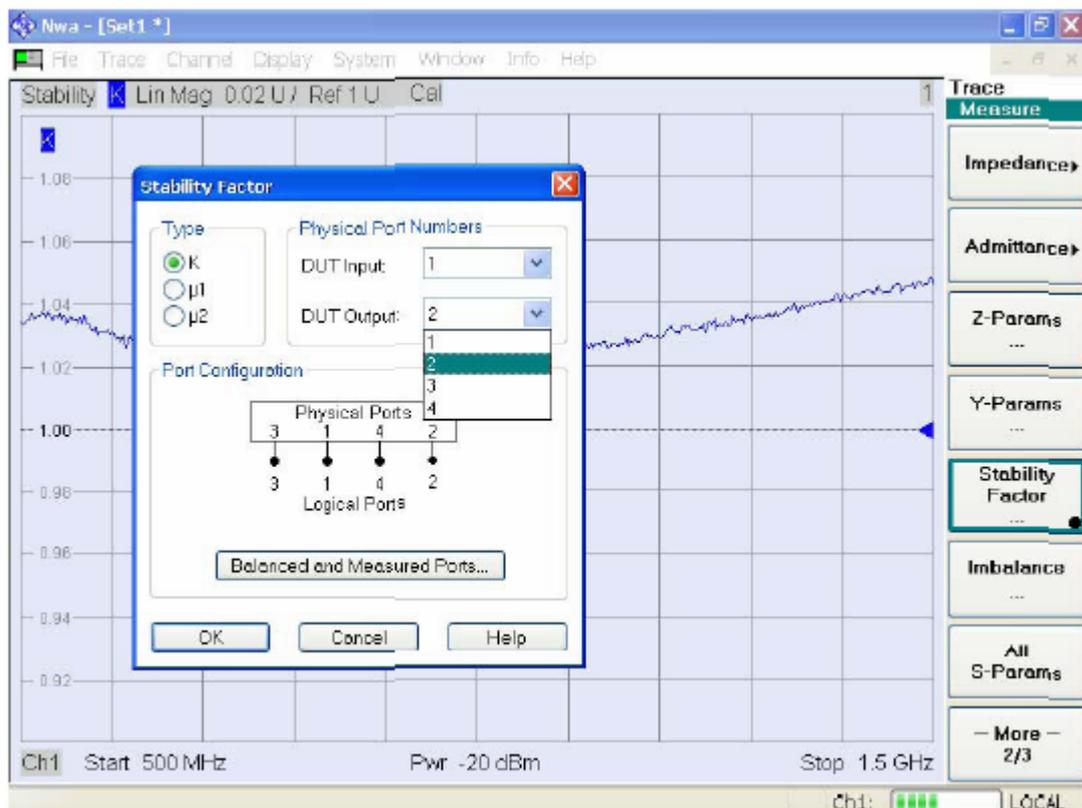


Рис. 12

На экране анализатора появится диаграмма коэффициента устойчивости **K** от частоты сигнала.

Определите коэффициент устойчивости **K** для частот 0.02, 3 и 6 GHz.

7. Повторите те же действия с пункта №2, выбирая коэффициенты устойчивости **μ_1** , затем **μ_2** .

Аналогично определите коэффициенты устойчивости **μ_1** и **μ_2** для частот 0.02, 3 и 6 GHz. Результаты представьте в виде таблицы.

7 Приложение

Технические характеристики усилителя от производителя ZX60-6013E+

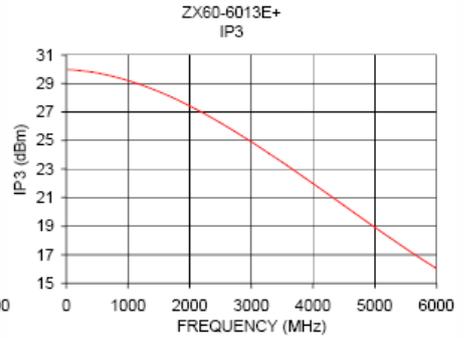
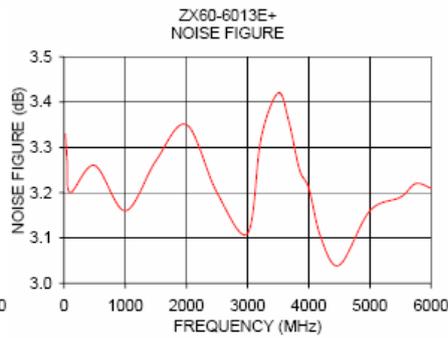
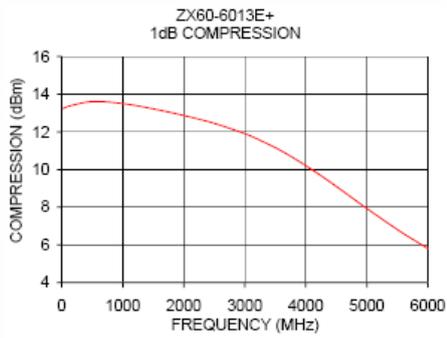
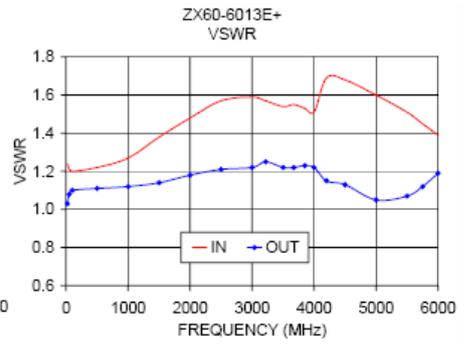
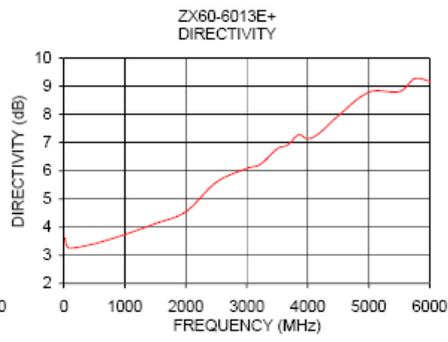
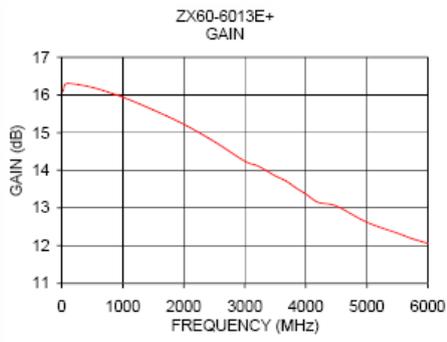
Electrical Specifications at T_{AMB} = 25°C

MODEL NO.	FREQ. (GHz) $f_c - f_u$	DC VOLTAGE @ Pin V+ (V)	GAIN over frequency in GHz Typ (dB)								MAXIMUM POWER (dBm) Output (1 dB Comp.) Typ. f_c f_u	DYNAMIC RANGE		VSWR (:1) Typ.				ACTIVE DIRECTIVITY (dB) Isolation-Gain Typ.	DC OPERATING CURRENT @ Pin V+ (mA)		
			0.1	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	Min.at 2 GHz		NF (dB) Typ.	IP3 (dBm) Typ.	In $f_c - 3$ GHz	In $3 - f_u$ GHz	Out $f_c - 3$ GHz	Out $3 - f_u$ GHz		Typ.	Typ.	Max.
ZX60-6013E+	0.02-6	12.0	16.2	15.9	15.2	14.3	13.4	12.7	12.1	13.0	13.4	5.8	3.3	28.7	1.4	1.6	1.2	1.2	3-9	39	50

Maximum Ratings

Operating Temperature	-45°C to 80°C case
Storage Temperature	-55°C to 100°C
DC Voltage	12.5V
Input Power(no Damage)	15dBm
Power	650mW

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)	DIRECTIVITY (dB)	VSWR IN (:1)	VSWR OUT (:1)	POWER OUT @1dB COMPRESSION (dBm)	IP3 (dBm)	NF (dB)
20	16.09	3.60	1.24	1.03	13.24	29.97	3.33
50	16.28	3.33	1.21	1.08	13.28	29.96	3.27
100	16.31	3.24	1.20	1.10	13.35	29.95	3.20
500	16.20	3.40	1.22	1.11	13.61	29.73	3.26
1000	15.94	3.73	1.27	1.12	13.50	29.20	3.16
1500	15.60	4.12	1.38	1.14	13.22	28.42	3.27
2000	15.22	4.54	1.48	1.18	12.87	27.42	3.35
2500	14.76	5.59	1.57	1.21	12.45	26.23	3.20
3000	14.24	6.08	1.59	1.22	11.90	24.91	3.11
3220	14.11	6.22	1.57	1.25	11.60	24.28	3.32
3500	13.85	6.78	1.54	1.22	11.16	23.48	3.42
3670	13.72	6.91	1.55	1.22	10.86	22.97	3.36
3850	13.52	7.28	1.53	1.23	10.51	22.43	3.25
4000	13.37	7.13	1.51	1.22	10.21	21.98	3.21
4200	13.15	7.35	1.69	1.15	9.78	21.37	3.10
4500	13.05	7.95	1.68	1.13	9.10	20.45	3.04
5000	12.62	8.79	1.60	1.05	7.93	18.92	3.16
5500	12.33	8.81	1.51	1.07	6.81	17.44	3.19
5750	12.18	9.27	1.45	1.12	6.30	16.72	3.22
6000	12.06	9.18	1.39	1.19	5.81	16.04	3.21



8 Литература

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М., 2005.
2. Фриск В.В. Основы теории цепей. М., 2002.
3. Ресурс Internet – “Application Notes Abstract. Understanding and Enhancing Sensitivity in Receivers for Wireless Applications” // <http://www.ti.com/litv/pdf/swra030>.
4. Руководство по эксплуатации векторного анализатора цепей Rohde-Schwarz ZVB-20.