

**КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ)
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
КАФЕДРА РАДИОАСТРОНОМИИ**

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО КУРСУ
«ФИЗИКА ГЕНЕРАЦИИ И ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОВОЛН»
(блоки передающего модуля набора ME1000)**

Методические указания

КАЗАНЬ – 2025

УДК 621.396.075

ББК 32.884.1

Л12

Принято на заседании кафедры радиоастрономии КФУ

Протокол № 5 от 7 марта 2025 года

Рецензент:

доцент кафедры радиофизики КФУ

кандидат физико-математических наук **Латыпов Р. Р.**

Составители: **А.А. Колчев, Е.Ю. Зыков**

Лабораторные работы по курсу «Физика генерации и излучения радиоволн» (блоки передающего модуля набора ME1000). – Казань: КФУ, 2025. – 52 с.

Данное пособие предназначено для лабораторной поддержки дисциплин «Распространение радиоволн и связь», изучаемой в бакалавриате радиофизического направления Института физики КФУ и «Физика генерации и излучения радиоволн», изучаемой в магистратуре. Для выполнения лабораторных работ используются имеющиеся на кафедре радиоастрономии измерительный комплекс, в состав которого входят модули приема и передачи радиоволн, генераторы ВЧ-сигналов, спектроанализаторы, компьютерная техника. Описаны четыре лабораторных работы, предназначенных для изучения характеристик различных блоков передающих устройств.

© Колчев А.А., Зыков Е.Ю.

© Казанский федеральный университет, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	6
1.1. Основные технические показатели усилителей	6
1.2. Основные характеристики полосового фильтра	15
2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	18
2.1. Лабораторная работа 1. Калибровка схем соединения с помощью анализатора спектра	18
2.2. Лабораторная работа 2. Определение характеристик усилителя мощности	29
2.3. Лабораторная работа 3. Определение характеристик маломощного усилителя	42
2.4. Лабораторная работа 4. Определение параметров полосового фильтра	47
ЛИТЕРАТУРА	52

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на многообразие конкретных построений технических систем и особенности различных диапазонов, существуют общие закономерности распространения радиоволн. Они сводятся к тому, что в любой системе имеется в наличии так называемая линия радиосвязи, или радиолиния. В каждой радиолинии можно выделить три обязательно присутствующих элемента: передатчик, приемник и среда, в которой происходит распространение радиоволн.

В передатчике энергия электромагнитных колебаний высокой частоты с помощью передающей антенны преобразуется в энергию излучаемых радиоволн. Созданная передающей антенной электромагнитная волна, распространяясь в окружающей среде, претерпевает изменения, определяемые свойствами этой среды, и достигает приемной антенны. Приемная антенна выполняет функцию преобразования энергии проходящих к ней радиоволн в энергию, сосредоточенную во входных цепях приемника.

Формы, размеры, конструкция и характеристики основных узлов приемника и передатчика зависят от длины излучаемых или принимаемых радиоволн и типа канала связи.

В данных лабораторных работах исследуются характеристики следующих узлов передающего модуля: усилители и полосовые фильтры.

Для выполнения работ применяются учебный набор ME1000 фирмы «DreamCatcher» (с прилагаемым программным обеспечением) и научное оборудование компании Rohde&Schwarz. Учебный набор ME1000 состоит из передающего модуля (TX) и приемного модуля (RX). Совместно с программой RadPat он может использоваться для измерения параметров блоков приемника и передатчика с помощью анализатора спектра. Для этого используется анализатор спектраFSH8 компании Rohde&Schwarz. На Рис.1 показан учебный

набор ME1000 (модуль передающей части) совместно с указанным генератором, анализатором спектра и компьютером.



Рис. 1. Состав оборудования: учебный набор ME1000 (модуль передающей части), генератор сигналов R&S®SMB100A, анализатор спектра FSH8, компьютер

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Основные технические показатели усилителей

Коэффициент усиления.

Отношение выходного напряжения усилителя $U_{\text{ВЫХ}}$ к входному напряжению $U_{\text{ВХ}}$ принято называть коэффициентом усиления по напряжению K [1]:

$$K = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}.$$

Динамический диапазон усилителя.

Амплитудной характеристикой усилителя называется зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$. Она имеет вид, показанный на Рис. 2.

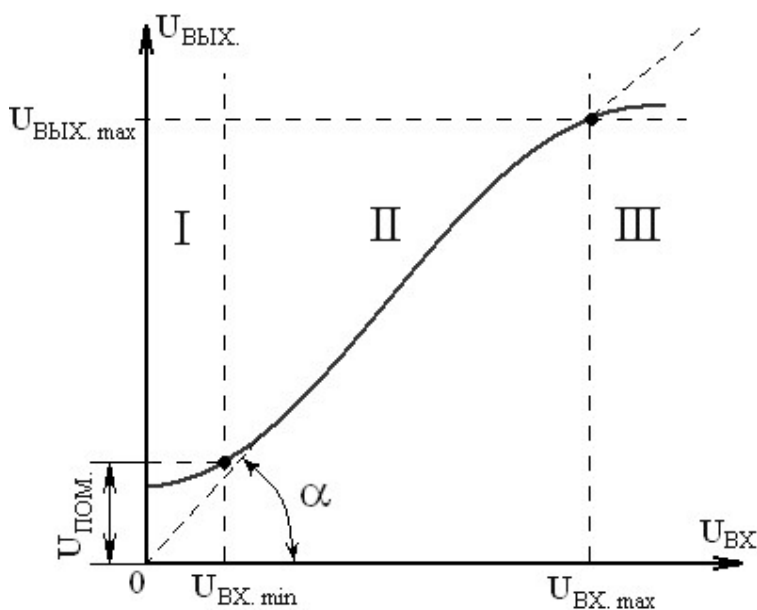


Рис. 2. Амплитудная характеристика усилителя

Как видно из рисунка, амплитудная характеристика имеет три участка: два нелинейных (I и III) и линейный участок (II). Первый участок обусловлен влиянием собственных помех усилителя, а третий – нелинейностью характеристик усилительных элементов. Рабочим участком является второй. Он позволяет определить минимальное $U_{\text{ВХ.min}}$ и максимальное значение входного сигнала $U_{\text{ВХ.max}}$. Отноше-

ние входных напряжений $U_{BX \max} / U_{BX \min}$ определяет динамический диапазон усилителя:

$$D_{YC} = 20 \lg(U_{BX \max} / U_{BX \min}).$$

По амплитудной характеристике можно найти напряжение собственных помех $U_{\text{пом.вых}}$ усилителя при $U_{BX} = 0$. Это напряжение представляет сумму напряжений собственных шумов усилительных элементов усилителя, напряжение тепловых шумов резисторов, наводок, пульсаций источника питания (питание от сети).

Угол наклона характеристики α характеризует усилительные свойства усилителя. При большом коэффициенте усиления амплитудная характеристика идёт круче (угол α больше).

На Рис. 3 выходное напряжение ограничивается при положительной и отрицательной полярности. Это связано с тем, что при усилении усилитель заходит в область насыщения и поэтому наступает ограничение.

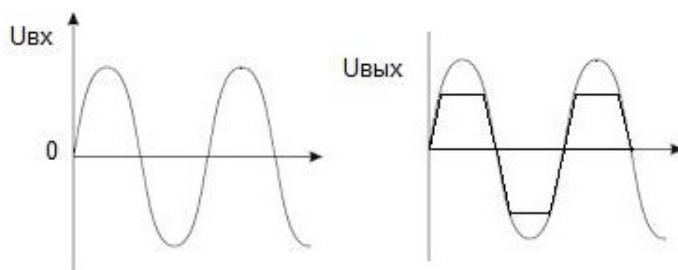


Рис. 3. Пример возникновения нелинейных искажений

В настоящее время используются три подхода для определения параметров линейности радиоприемного тракта.

Метод 1. Измерение интермодуляционных составляющих (ИС) третьего или второго порядка в децибелах на микровольт (дБмкВ) или в децибелах на милливатт (дБм). Это уровень мешающих сигналов, действующих на вход приемника, которые вызывают на его выходе интермодуляционные составляющие, по уровню равные выходному сигналу, полученному при подаче на вход приемника сигнала на уровне чувствительности приемника.

Метод 2. Коэффициент интермодуляции (или коэффициент гармоник).

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1},$$

где I_i , U_i – действующее, либо максимальное значение высших гармоник, входящих в спектр рассматриваемого сигнала; I_1 , U_1 – действующее, либо максимальное значение первой (основной) гармоники рассматриваемого сигнала.

Например, если коэффициент гармоник не хуже, чем 70 дБ, это означает, что мешающие сигналы должны быть как минимум на 70 дБ выше полезного сигнала, чтобы создать выходные продукты с таким же уровнем.

Метод 3. Точки пересечения по интермодуляции третьего (IP3) или второго порядка (IP2). IP – сокращение английских слов intersection point – точка пересечения. Иногда для обозначения точки пересечения используют сокращение T0I – third order intercept – пересечение третьего порядка.

До начала 80-х годов прошлого века для описания интермодуляционных характеристик, как правило, использовалось понятие коэффициента интермодуляции или динамического диапазона по интермодуляции, однако в дальнейшем почти повсеместно перешли к использованию понятия точки пересечения. Этот параметр оказался более удобным ввиду своей универсальности, поскольку он однозначно характеризует как линейность, так и динамический диапазон приемника (усилителя или любой другой нелинейной цепи). Уровень точки пересечения является достаточно постоянной величиной для данного приемника, в отличие от уровня ИС, который зависит от уровня сигналов на входе [2].

В математическом моделировании нелинейных искажений, как правило, ограничиваются третьей степенью разложения в ряд, поскольку продукты остальных членов существенно меньше. Следует

отметить, что подобная аппроксимация возможна только для малых сигналов. Представим статическую передаточную характеристику в следующем виде (Рис. 4) [2]:

$$Y(X) = G_1 X + G_2 X^2 + G_3 X^3, \quad (1)$$

где X — сигнал на входе системы, Y — на выходе.

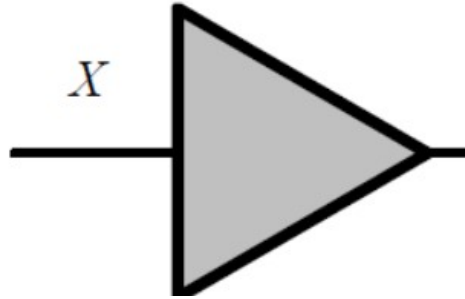


Рис. 4. Математическая модель тракта усиления

Рассмотрим в этой модели интермодуляцию двухтонового сигнала [2]:

$$X = A \sin \alpha + B \sin \beta, \quad (2)$$

где X — двухтоновый сигнал с амплитудами A и B . $\alpha = 2\pi f_1 t$, $\beta = 2\pi f_2 t$, f_1 и f_2 — частоты гармонических сигналов (рис. 5).

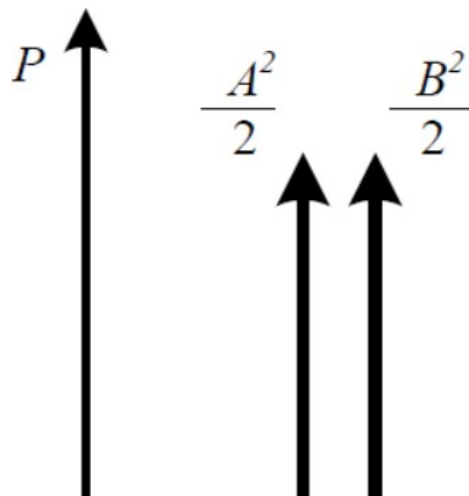


Рис. 5. Спектр входного сигнала X

Найдем гармонические составляющие, появляющиеся в результате возведения сигнала во вторую и третью степени [2]:

$$\begin{aligned}
(A \sin \alpha + B \sin \beta)^2 &= \frac{A^2 + B^2}{2} - AB \cos(\alpha + \beta) + AB \cos(\alpha - \beta) - \\
&- \frac{A^2}{2} \cos 2\alpha - \frac{B^2}{2} \cos 2\beta,
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
(A \sin \alpha + B \sin \beta)^3 &= \left(\frac{3}{4} A^3 + \frac{3}{2} B^2 A\right) \sin \alpha + \left(\frac{3}{4} B^3 + \frac{3}{2} A^2 B\right) \sin \beta + \\
&+ \frac{3}{4} A^2 B \sin(2\alpha - \beta) + \frac{3}{4} B^2 A \sin(2\beta - \alpha) - \frac{A^3}{4} \sin 3\alpha - \frac{B^3}{4} \sin 3\beta - \\
&- \frac{3}{4} A^2 B \sin(2\alpha + \beta) - \frac{3}{4} B^2 A \sin(2\beta + \alpha).
\end{aligned} \tag{4}$$

На Рис. 6 в частотной области отображены мощности найденных составляющих.

Пусть P_A и P_B — мощности тонов входного сигнала, т.е.

$$P_A = A^2 / 2, \quad P_B = B^2 / 2. \tag{5}$$

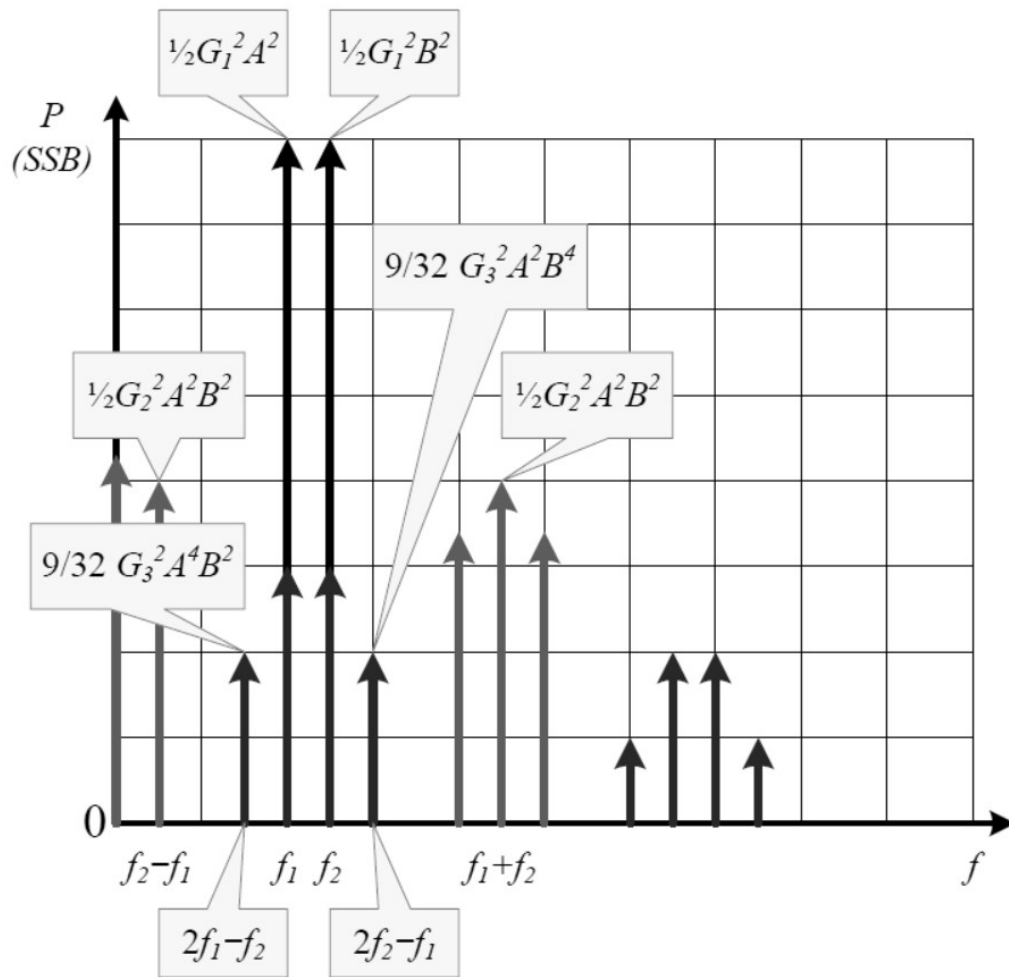


Рис. 6. Спектр выходного сигнала Y

Пользуясь результатами выражений (3, 4), характеристикой (1) и соотношениями (5), найдем мощности интересующих нас гармонических составляющих на выходе (табл. 1) [2].

Таблица 1

Уровни гармонических составляющих на выходе
для двухтонального сигнала с уровнями P_A и P_B

Поз.	Обозначение	Частота	Значение (A, B)	Значение (P_A, P_B)
1	P_{f_1}	f_1	$\frac{1}{2}G_1^2 A^2$	$G_1^2 P_A$
2	P_{f_2}	f_2	$\frac{1}{2}G_1^2 B^2$	$G_1^2 P_B$
3	$P_{f_2 \pm f_1}$	$f_2 \pm f_1$	$\frac{1}{2}G_2^2 A^2 B^2$	$2G_2^2 P_A P_B$
4	$P_{2f_1 - f_2}$	$2f_1 - f_2$	$\frac{9}{32}G_3^2 A^4 B^2$	$\frac{9}{4}G_3^2 P_A^2 P_B$
5	$P_{2f_2 - f_1}$	$2f_2 - f_1$	$\frac{9}{32}G_3^2 A^2 B^4$	$\frac{9}{4}G_3^2 P_A P_B^2$

Точка пересечения третьего порядка IP_3 .

Пусть уровни тонов входного сигнала одинаковы:

$$A = B = C, P_C = C^2/2,$$

где P_C – мощность каждого из тонов на входе. Тогда, аналогично таблице 1, выпишем уровни составляющих на выходе (табл. 2). На Рис. 7 в логарифмическом масштабе отображена зависимость уровней составляющих на выходе с частотами f_1 и f_2 (усиленный сигнал), $f_2 \pm f_1$ (продукты второго порядка), $2f_2 - f_1$ и $2f_1 - f_2$ (третьего порядка) от мощности тона P_C . Как и следовало ожидать, наклон зависимости усиленного сигнала равен 1 : 1, продуктов нелинейности второго порядка – 2 : 1, третьего – 3 : 1. Это означает, что при каждом уменьшении мощности входного сигнала на 1 дВ отношение мощности выходного сигнала и искажений второго порядка увеличивается на 1 дВ, а для третьего порядка – на 2 дВ. Следует учесть, что указанные зависимости справедливы лишь для малых сигналов (как правило, ниже точки децибельной компрессии на 6–10 дВ).

Таблица 2

Уровни гармонических составляющих на выходе для двухтонового сигнала с одинаковыми уровнями P_C [2].

Поз.	Обозначение	Частота	Значение (C)	Значение (P_A , P_B)
1	$P_{f_{1,2}}$	f_1, f_2	$\frac{1}{2}G_1^2C^2$	$G_1^2P_C$
2	P_{f_2}	$f_2 \pm f_1$	$\frac{1}{2}G_2^2C^4$	$2G_2^2P_C^2$
3	$P_{f_2 \pm f_1}$	$2f_1 - f_2,$ $2f_2 - f_1$	$\frac{9}{32}G_3^2C^6$	$\frac{9}{4}G_3^2P_C^3$

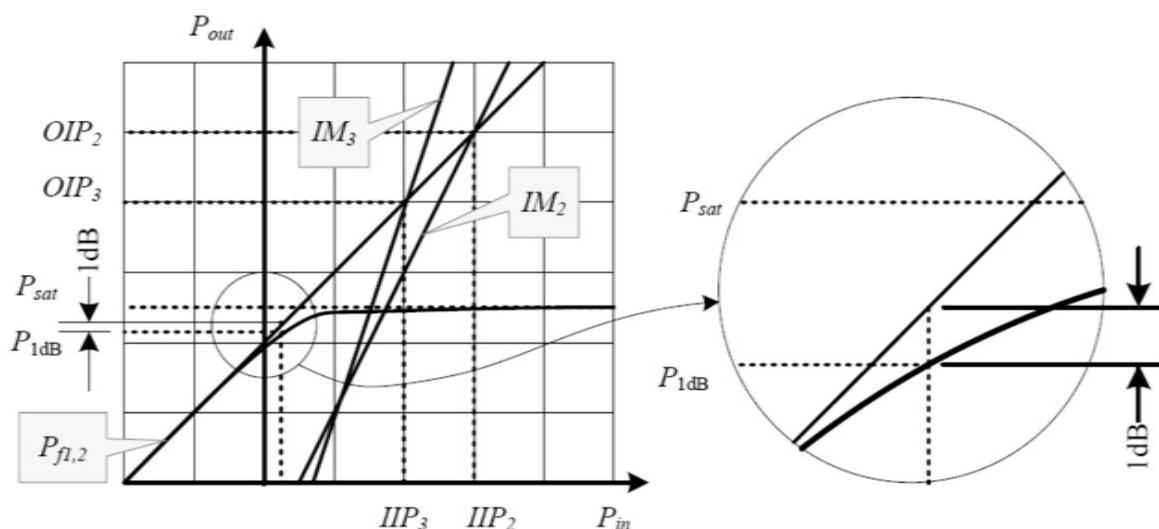


Рис. 7. Зависимость уровня продуктов нелинейных искажений от мощности тона входного двухтонального сигнала

Точкой пересечения интермодуляции третьего порядка по выходу OIP_3 (*OutputIP3*) для двухтонового сигнала с частотами f_1 и f_2 и одинаковыми уровнями тонов называется такая аппроксимированная мощность тона выходного сигнала, при которой она равна мощности продукта нелинейности третьего порядка на частоте $2f_2 - f_1$ (или $2f_1 - f_2$).

Из данного определения и рассмотренных выше зависимостей (табл. 2) следует соотношение:

$$\begin{aligned} OIP_3 &= \sqrt{IMD_3} \cdot P_{f1,2}, \\ IMD_3 &= \frac{P_{f1,2}}{IM_3}, (P_{f1,2} \ll P_{1dB}), \end{aligned} \quad (6)$$

где $P_{f1,2}$ – мощность тона выходного сигнала, IM_3 – мощность продукта нелинейности третьего порядка на частоте $2f_2 - f_1$ (или $2f_1 - f_2$) (Рис. 6).

Приведенные выражения, по сути, определяют методику измерений для двухтонового сигнала с одинаковыми уровнями. Однако не всегда удастся получить равные уровни тонов, поэтому желательно получить формулы и для общего случая.

Подставив в (6) выражения поз. 1, 3 таблицы 2, получим

$$OIP_3 = \frac{2G_1^3}{2G_3}. \quad (7)$$

С помощью таблицы 1 выразим G_3 через P_{f1} , P_{f2} и P_{2f2-f1} и P_{2f1-f2} , получим

$$\frac{3}{2}G_3 = \frac{G_1^3 \sqrt{P_{2f2-f1}}}{P_{f2} \sqrt{P_{f1}}} = \frac{G_1^3 \sqrt{P_{2f1-f2}}}{P_{f1} \sqrt{P_{f2}}}.$$

Подставив это выражение в (7), получим

$$OIP_3 = \frac{P_{f2} \sqrt{P_{f1}}}{\sqrt{P_{2f2-f1}}} = \frac{P_{f1} \sqrt{P_{f2}}}{\sqrt{P_{2f1-f2}}}. \quad (8)$$

Для логарифмических величин, выраженных в децибелах, соотношение (8) принимает следующий вид:

$$OIP_3 = P_{f2} + \frac{P_{f1} - P_{2f2-f1}}{2}, (dB) = P_{f1} + \frac{P_{f2} - P_{2f1-f2}}{2}, (dB). \quad (9)$$

Влияние аттенюатора на величину интермодуляции.

Возникает вопрос, влияет ли аттенюатор на входе приемника на величину интермодуляционных составляющих? Уменьшая напряже-

ние аттенюатором на входе приемника, например, на 1 дБ, мы уменьшаем полезный сигнал P_1 на выходе также на 1 дБ, но при этом интермодуляционные продукты второго порядка P_2 уменьшаются на 2 дБ, а третьего порядка P_3 – на 3 дБ, как показано на Рис. 8 (а, б). Этим свойством можно пользоваться для выяснения порядка интермодуляционных составляющих.

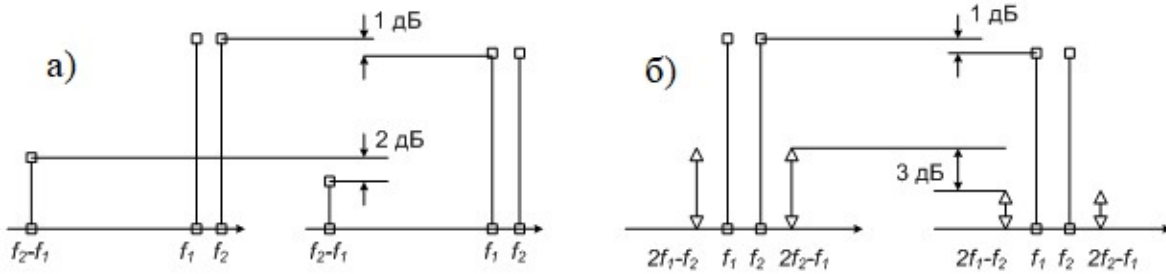


Рис. 8. Влияние аттенюатора 1 дБ на интермодуляцию 2-го и 3-го порядка

В общем случае при включении аттенюатора с коэффициентом передачи $G_1 = -A$ дБ уровень интермодуляционных составляющих n -го порядка будет уменьшаться на nA дБ. При этом значения точек пересечения по входу также вырастут на величину A , поскольку все прямые на Рис. 8 параллельно сместятся вправо на величину A .

Может показаться, что поскольку при включении аттенюатора точка пересечения сдвигается вправо на величину A , то возрастает и линейность приемника. На самом деле это не так, поскольку при этом на эту же величину A ухудшается предельная чувствительность приемника.

1.2. Основные характеристики полосового фильтра

Полосовой фильтр – это частотно чувствительная схема, которая пропускает определенный диапазон частот в окрестности центральной резонансной частоты. Идеальный полосовой фильтр имеет прямоугольную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Реальные полосовые фильтры приближаются к этой идеальной характеристике.

Основными параметрами АЧХ полосовых фильтров (Рис. 9) являются:

1. Резонансная частота $\Omega_p = 2 \pi f_p$. Частота, на которой коэффициент передачи A_0 имеет максимальное значение для полосового фильтра и минимальное значение для режекторного фильтра.

2. Нижняя частота среза Ω_n . Это частота, расположенная ниже Ω_p и коэффициент передачи на которой равен $0,707 A_0$ (ослабление сигнала составляет 3 дБ).

3. Верхняя частота среза Ω_v . Это частота, расположенная выше Ω_p и на которой коэффициент передачи также равен $0,707 A_0$ (ослабление сигнала составляет 3 дБ).

4. Полоса пропускания (для полосового фильтра) и полоса заграждения (для режекторного фильтра) $B = \Omega_v - \Omega_n$.

5. Коэффициент добротности (или просто добротность) фильтра $Q = \Omega_p / B$ характеризует избирательность схемы.

Полосовые фильтры делятся на узкополосные и широкополосные. Узкополосным считается фильтр, полоса пропускания которого не превышает $0,1 \Omega_p$ ($B < 0,1 \Omega_p$). При $B > 0,1 \Omega_p$ фильтр считается широкополосным. Соответственно у узкополосных фильтров $Q > 10$, а у широкополосных $Q < 10$.

6. Затухание в полосе задержания – подавление сигналов на частотах вне полосы пропускания.

7. Неравномерность АЧХ в полосе пропускания.

8. Крутизна спада АЧХ – скорость уменьшения амплитуды сигнала при удалении от полосы пропускания. Коэффициент прямоугольности оценивается отношением полосы пропускания на уровне 0,1 к полосе пропускания на уровне 0,7. Чем более пологой является АЧХ радиоприемника, тем шире полоса пропускания на уровне 0,1 по отношению к уровню 0,7 и тем больше величина коэффициента прямоугольности. Коэффициент пропускания позволяет количественно оценить пологий характер амплитудно-частотной характеристики

фильтра. Чем ближе коэффициент прямоугольности АЧХ к 1, тем круче ее скаты.

Наряду с АЧХ коэффициента передачи в частотной области важен и другой параметр – сдвиг фазы выходного сигнала по отношению к входному (Рис. 10). Фаза важна постольку, поскольку сигнал будет искажен, если временное запаздывание при прохождении через фильтр не будет постоянным для различных частот. Постоянное время задержки (для всех частот) соответствует линейному возрастанию сдвига фазы в зависимости от частоты, поэтому термин фильтр с линейной фазой применяется к идеальному в этом отношении фильтру.

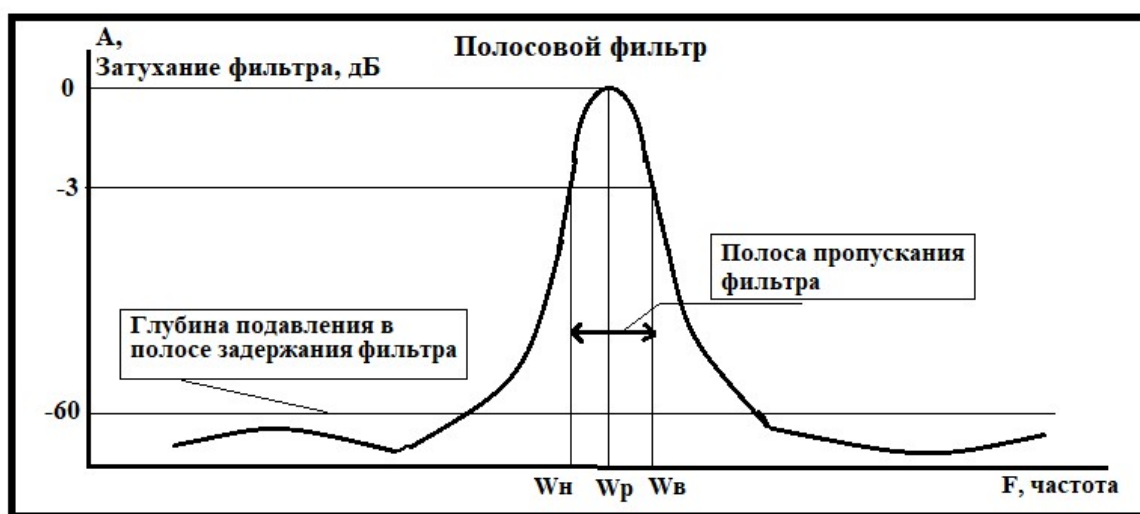


Рис. 9. Полоса пропускания полосового фильтра

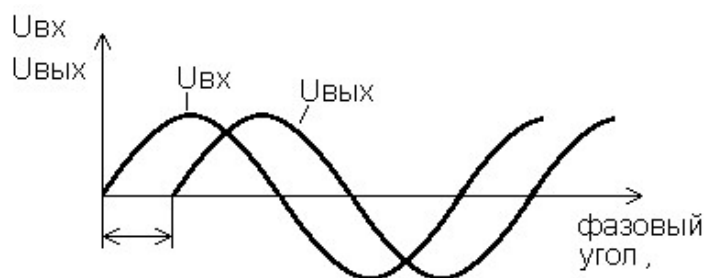


Рис. 10. Фазовый сдвиг в полосовом фильтре

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Лабораторная работа 1. Калибровка схем соединения с помощью анализатора спектра

Задание.

Провести калибровку смещением с помощью анализатора спектра (АС).

Подтвердить качество сигнала, идущего от генератора сигнала (ГС).

Определить потери под влиянием кабелей, соединений и дорожек печатной платы.

Необходимое оборудование.

- Учебный комплекс Dream Catcher ME1000;
- генератор ВЧ сигналов модели R&S®SMB100A;
- анализатор спектра FSH8 компании Rohde&Schwarz.

Необходимость калибровки.

На Рис. 11 показана схема измерения для типичного диапазона частот объекта испытаний (ОИ). При измерении частотной характеристики ОИ собирается мощность, переданная от ГС к АС через ОИ. Чтобы гарантировать, что собранные данные идут только от ОИ без участия кабелей, соединений и потерь в пределах самого измерительного оборудования, необходимо измерить потери на соединениях по всей линии от оборудования до входных и выходных разъёмов ОИ.

В принципе, фактический эффект ОИ выражается как замеренная величина минус потери на обоих концах ОИ. Процесс учета воздействия соединения при измерениях называется «калибровка». Обычно он используется на различных представляющих интерес частотах. В качестве ОИ могут выступать представленные в наборе усилители, фильтры, аттенюаторы и т.д.



Рис.11. Необходимость калибровки с учетом потерь в кабелях, соединениях и дорожках ПП

Проверка ГС и калибровка потерь, идущих от кабеля.

Важно!

Чрезмерно высокая мощность на входе может привести к повреждению АС. Значение порога повреждения зависит от модели. Входная мощность может задаваться на уровне 20 дБм (0,1 Вт или 3,2 В при нагрузке 50 Ом). Соблюдайте инструкции техники безопасности, размещенные на передней панели оборудования.

Рассматривается усредненное по времени значение мощности

$$[1] P = \frac{|V|^2}{2R} \text{ при } R = 50 \text{ Ом.}$$

Прежде всего необходимо выяснить, является ли используемый ГС абсолютно линейным устройством, непосредственно подключив его к АС (см. Рис. 12).

1. Используйте следующие настройки ГС:

Частота: 868 МГц.

Мощность: – 40 дБм (будет повышаться с шагом в 10 дБ до достижения 0 дБ).

2. Используйте следующие настройки АС:

Выберите настройки АС по умолчанию.

Разрешение по полосе пропускания (РПП): 100 кГц.

Аттенюация на входе: 10 дБ (или автоматическая).

Измерения.

а) Какие частоты отображаются на АС при мощности сигнала минус 40 дБм?

Частота = _____ МГц, _____ МГц и _____ МГц

Примечание.

При необходимости используйте функцию поиска и маркировки предельных значений.

б) Увеличивайте мощность с шагом 10 дБ, пока не достигнете уровня 0 дБ; запишите различные отображенные значения частоты. Отображаются ли другие значения частоты во время этого повышения мощности?

ДА, эти значения = _____ МГц, _____ МГц, или

НЕТ, других значений не отображается.

с) Объясните, почему при измерении на выходе присутствует более чем одна частотная составляющая?

д) Объясните разницу между измеренной и расчетной выходной мощностью, когда входная мощность равна 0 дБм.

е) Заполните таблицу ниже:

Входная мощность от генера- тора сиг- нала, <i>РГС</i>(дБм)	Мощность основной гармоники (дБм)	Мощность второй гармо- ники (дБм)	Мощность третьей гар- моники (дБм)
-40			
-30			
-20			
-10			
0			

Перед измерениями на ОИ можно откалибровать потери в кабеле, используя установку, изображённую на Рис. 12.

3. Для определения потерь кабеля используйте следующие настройки:

Настройки ГС:

Частота незатухающей волны: 868 МГц.

Мощность: -25 дБм.

Настройки АС:

Средняя частота: 868 МГц.

Протяженность: 10 МГц (приблизительно 1% центральной частоты).

Аттенюация на входе: 10 дБ (или автоматическая).

РПП: 100 кГц (или автоматическое).

Усреднение: Вкл.



Рис. 12. Проверка ГС и калибровка потерь в коаксиальном кабеле SMA

Измерения.

а) Какую частоту и мощность показывает АС, когда входная мощность равна – 25 дБм?

Частота = _____ МГц

Мощность = _____ дБм

Примечание.

При необходимости используйте функцию маркера.

б) Заполните таблицу ниже, чтобы задать потери в кабеле для различных тестовых сигналов. Следует изменить настройки частоты и уровня мощности ГС, а также настроек средней частоты и протяженности для АС. Задайте протяженность на уровне около 1% средней частоты.

Частота ГС, $f_{ГС}$ (МГц)	Уровень мощности ГС, $P_{ГС}$ (дБм)	Измеренная пиковая частота АС, $f_{АС}$ (МГц)	Измеренная мощность на выходе АС, $P_{АС}$ (dBm)	Потери от кабеля, $L_{кабеля} = P_{ГС} - P_{АС}$ (дБ)
50	-25			
50	-20			
50	-15			
50	-10			
50	-5			
100	-25			
100	-10			
500	-15			
500	-10			
818	-25			
818	-20			
818	-15			
818	-10			
818	-5			
818	0			
868	-25			
868	-20			
868	-18			
868	-15			
868	-13			
868	-10			
868	-8			
868	-5			
868	0			
1000	-15			
1736	-15			
1736	-5			
2604	-15			
2604	-5			

- с) Одинаковы ли потери в кабеле при разных входных частотах?
- д) Насколько понижается измеренная мощность АС при 50 МГц и 868 МГц, когда уровень мощности ГС уменьшается на 10 дБ?

Калибровка потерь на линии.

Суммарные потери на линии при измерении частотных характеристик складываются из двух составляющих: потери на входной линии и потери на выходной линии. Эти виды потерь в свою очередь зависят от потерь в коаксиальных кабелях и коннекторах, а также от потерь в токопроводящих дорожках печатной платы (ПП), идущих к разъемам ОИ. Мы можем измерить потери на линии с помощью калибровочной системы – платы ПОС («пропускание-отражение-согласование»).

- Потери на входной линии: Потери в кабеле к ГС и половина потерь в калибровочной плате ПОС (дорожки ПП и коннекторы).
- Потери на выходной линии: Потери в кабеле к АС и половина потерь в калибровочной плате ПОС.

Допущение: Входные и выходные линии калибровочной платы ПОС идентичны.

Поскольку потери на входной и выходной линии состоят из двух элементов, эти два элемента могут индивидуально определяться при выполнении следующих процедур, а затем суммироваться для вычисления общих потерь на всей трассе.

Процедуры.

1. Измерьте потери в кабеле от кабеля к ГС, L_{cable_sg} , и кабеля к АС, L_{cable_sa} .
2. Измерьте потери от платы ПОС (линия на проход).

Можно измерить потери в кабеле, используя установку, изображённую на Рис. 13.

1. Подключите коаксиальный кабель SMA, используемый для подключения ГС, см. Рис. 13. Данный кабель будет называться "кабель к ГС". Пометьте этот кабель, чтобы отличать от других.

2. Для ГС и АС используйте следующие настройки:

Настройки ГС:

Частота незатухающей волны: Нужная частота.

Мощность: -25 дБм.

Настройки оборудования

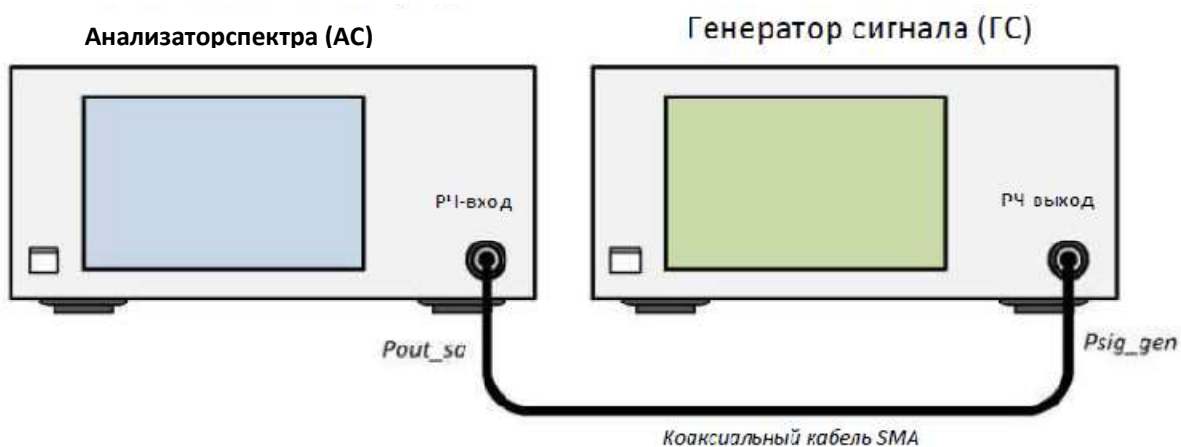


Рис. 13. Расстановка оборудования для измерения потерь в коаксиальном кабеле SMA

Настройки АС:

Центральная частота: Нужная частота.

Протяженность: 10 МГц.

Аттенюация на входе: 10 дБ (или автоматическая).

РПП: 100 кГц (или автоматическое).

Усреднение: Вкл.

Примечание.

Частоты 50 МГц и 868 МГц необходимы, чтобы компенсировать потери в других лабораторных работах.

Потери в кабеле = показания АС минус настройка амплитуды ГС.

Поскольку это потери, отрицательный знак при конечном значении данного выше выражения следует отбросить.

1. Произведите измерения и зафиксируйте потери для кабеля к ГС в Таблице 3.

Таблица 3

Данные калибровки потерь в линии

Частота (МГц)	Потери в кабеле к ГС, $L_{\text{кабель_ГС}}$	Потери в кабеле к АС, $L_{\text{кабель_АС}}$
50		
818		
868		
750		
800		
850		
900		
950		
1000		
1050		
1100		
1150		
1200		
1250		
1300		
1350		
1400		

2. Подсоедините коаксиальный кабель SMA, используемый для подключения АС, как показано на Рис. 13. Данный кабель будет называться «кабель к АС». Пометьте этот кабель, чтобы отличать от других.

3. Произведите измерения и зафиксируйте потери для кабеля к АС в Таблице 3.

Потери под влиянием соединения и дорожки печатной платы.

Используя калибровочную плату ПОС, которая представляет собой медные токопроводящие дорожки на тренажёрной плате, мы можем измерить потери на концах ОИ.

1. Произведите подключение, как показано на Рис. 13

2. Измерения на этом соединении представляют суммарные потери от кабеля к ГС, кабеля к АС и всей линии на проход платы ПОС.

а. $L_{\text{всей линии}} = \text{измеренная амплитуда сигнала минус настройка амплитуды ГС минус } (L_{\text{кабель_ГС}} + L_{\text{кабель_АС}}).$

б. $L_{\text{половины линии}} = 0.5 \cdot L_{\text{всей линии}}.$

Допущение: Потери на входной и выходной линии равны.

Примечание.

Потери в кабеле имеют положительные значения и берутся из Таблицы 3. В конце вычислений отрицательный знак перед $L_{\text{всей линии}}$ отбрасывается.

3. Произведите измерения и запишите потери для потери на проход ПОС в колонке под заголовком «Измеренная мощность на АС» в Таблице 4.

4. Рассчитайте значения $L_{\text{всей линии}}$ и $L_{\text{половины линии}}$ и внесите их в Таб. 4.

5. Рассчитайте суммарные потери на входной и выходной линии, как показано ниже:

а. Суммарные потери входной линии, $L_{\text{вх.линии}} = L_{\text{кабеля_ГС}} + L_{\text{половины линии}}.$

б. Суммарные потери на выходной линии,

$L_{\text{вых.линии}} = L_{\text{кабеля_АС}} + L_{\text{половины линии}}.$

Таблица 4

Данные калибровки потерь на входной и выходной линии

Час- тота (МГц)	По- тери в ка- беле к ГС, $L_{\text{кабел}}$ я ГС	По- тери в ка- беле к АС, $L_{\text{кабел}}$ я АС	Изме- ренная мощ- ность на АС	По- тери на про- ход ПОС, $L_{\text{всей}}$ линии	По- тери на про- ход ПОС, $L_{\text{всей}}$ линии	Сум- марные потери входной линии, $L_{\text{вх. линии}}$	Сум- марные потери на вы- ходной линии, $L_{\text{вых. линии}}$
50							
818							
868							
750							
800							
850							
900							
950							
100							
1050							
1100							
1150							
1200							
1250							
1300							
1350							
1400							

2.2. Лабораторная работа 2. Определение характеристик усилителя мощности

Задание.

Измерить усиление, сжатие динамического диапазона усиления, гармоническое искажение, найти точку перехвата составляющих третьего порядка и развязку усилителя мощности (УМ) с помощью анализатора спектра (АС).

Необходимое оборудование.

- учебный комплекс DreamCatcher ME1000 (передатчик);
- генератор ВЧ сигналов модели R&S®SMB100A (2 шт.);
- анализатор спектра FSH8 компании Rohde&Schwarz.

Необходимые принадлежности.

Радиочастотный сумматор мощностей, 1 шт.;

коаксиальный кабель SMA(штекер)-SMA(штекер), 2 шт.;

USB-кабель, 1 шт.;

ПК с предустановленным ПО «Панель управления радиочастотного тренажёра/RF ControlPanel».

Измерение усиления, сжатия динамического диапазона усиления и гармонического искажения с помощью анализатора сигнала.

Произведите подключение, как показано на Рис.14, чтобы определить усиление, сжатие динамического диапазона усиления и гармоническое искажение УМ. Используйте значения потерь в кабеле, соединении, дорожке ПП, полученные в выполненной ранее лабораторной работе.

1. Используйте следующие настройки генератора сигнала (ГС):

Частота: 868 МГц.

Мощность: -25 дБм.

2. Используйте следующие настройки АС:

Центральная частота: 868 МГц.

Протяженность: 10 МГц.

Аттенюация на входе: 10 дБ (или автоматическая).

РПП: 100 кГц (или автоматическое).

Усреднение: Вкл.

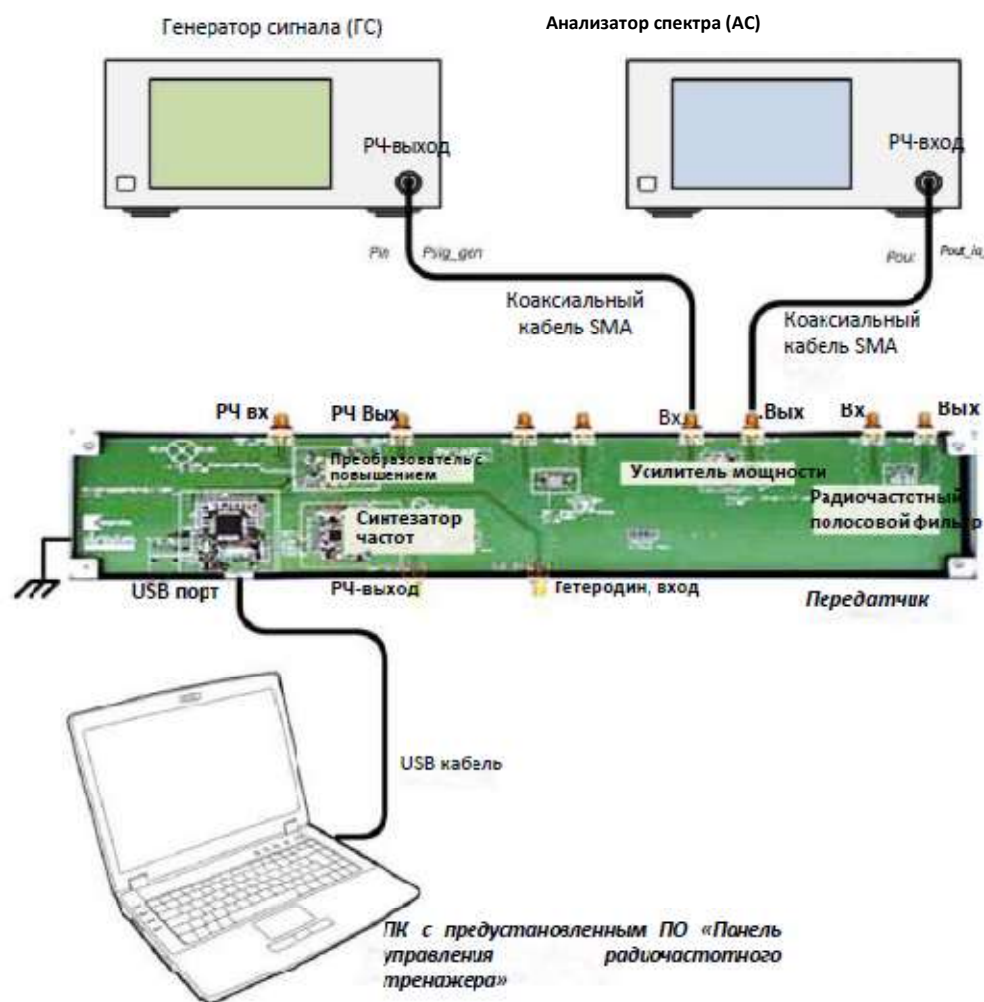


Рис. 14. Общая конфигурация оборудования для измерения данных УМ с помощью АС

3. Откройте «Панель управления радиочастотного тренажёра» на ПК. В качестве платы выберите передатчик и подключитесь, нажав **Connect to RF Tra**. В зоне управления передатчиком нажмите

Power Amplifier Off, чтобы включить питание УМ. При подаче питания на тренажёре загорится светодиод ПП УМ.

Измерения.

а) Какую пиковую частоту и мощность показывает АС? Гармонические частоты, возникающие на АС, следует игнорировать.

Пиковая частота основной гармоники = _____ МГц

Мощность на выходе, $P_{вых_SA_УМ} =$ _____ дБм

б) Чему равно измеренное усиление УМ при мощности на входе = минус 25 дБм?

Усиление при 868 МГц = фактическая выходная мощность УМ, $P_{вых}$ – фактическая входная мощность УМ, $P_{вх}$.

$$= (P_{вых_SA_УМ} + L_{вых.линии}) - (P_{ГС} - L_{вх.линии})$$

$$= (\text{_____ дБм} + \text{_____ дБ}) - (-25 \text{ дБм} - \text{_____ дБ}) = \text{_____ дБ}$$

Где

$$L_{вых.линии} = L_{cable_SA} + L_{half_path}.$$

(потери в кабеле/соединении/дорожке ПП, найденные ранее).

с) *Сравните результаты измерений с данными, полученными от векторного анализатора цепей (ВАЦ). Одинаковы ли они?

4. Измерьте выходную мощность УМ при разных уровнях входной мощности.

Измерения.

а) Заполните таблицу ниже. Используйте значения потерь в кабеле/ ПП/ соединении, L (в дБ), найденные в предыдущем разделе.

Входная мощность ГС, $P_{ГС}$ (дБм)	Фактическая входная мощ- ность УМ $P_{вх.} = P_{ГС} -$ $L_{вх.линии}$ (дБм)	Выходная мощность, из- меренная на АС, $P_{вых_SA_УМ}$ (дБм)	Фактическая выходная мощность УМ, $P_{вых.} =$ $P_{вых_SA_УМ} +$ $L_{вых.линии}$ (дБм)
-15			
-14			
-13			
-12			
-11			
-10			
-9			
-8			
-7			
-6			
-5			
-4			
-3			
-2			
-1			
0			

б) Начертите график $P_{вых.}$ как функции от $P_{вх.}$ в системе координат ниже.



с) При какой выходной мощности усиление на 1 дБ меньше, чем усиление при очень низкой входной мощности?

$P_{1\text{дБ на входе}} = \underline{\hspace{2cm}}$ дБм

$P_{1\text{дБ на выходе}} = \underline{\hspace{2cm}}$ дБм

д) *Соотносятся ли полученные результаты с данными измерений при помощи ВАЦ?

5. Для измерения гармонических искажений используйте следующие настройки:

Настройки ГС:

Частота: 868 МГц.

Мощность: -20 дБм.

Настройки АС:

При задании параметров АС выберите настройки по умолчанию.

Измерения.

а) Укажите различные частоты, отображаемые на АС, и соответствующие уровни мощности.

Частота основной гармоники = $\underline{\hspace{2cm}}$ МГц, Мощность = $\underline{\hspace{2cm}}$ дБм

Частота 2-й гармоники = _____ МГц, Уровень мощно-
сти = _____ дБм

Частота 3-й гармоники = _____ МГц, Уровень мощно-
сти = _____ дБм

Если гармонические частоты слишком малы, чтобы АС мог их зафиксировать, установите аттенюацию на 0 дБ.

Примечание.

Чтобы обеспечить точное измерение частоты, для центральной частоты задайте значение, равное значению нужной частоты. Протяженность SPAN задайте как 10 МГц или меньше.

б) Измените входную мощность ГС на значение P1дБ на входе, измеренное в предыдущем разделе. Что произойдет с гармоническими частотами?

Измерение развязки.

Произведите подключение, как показано на Рис. 15, поменяв ГС и АС, чтобы определить развязку УМ. Используйте значения потерь в кабеле, соединении, дорожке ПП, $L_{\text{кабеля}}$ и $L_{\text{конн_ПП}}$, полученные в выполненной ранее лабораторной работе. Перед разрывом каких-либо соединений убедитесь, что подача постоянного тока на МШУ отключена. Чтобы отключить подачу постоянного тока на МШУ, нажмите **Power Amplifier On/Off** на Панели управления радиочастотного тренажёра.

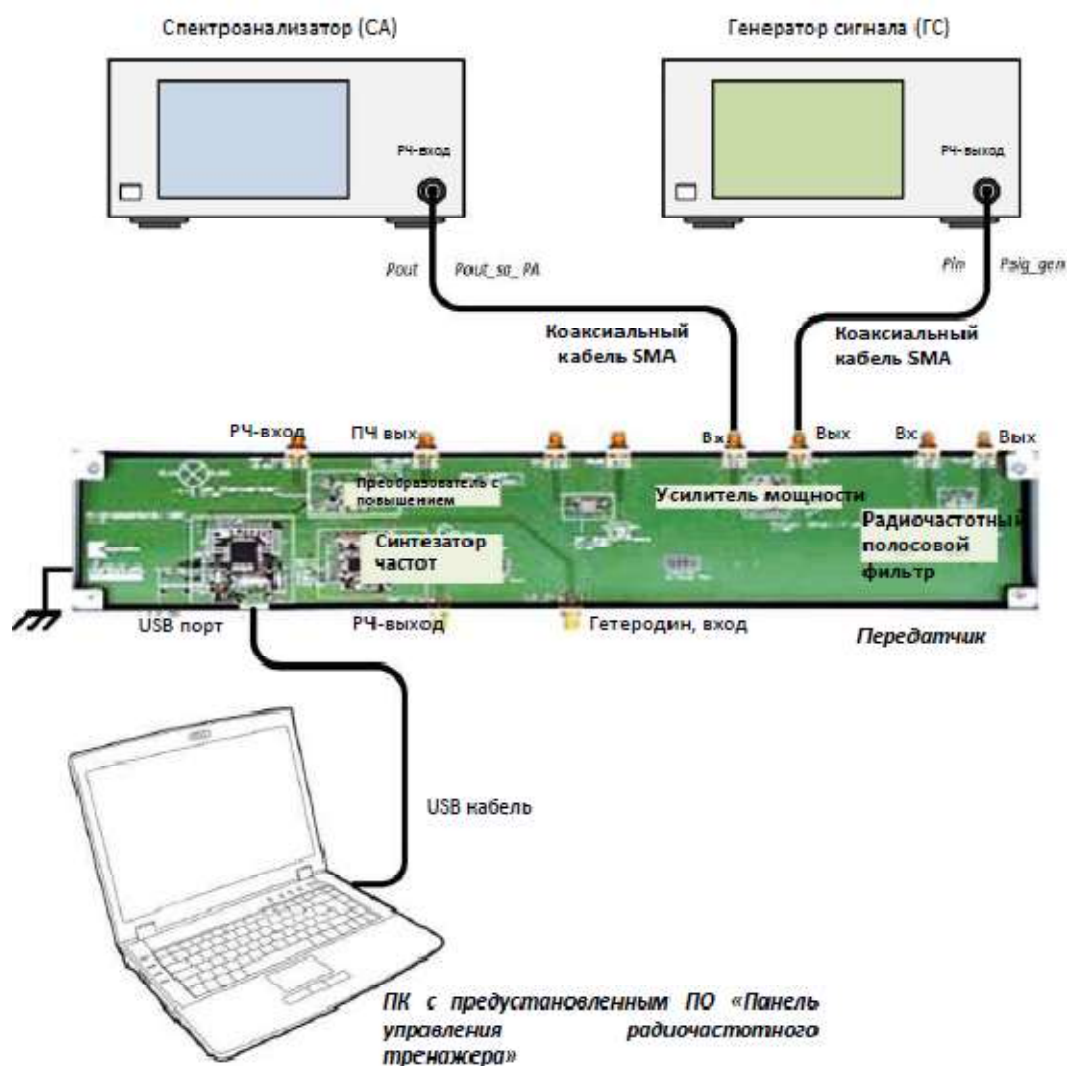


Рис. 15. Расстановка оборудования для измерения развязки УМ

1. Используйте следующие настройки ГС:
Частота: 868 МГц.
Мощность: –20 дБм.
2. Используйте следующие настройки АС:
Центральная частота: 868 МГц.
Протяженность: 10 МГц.
Аттенюация на входе: 10 дБ (или автоматическая).
РПП: 100 кГц (или автоматическое).
Усреднение: Вкл.

3. В зоне управления передатчиком TX UnitControl на «Панель управления радиочастотного тренажёра» нажмите **Power Amplifier Off/On**, чтобы включить питание УМ. При подаче питания на тренажёре загорится светодиод ПП УМ.

Измерения.

а) Какую пиковую частоту и мощность показывает АС? Гармонические частоты, возникающие на АС, следует игнорировать.

Пиковая частота основной гармоник = _____ МГц

Мощность на выходе, $P_{вых. SA_UM}$ = _____ дБм

б) Чему равна измеренная развязка УМ при мощности на входе, равной -25 дБм?

Развязка при 868 МГц = фактическая выходная мощность УМ ,
 $P_{вх.}$ – фактическая входная мощность УМ, $P_{вых.}$

$$= (P_{вых. SA_UM} + \text{потери}) - (P_{ГЧ} - \text{потери})$$

$$= (\text{_____ дБм} + \text{_____ дБ}) - (-25 \text{ дБм} - \text{_____ дБ})$$

$$= \text{_____ дБ}$$

где потери = $L_{cable} + L_{c-pcb}$ (потери в кабеле/коннекторе/дорожке ПП, найденные ранее).

с) *Сравните результаты измерений с данными, полученными от векторного анализатора цепей (ВАЦ). Одинаковы ли они?

Измерения для нахождения точки перехвата составляющих третьего порядка (ТПСТП, TOI, IP3).

Для определения точки ПСТП потребуется поставить эксперимент (см. Рис. 16). При определении точки ПСТП, когда имеется и сильный сигнал, и слабый сигнал, полезно будет установить аттенюатор на максимально высокий уровень (когда уровень шума будет точно ниже слабого сигнала). Когда аттенюатор установлен на высокий уровень, искажение от АС сокращается, что обеспечивает более точное измерение.

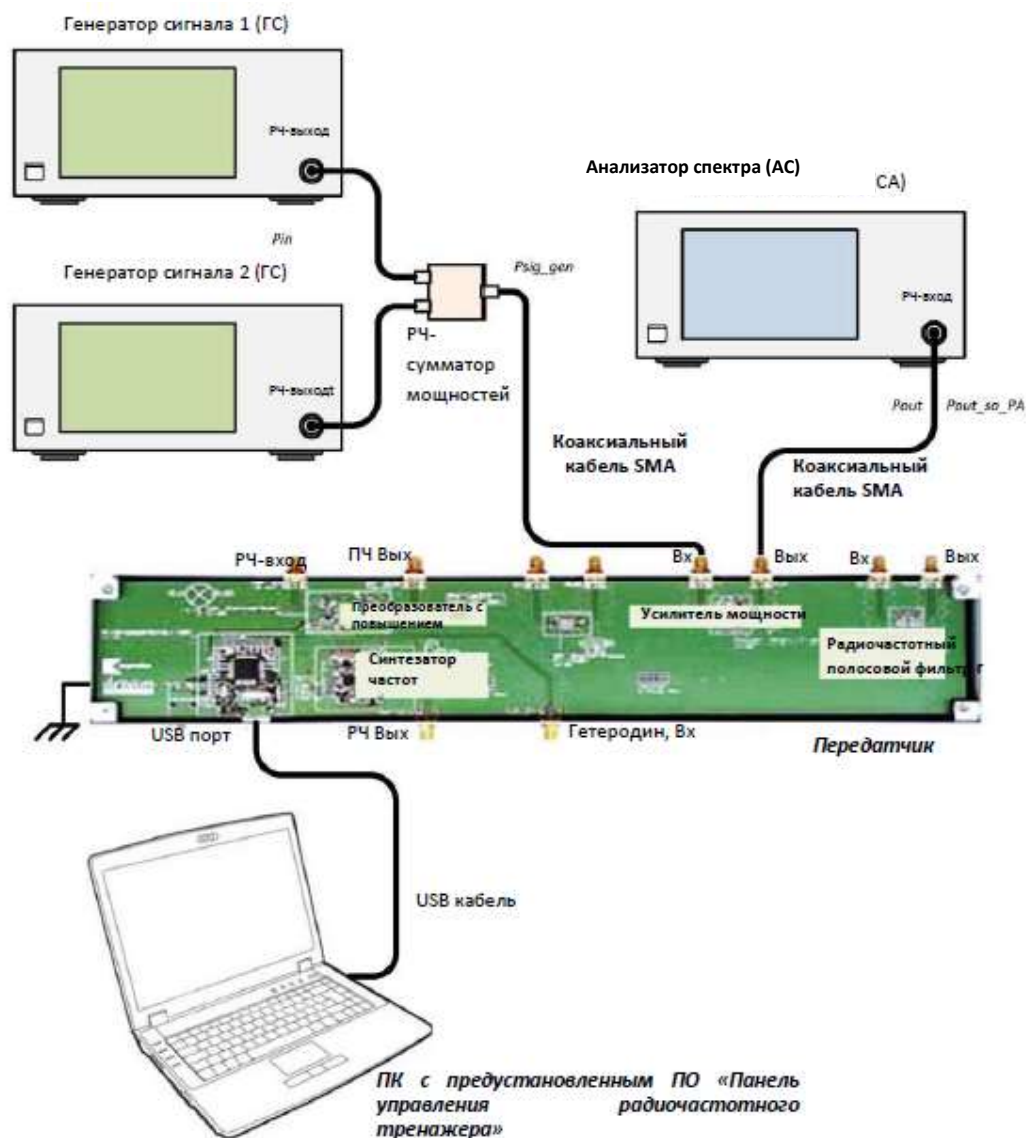


Рис. 16. Установка для двухтонового измерения точки ПСТП

Регулировка выходной мощности сумматора.

1. Произведите подключение, как показано на Рис. 16.
2. Используйте следующие индивидуальные настройки для ГС:

Частота сигнала 1: 867,5 МГц.

Частота сигнала 2: 868,5 МГц.

Уровень мощности (в обоих случаях): Около –10 дБм.

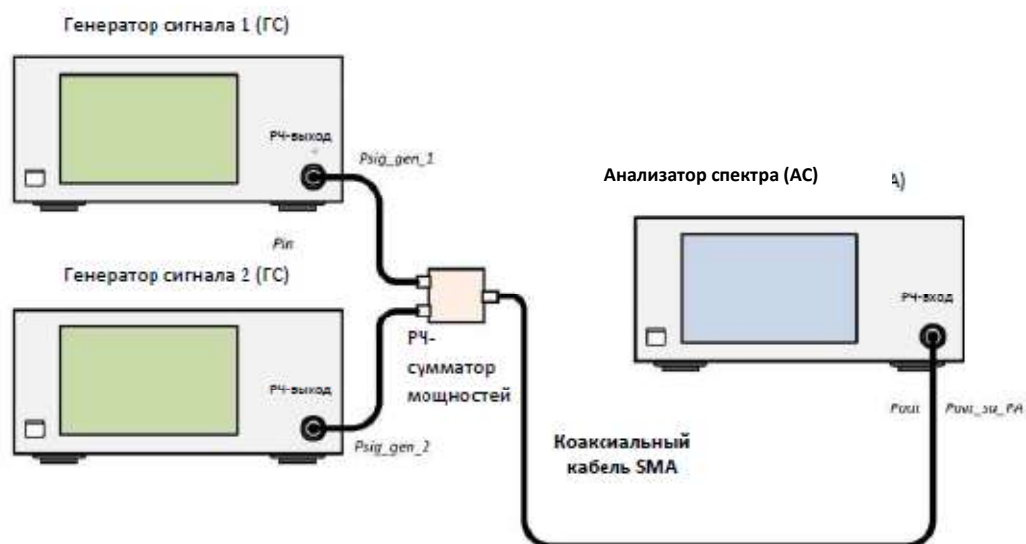


Рис. 17. Регулировка выходной мощности сумматора

3. Используйте следующие настройки АС, при этом установив внутреннюю аттенюацию АС на максимум:

Центральная частота:	868 МГц.
Протяженность:	10 МГц.
Аттенюация на входе:	50 дБ.
РПП:	100 кГц.
Усреднение:	Вкл.

4. Если уровень сигнала сумматора мощностей для двух частот отличается, отрегулируйте одну из них в настройках амплитуды ГС, чтобы получить одинаковую выходную мощность (при использовании поставляемых кабелей SMA выходная мощность должна составлять около $-17,5$ дБм) от РЧ-сумматора мощностей для сигналов 867,5 МГц и 868,5 МГц.

5. Затем произведите подключение, как показано на Рис. 16.

6. В зоне управления передатчиком TX UnitControl на «Панель управления радиочастотного тренажёра» нажмите **Power Amplifier Off/On**, чтобы включить питание УМ. При подаче питания на тренажёре загорится светодиод ПП УМ.

Измерения.

а) Составьте и разметьте схему выходных частот и мощностей, отображаемых на АС. Чтобы отображались интермодуляционные составляющие, может потребоваться изменение РПП.

б) Заполните таблицу ниже. Начните с аттенюации 50 дБ и сокращайте её с шагом в 10 дБ. Используйте экстраполированную формулу, $TOI = (S + \text{потери на выходе}) + D/2$, чтобы рассчитать точку ПСТП (TOI) для каждого значения аттенюации. Потери на выходе = $L_{cable} + L_{c_pcb}$ (потери в кабеле/коннекторе/дорожке ПП, найденные ранее).

Аттенюация	$P_{\text{вых.}}$ при 866,5 МГц	$P_{\text{вых.}}$ при 867,5 МГц	$P_{\text{вых.}}$ при 868,5 МГц	$P_{\text{вых.}}$ при 869,5 МГц	Расчетная точка ПСТП
50 дБ					
40 дБ					
30 дБ					
20 дБ					
10 дБ					
0 дБ					

с) Какая из точек ПСТП для УМ определена наиболее точно?

Подтверждение точки перехвата составляющих третьего порядка (ТПСТП, TOI, IP3).

Теперь необходимо подтвердить, что расчетная точка ПСТП зависит от интермодуляционных составляющих УМ, а не интермодуляционных составляющих АС. Отключите УМ и подключите выход сумматора непосредственно к АС, как показано на Рис. 18.

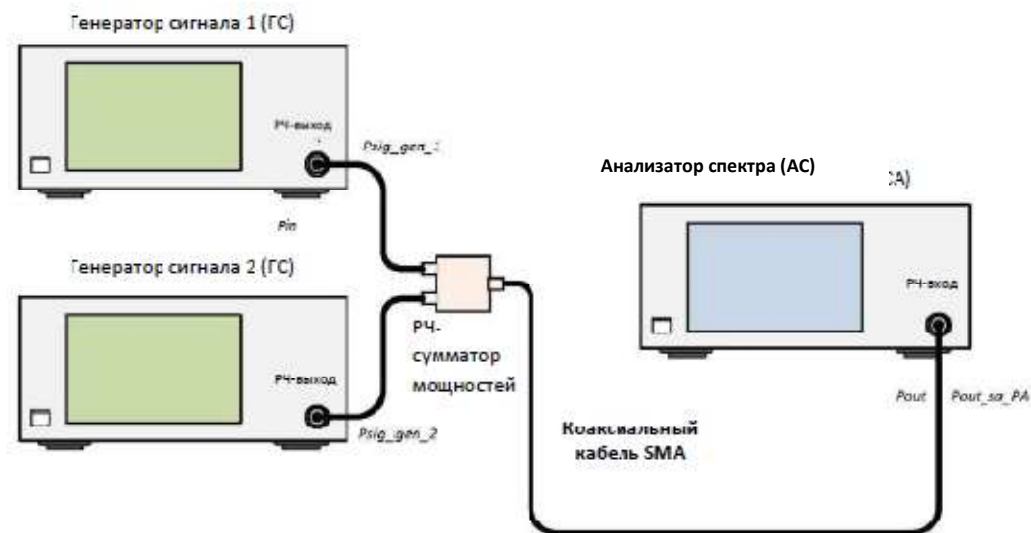


Рис. 18. Установка для подтверждения того, что расчетная точка ПСТП относится к УМ, а не к АС

1. Используйте следующие настройки ГС, чтобы создать частотное разделение в 1 МГц между входными сигналами:

2. Частота сигнала 1: 867,5 МГц.

3. Частота сигнала 2: 868,5 МГц.

Уровень мощности (в обоих случаях): Та же мощность, что в предыдущей выполненной ранее работе, около –10дБм

4. Используйте следующие настройки АС:

Центральная частота: 868 МГц.

Протяженность: 10 МГц.

Аттенюация на входе: 50 дБ (или автоматическая).

РПП: 100 кГц (или автоматическое).

Усреднение: Вкл.

5. Отрегулируйте мощность двух ГС, чтобы выход АС был, как $P_{вых.}$ при 867,5 МГц и $P_{вых.}$ при 868.5 МГц, как записано в таблице для предыдущего теста, проведенного в ходе измерения параметров точки ПСТП.

6. Уменьшите аттенюацию до уровня, когда будут видны интермодуляционные составляющие от смесителя АС.

Измерения.

а) При какой аттенюации начинают появляться интермодуляционные составляющие от АС?

ПСТП от АС начинают появляться, когда внутренняя аттенюация = _____ дБ

б) Объясните, почему на АС появились интермодуляционные составляющие.

с) Если сравнивать с предыдущими результатами, какой замер и расчётные точки ПСТП более точны?

д) Увеличьте аттенюацию до уровня, когда на АС не будут видны интермодуляционные составляющие. Какие частоты и уровни мощности показывает АС теперь?

Частота = _____ МГц, Мощность = _____ дБм

Частота = _____ МГц, Мощность = _____ дБм

е) Определите потери кабеля и РЧ-сумматора мощностей.

Потери (L) = входная мощность от ГС – выходная мощность, отображаемая на АС.

$P_{ГСИ} \text{ (дБм)} - P_{вых.} \text{ (дБм)} = \text{_____ дБ}$

Примечание.

Берите только один из частотных тонов.

2.3. Лабораторная работа 3. Определение характеристик малошумящего усилителя

Задание.

Измерить усиление и развязку малошумящего усилителя (МШУ) посредством анализатора спектра (АС).

Необходимое оборудование.

- Учебный комплекс Dream Catcher ME1000 (приемник);
- генератор ВЧ сигналов модели R&S®SMB100A (2 шт.);
- анализатор спектра FSH8 компании Rohde&Schwarz.

Необходимые принадлежности.

Коаксиальный кабель SMA (штекер) – SMA (штекер), 2 шт.;

USB-кабель, 1 шт.;

ПК с предустановленным ПО «Панель управления радиочастотного тренажёра/RF ControlPanel».

Измерение усиления с помощью АС.

Произведите подключение, как показано на Рис. 19, чтобы определить усиление МШУ. Используйте значения потерь в кабеле, соединении, дорожке ПП, полученные в выполненной ранее лабораторной работе.

Базовые настройки оборудования

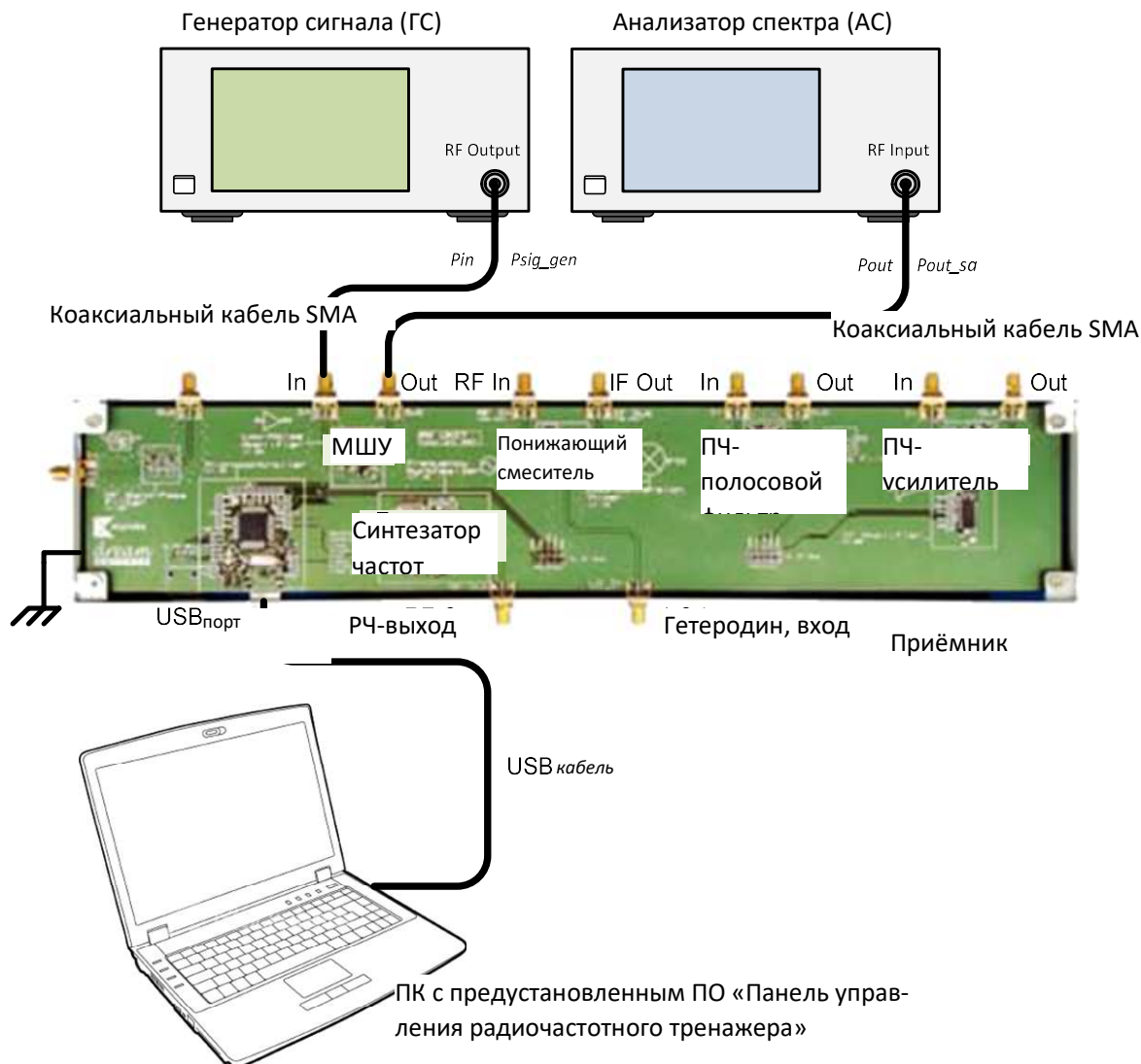


Рис. 19. Общая конфигурация оборудования для измерения данных МШУ с помощью АС

- Используйте следующие настройки ГС:
Частота: 868 МГц.
Мощность: –15 дБм.
- Используйте следующие настройки АС:
Центральная частота: 868 МГц.
Протяженность: 10 МГц.
Аттенюация на входе: 10 дБ (или автоматическая).
РПП: 100 кГц (или автоматическое).

Усреднение: Вкл.

3. Запустите «Панель управления радиочастотного тренажёра» на ПК. В качестве платы выберите приёмник и подключитесь, нажав **Connect to RF Trainer**. В зоне управления приёмником нажмите **LNA Off/On**, чтобы включить питание МШУ. При подаче питания на тренажёре загорится светодиод ПП МШУ.

Измерения.

а) Какую пиковую частоту и мощность показывает АС? Гармонические частоты, возникающие на АС, следует игнорировать.

Пиковая основная частота = _____ МГц

Выходная мощность, $P_{out_sa_LNA}$ = _____ дБм

б) Чему равно измеренное усиление МШУ при мощности на входе = -15 дБм?

Усиление при 868 МГц = фактическая выходная мощность МШУ, P_{out} – фактическая входная мощность МШУ, P_{in} =

$= (P_{out_sa_PA} + L_{output_path}) - (P_{sig_gen} - L_{input_path})$

$= (\text{_____ дБм} + \text{_____ дБ}) - (-15 \text{ дБм} - \text{_____ дБ})$
 $= \text{_____ дБ},$

где $L_{output_path} = L_{cable_sa} + L_{half_path}$

(потери в кабеле/ соединении/ дорожке ПП, найденные ранее),

$L_{input_path} = L_{cable_sg} + L_{half_path}$

(потери в кабеле/ соединении/ дорожке ПП, найденные ранее).

с) *Сравните результаты измерений с данными, полученными от ВАЦ. Одинаковы ли они?

Измерение развязки.

Чтобы определить развязку МШУ, произведите подключение, как показано на Рис. 20, поменяв ГС и АС. Используйте значения потерь в кабеле, соединении, дорожке ПП, L_{cable} и L_{c_pcb} , полученные в выполненной ранее лабораторной работе. Перед разрывом каких-либо соединений убедитесь, что подача постоянного тока на МШУ

отключена. Чтобы отключить подачу постоянного тока на МШУ, нажмите **LNA Off/On** на панели управления радиочастотного тренажёра.

Расстановка оборудования для измерения развязки

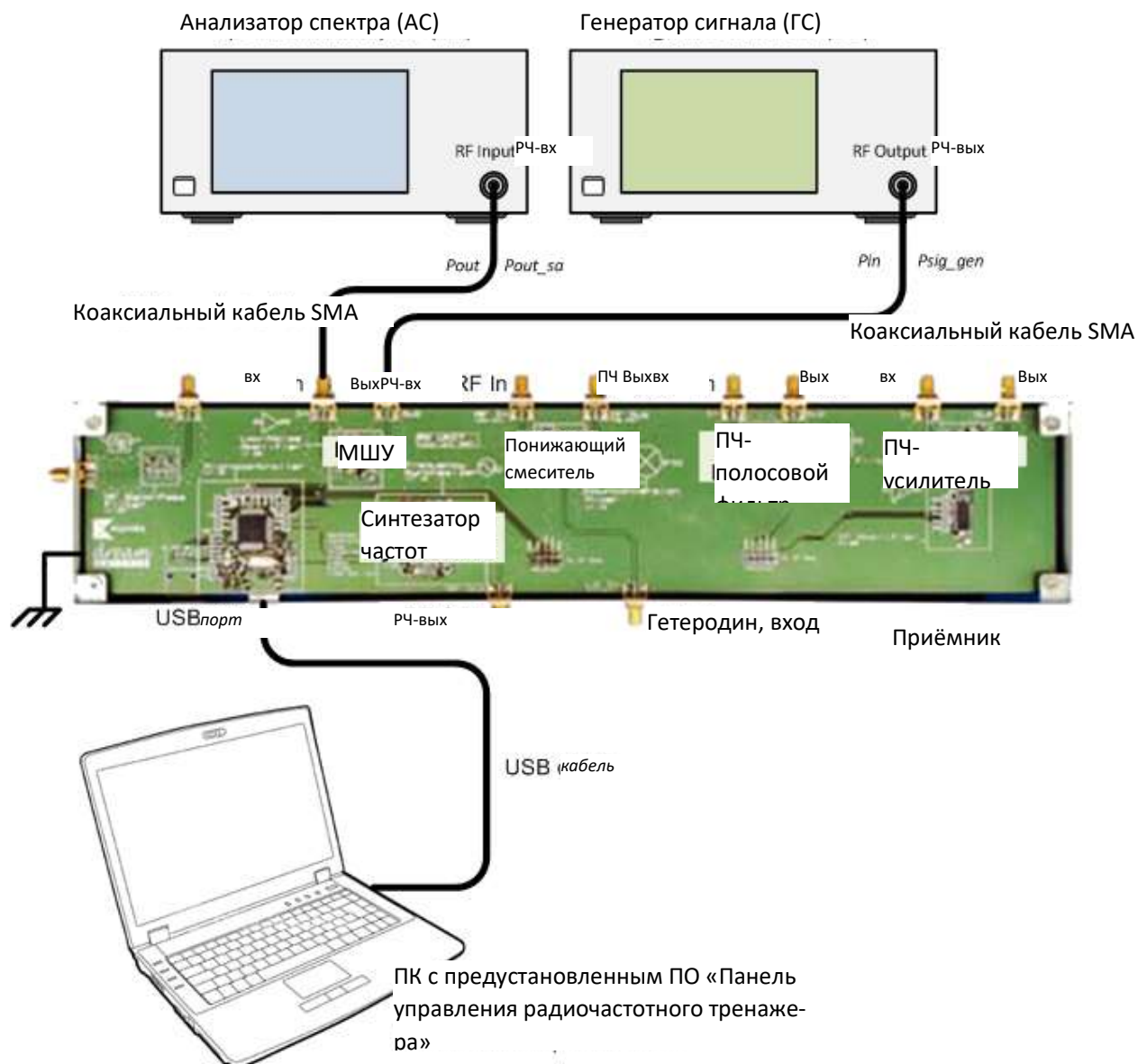


Рис. 20. Конфигурация оборудования для измерения развязки МШУ

1. Используйте следующие настройки ГС:
Частота: 868 МГц.
Мощность: -15 дБм.
2. Используйте следующие настройки АС:
Центральная частота: 868 МГц.

Протяженность: 10 МГц.
 Аттенюация на входе: 10 дБ (или автоматическая).
 РПП: 100 кГц (или автоматическое).
 Усреднение: Вкл.

3. Запустите «Панель управления радиочастотного тренажёра» на ПК. В качестве платы выберите приёмник и подключитесь, нажав **Connect to RF Trainer**. В зоне управления приёмником нажмите **LNA Off/On**, чтобы включить питание МШУ. При подаче питания на тренажёре загорится светодиод ПП МШУ.

Измерения.

а) Какую частоту и мощность показывает АС? Гармонические частоты, появляющиеся на АС, следует игнорировать.

Пиковая частота основной гармоники = _____ МГц

Выходная мощность, $P_{out_sa_LNA}$ = _____ дБм

б) Чему равна измеренная развязка МШУ при входной мощности –15 дБм?

Развязка при 868 МГц = фактическая выходная мощность МШУ, P_{out} – фактическая входная мощность МШУ, P_{in} =

$$= (P_{out_sa_PA} + L_{output_path}) - (P_{sig_gen} - L_{input_path})$$

$$= (_____ \text{ дБм} + _____ \text{ дБ}) - (-15 \text{ дБм} - _____ \text{ дБ})$$

$$= _____ \text{ дБ}$$

с) *Сравните результаты измерений с данными, полученными от ВАЦ. Одинаковы ли они?

2.4. Лабораторная работа 4. Определение параметров полосового фильтра

Задание.

Измерить вносимые потери, полосу пропускания и полосу подавления радиочастотного полосового фильтра с помощью анализатора спектра.

Необходимое оборудование.

- учебный комплекс DreamCatcher ME1000 (передатчик);
- генератор ВЧ сигналов модели R&S®SMB100A;
- анализатор спектра FSH8 компании Rohde&Schwarz.

Необходимые принадлежности.

Коаксиальный кабель SMA(штекер) - SMA(штекер), 2 шт.;

ПК с предустановленным ПО «Панель управления радиочастотного тренажёра/RF ControlPanel».

Измерение вносимых потерь с помощью АС.

Произведите подключение, как показано на Рис. 21, чтобы определить вносимые потери РЧ-фильтра. Используйте значения потерь в кабеле, соединении, дорожке ПП, (*Lcable* и *Lc_pcb*) полученные в проведённой ранее лабораторной работе.

1. Используйте следующие настройки ГС:

Частота: 868 МГц.

Мощность: -15 дБм.

2. Используйте следующие настройки АС:

Центральная частота: 868 МГц.

Протяженность: 10 МГц.

Аттенюация на входе: 10 дБ (или автоматическая).

РПП: 100 кГц (или автоматическое).

Усреднение: Вкл.

Вносимые потери при 868 МГц = – усиление при 868 МГц = _____ дБ

с) *Сравните результаты измерений с данными, полученными от векторного анализатора цепей (ВАЦ). Одинаковы ли они?

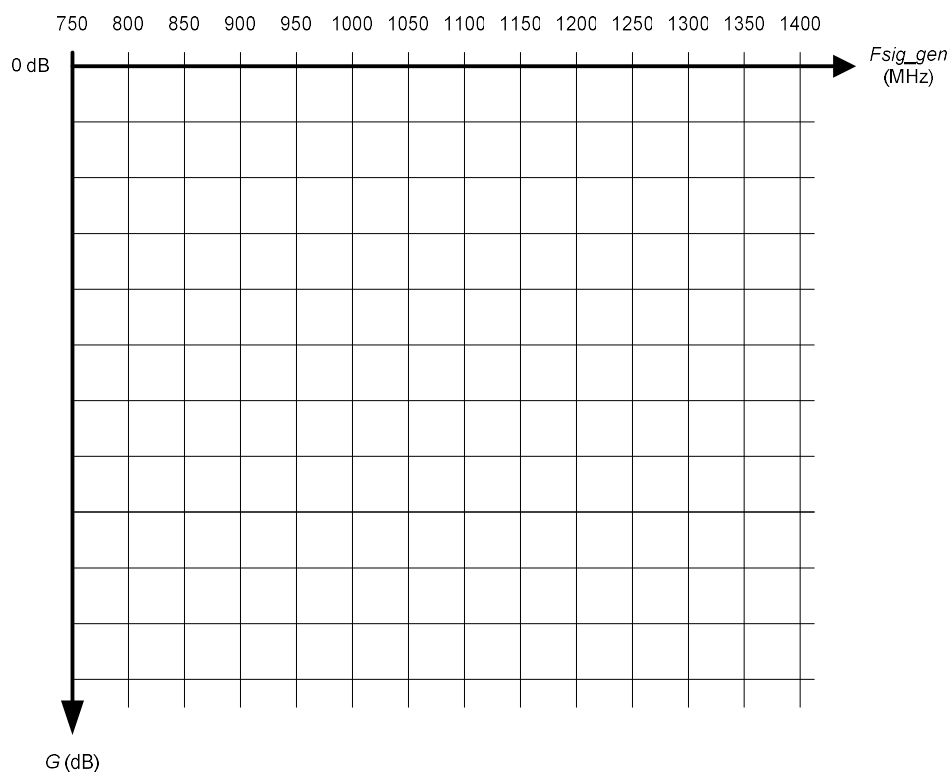
3. Измерьте выходную мощность фильтра при разных входных частотах.

Измерения.

а) Заполните таблицу ниже. Используйте значения потерь в кабеле/ПП/ соединении, L (в дБ), найденные в проведённой ранее лабораторной работе.

Частота ГС, $f_{ГС}$ (МГц)	Фактическая входная мощность $P_{in} = -15 - L_{вх. линии}$ (дБм)	Измеренная выходная мощность на АС, $P_{вых АС фильтр}$ (дБм)	Фактическая выходная мощность, $P_{out} = P_{вых АС фильтр} + L_{вых. линии}$ (дБм)	Усиление, $G = P_{вых} - P_{вх}$ (дБ)
750				
800				
850				
900				
950				
1000				
1050				
1100				
1150				
1200				
1250				
1300				
1350				
1400				

б) Начертите график усиления, G , как функции от входной частоты ГС, $f_{ГС}$, в координатной системе, приведенной ниже.



с) На основе графика выше рассчитайте полосу пропускания 3 дБ и центральную частоту РЧ-фильтра

Расчетная нижняя частота при 3 дБ, $f_{\text{верх_3дБ}} =$ _____ МГц

Расчетная верхняя частота при 3 дБ, $f_{\text{ниж_3дБ}} =$ _____ МГц

Расчетная полоса пропускания при 3 дБ, $f_{\text{верх_3дБ}} =$ _____ МГц

Центральная частота $f_c = (f_{\text{верх_3дБ}} + f_{\text{ниж_3дБ}})/2 =$ _____ МГц

Измерение подавления.

1. Используйте следующие настройки:

Настройки ГС:

Частота: 500 МГц.

Мощность: -15 дБм.

Настройки АС:

Центральная частота: 500 МГц.

Протяженность: 10 МГц.
 Атенюация на входе: 10 дБ (или автоматическая).
 РПП: 100 кГц (или автоматическое).
 Усреднение: Вкл.

Измерения.

а) Какую пиковую частоту и мощность показывает АС? Гармонические частоты, появляющиеся на АС, следует игнорировать.

Пиковая основная частота = _____ МГц

Уровень выходной мощности, $P_{вых_АС_фильтр}$ = _____ дБм

б) Чему равно измеренное подавление при 500 МГц для фильтра при мощности на входе, равной –15 дБм?

Подавление при 868 МГц = фактическая выходная мощность, P_{out} – фактическая входная мощность, P_{in} =

$$= (P_{вых_АС_фильтр} + L_{вых. линии}) - (P_{ГС} - L_{вх. линии})$$

$$= (\text{_____ дБм} + \text{_____ дБ}) - (-15 \text{ дБм} - \text{_____ дБ}) = \text{_____ дБ}$$

где $L_{вых. линии} = L_{кабеля АС} + L_{половины линии}$

(потери в кабеле/ соединении /дорожке ПП, найденные ранее),

$L_{вх. линии} = L_{cable_sg} + L_{половины линии}$

(потери в кабеле/ соединении /дорожке ПП, найденные ранее).

с) *Сравните результаты измерений с данными, полученными от ВАЦ. Одинаковы ли они?

д) Повторите процедуру для частот незатухающей волны, равных 1736 МГц и 2604 МГц.

Подавление при 1736 МГц = _____ дБ

Подавление при 2604 МГц = _____ дБ

ЛИТЕРАТУРА

1. *Осадченко В.Х.* Операционные усилители: учебное пособие / В.Х. Осадченко, Я.Ю. Волкова; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020 – 156 с.
2. *Поляков А.Е.* Методика измерения $IP2$ и $IP3$ двухтонового сигнала / А.Е. Поляков, Л.В. Стрыгин // Труды МФТИ. – 2012. – Т. 4. – № 2. – С. 54–63.