

VI. Методики измерений

УДК 53.088 + 621.3.019.1 + 621.396.664

**ОЦЕНКА ДИАПАЗОНОВ ИЗМЕРЕНИЯ
КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА И КОЭФФИЦИЕНТА
ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ МЕТОДА Y-ФАКТОРА****И.Н. Ваулин**АО «НПФ «Микран», Томск, Россия,
vaulin@micran.ru

Аннотация. При нормировании диапазонов измерения коэффициента шума (КШ) и коэффициента передачи (КП) для метода Y-фактора производители оборудования, как правило, не указывают на их взаимосвязь. В данной работе приводятся вывод формул для теоретической оценки диапазонов измерения КШ и КП измерителями коэффициента шума (ИКШ) через параметры их амплитудной (динамической) характеристики. Эти формулы показывают связь КШ и КП, а также позволяют более гибко и корректно оценивать соответствующие диапазоны измерения и подбирать измерительное оборудование. Для удобства практического использования вводятся понятия «шумовая площадь» и «шумовой диапазон».

Ключевые слова: коэффициент шума, метод Y-фактора, коэффициент передачи, диапазон измерений, амплитудная (динамическая) характеристика, шумовая площадь, шумовой диапазон.

**THE NOISE FIGURE AND THE GAIN RANGE
ESTIMATION FOR Y-FACTOR METHOD****I.N. Vaulin**Micran, Tomsk, Russia,
vaulin@micran.ru

Abstract. Manufacturers usually doesn't revolve noise figure (NF) measurement range dependence upon gain (G) range for Y-factor method. There are derived the formulas for the theoretical estimation of the NF and the G measurement ranges powered by the noise figure analyzers (NFA). These formulas are obtained through NFA dynamic characteristic parameters in this work. That one shows the relation of G and NF, also allows to evaluate the measurement ranges more flexible and to choice measurement devices correctly. There are entered the terms "noise area" and "noise range" for practical convenience.

Keywords: noise figure, Y-factor method, gain, dynamic range, dynamic characteristic, noise area, noise range.

Одним из основных параметров СВЧ усилительных и приёмных устройств (и их компонентов — усилителей, преобразователей, транзисторов и др.) является их пороговая чувствительность, которая ограничивается главным образом уровнем случайных электромагнитных колебаний, «шумов», возникающих внутри устройства. В качестве параметра, характеризующего пороговую чувствительность, зачастую используется так называемый «коэффициент шума» (КШ) [1, 2]. По определению, КШ — это отношение «сигнал — шум» на входе исследуемого устройства (ИУ) к отношению «сигнал — шум» на его выходе; рассчитывается в отн. ед. по формуле [1, 3, 4]:

$$F_{\Sigma} = (S_{\text{вх}} / N_{\text{вх}}) / (S_{\text{вых}} / N_{\text{вых}}) = N_{\text{вых}} / (G_{\Sigma} \cdot N_{\text{вх}}), \quad (1)$$

где F_{Σ} — КШ ИУ (индекс « Σ » используется в связи с тем, что в общем случае ИУ может состоять из нескольких устройств, при этом под ИУ понимается некоторая система), отн. ед.; $S_{\text{вх}}$ — мощность полезного сигнала на входе ИУ, Вт; $N_{\text{вх}}$ — мощность шума на входе ИУ, Вт; $S_{\text{вых}}$ — мощность полезного сигнала на выходе ИУ, Вт; $N_{\text{вых}}$ — мощность шума на выходе ИУ, Вт; G_{Σ} — коэффициент передачи (КП) по мощности ИУ, отн. ед.

Существует множество методов измерения КШ, но одним из наиболее распространённых методов в измерительной технике СВЧ остаётся метод Y фактора [1, 4, 5]. Именно этот метод предлагается ведущими производителями средств измерений (СИ) в задачах, где требуются наибольшая точность и максимальный диапазон измерений. Как правило, метод Y -фактора реализуется в таких СИ, как измерители (анализаторы) коэффициента шума (ИКШ), анализаторы спектра, анализаторы сигнала и др. Далее, для простоты, под «ИКШ» будем понимать любой из этих вариантов.

Математическая суть этого метода заключается в нахождении двух неизвестных — КШ и КП ИУ на шумовом сигнале. Измерение КШ и КП ИУ проводится в два этапа. На первом этапе измеряются КШ и КП измерительного тракта самого ИКШ (этап пользовательской калибровки), а на втором — КШ и КП ИУ (этап измерений) [5]. Для каждого этапа требуются два уравнения, которые получаются в результате двух измерений при подаче на вход ИКШ или ИУ (соответственно для калибровки или измерения), различных уровней шумового сигнала (т.н. «горячий» и «холодный» источники). В результате измеряется отношение (Y -фактор) $Y_k = P_{\text{ш } h \text{ к}} / P_{\text{ш } c \text{ к}}$ — для калибровки, и $Y = P_{\text{ш } h} / P_{\text{ш } c}$ — для измерения, где $P_{\text{ш } h}$ (или $P_{\text{ш } h \text{ к}}$) — мощность шума на выходе ИКШ при измерении (или калибровке) при подаче на его вход «горячего источника» шума, Вт; а $P_{\text{ш } c}$ ($P_{\text{ш } c \text{ к}}$) — то же, но при подаче «холодного источника», Вт. В качестве источника шумового сигнала в настоящее время, как правило, используют полупроводниковые генераторы шума (ГШ) — меры спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения. Основной характеристикой ГШ является его избыточная относительная шумовая температура (ИОШТ), которая показывает относительную разность мощностей в «горячем» и «холодном» состояниях. Государственный первичный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц ГЭТ 21 хранится во ФГУП «ВНИИФТРИ» [6].

При указании технических характеристик ИКШ ведущие производители оборудования указывают предельные диапазоны измерения КШ и КП, как правило, не упоминая о том, что эти величины взаимосвязаны. На самом деле невозможно достигнуть наибольших значений КШ и КП одновременно. Информацию о том, как эти величины взаимосвязаны, автору также не удалось найти в литературе. Далее в статье приводится вывод соотношений между этими величинами и теоретическая оценка их диапазонов измерения.

Пользуясь определением КШ ИУ, можно записать (отн. ед.) следующее [1, 5]:

$$F_{\Sigma} = 1 + N_{\Sigma} / (N_0 G_{\Sigma}), \quad (2)$$

где N_{Σ} — собственный шум системы, «генерируемый» ею.

Следует заметить, что собственный шум N_{Σ} может быть меньше теплового шума N_0 .

Формулу (1) также можно переписать через Y -фактор в следующем виде [1, 4, 5]:

$$F_{\Sigma} = ENR / (Y - 1), \quad (3)$$

где ENR — действительное значение ИОШТ ГШ, используемого при измерениях, отн. ед.

В свою очередь [1, 5]:

$$ENR = (N_h - N_c) / N_0, \quad (4)$$

где N_h — номинальная шумовая мощность на выходе ГШ, используемого при измерениях, в его включённом («горячем») состоянии в заданной полосе, Вт; N_c — номинальная мощность на выходе ГШ в его выключенном («холодном») состоянии в заданной полосе, Вт; $N_0 = k \cdot T_0 \cdot B$ — номинальная мощность шума от согласованной нагрузки в той же полосе B [Гц], при стандартной температуре T_0 [К] ($T_0 = 290$ К — в международной практике и 293,16 К по [7, с. 7]), Вт; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ — постоянная Больцмана, Дж/К.

Входная мощность любого ИКШ обычно ограничена сверху либо точкой сжатия входных цепей, либо точкой перегрузки аналого-цифрового преобразователя. Далее условно под точкой сжатия будем понимать любую из этих причин. Снизу же мощность ограничена уровнем собственных шумов ИКШ.

Так как при измерении КШ методом Y -фактора наибольший шумовой сигнал на выходе ИУ $P_{ш h}$ будет наблюдаться при включённом ГШ (в «горячем» состоянии), то очевидно, что чем больше КП ИУ и его собственный шум (или, что равносильно, его КШ), тем быстрее наступит перегрузка приёмника (т.е. ИКШ). Более того, если увеличить ИОШТ ГШ, мощность с выхода ГШ N_h также увеличится, а значит, перегрузка наступит ещё при более малых значениях КП ИУ и его собственного шума. Таким образом, три параметра — КП ИУ, КШ ИУ и ИОШТ — оказываются «связанными» через входную шумовую мощность ИКШ при включённом ГШ $P_{ш h}$, которая, в свою очередь, ограничена сверху точкой сжатия ИКШ $P_{ш h \max}$. Минимальный же шумовой сигнал на выходе ИУ $P_{ш c}$ будет наблюдаться при выключенном ГШ. Чем меньше КП ИУ и его КШ, тем быстрее $P_{ш c}$ «утонет» в собственных шумах ИКШ. Таким образом, КП и КШ ИУ дополнительно связаны через входную рабочую мощность при выключенном ГШ $P_{ш c}$, которая, в свою очередь, ограничена некоторой минимальной входной мощностью $P_{ш c \min}$, далее условно называемой чувствительностью ИКШ. Выведем формулы, отражающие

описанные взаимосвязи. Если из соображений практического удобства ввести понятия «шумовая площадь ИУ» S_0 и «шумовой диапазон» R_0 , под которыми соответственно будем понимать сумму КП и КШ ИУ в дБ и сумму КП и ИОШТ в дБ, то задачу оценки диапазонов измерения КШ и КП можно свести к нахождению пределов $S_{0\max}$, $S_{0\min}$, $R_{0\max}$, $R_{0\min}$, которые позволяют измерять ИКШ при заданной ИОШТ ГШ.

Для выявления взаимосвязи через точку сжатия выведем выражение для $P_{шh}$. Для этого, исходя из физических соображений, запишем уравнение шумовых мощностей при подключённом ко входу ИКШ ИУ и ГШ, причём ГШ находится во включённом состоянии и предполагается, что между ГШ, ИУ и ИКШ нет переотражений (т.е. волновые сопротивления соответствующих входов и выходов равны между собой):

$$P_{шh} = N_h \cdot G_{ИУ} \cdot G_{ИКШ} + N_{ИУ} \cdot G_{ИКШ} + N_{ИКШ} \cdot G_{ИКШ}, \quad (5)$$

где $P_{шh}$ — шумовая мощность, индицируемая ИКШ, Вт; $G_{ИУ}$ — КП ИУ по мощности на шумовом сигнале, отн. ед.; $G_{ИКШ}$ — КП по мощности измерительного тракта ИКШ на шумовом сигнале, отн. ед.; $N_{ИУ}$ — мощность собственного шума ИУ на его выходе в заданной полосе, Вт; $N_{ИКШ}$ — уровень мощности собственного шума ИКШ в заданной полосе, приведённый к его входу, Вт.

Для выключенного же состояния ГШ уравнение шумовых мощностей имеет вид:

$$P_{шc} = N_0 \cdot G_{ИУ} \cdot G_{ИКШ} + N_{ИУ} \cdot G_{ИКШ} + N_{ИКШ} \cdot G_{ИКШ}, \quad (6)$$

Если ИКШ при изготовлении калиброван по мощности таким образом, что можно считать справедливыми соотношения

$$G_{ИКШ} = 1 \text{ [отн. ед.]}, N_{ИКШ} = 0 \text{ [Вт]}, \quad (7)$$

т.е. выполнены условия «идеальной калибровки», тогда (5) переписывается в виде:

$$P_{шh} = N_h \cdot G_{ИУ} + N_{ИУ}. \quad (8)$$

Так как отличие выходного сопротивления твердотельных ГШ в выключенном состоянии от сопротивления согласованной нагрузки в рамках рассматриваемой задачи не существенно, то введём допущение $N_c \approx N_0$. Тогда из (4) можно записать:

$$N_h \approx N_0 \cdot (ENR + 1). \quad (9)$$

Выражая из (8) $N_{ИУ}$ и подставляя его в выражение, аналогичное (2) (где вместо N_Σ и F_Σ соответственно будут $N_{ИУ}$ и $F_{ИУ}$), а также заменяя N_h согласно (9), можно получить связь КП и КШ ИУ (все величины в отн. ед.):

$$F_{ИУ} \approx P_{ho} / G_{ИУ} - ENR, \quad (10)$$

или

$$S_0 + R_0 \approx P_{ho}, \quad (11)$$

где $P_{ho} = P_{шh} / N_0$ — относительная входная мощность ИКШ при включённом ГШ, отн. ед.

Из (10) видно, что для некоторого заданного значения P_{ho} на выходе ИУ потенциальные значения КШ и КП ($F_{иу п}$ и $G_{иу п}$), которые может иметь ИУ для данного P_{ho} , связаны через ИОШТ ГШ. На рис. 1 приводятся зависимости $F_{иу п}$ от $G_{иу п}$ для разных значений P_{ho} . Из рис. 1, а также из (11) можно заметить, что при уменьшении $G_{иу}$ и ENR сумма КШ и КП ИУ в дБ (т.е. S_0) стремится к P_{ho} . Таким образом, верхние пределы КШ и КП ИУ ($F_{иу max}$ и $G_{иу max}$), при измерении которых ИКШ находится на грани перегрузки, оказываются ограниченными некоторой относительной точкой сжатия ИКШ $P_{ho max}$. То есть для заданного $F_{иу}$ и ENR , например, максимально возможный КП, который можно измерить на ИКШ, можно из (10) найти по формуле:

$$G_{иу max 1} \approx P_{ho max} / (F_{иу} + ENR). \quad (12)$$

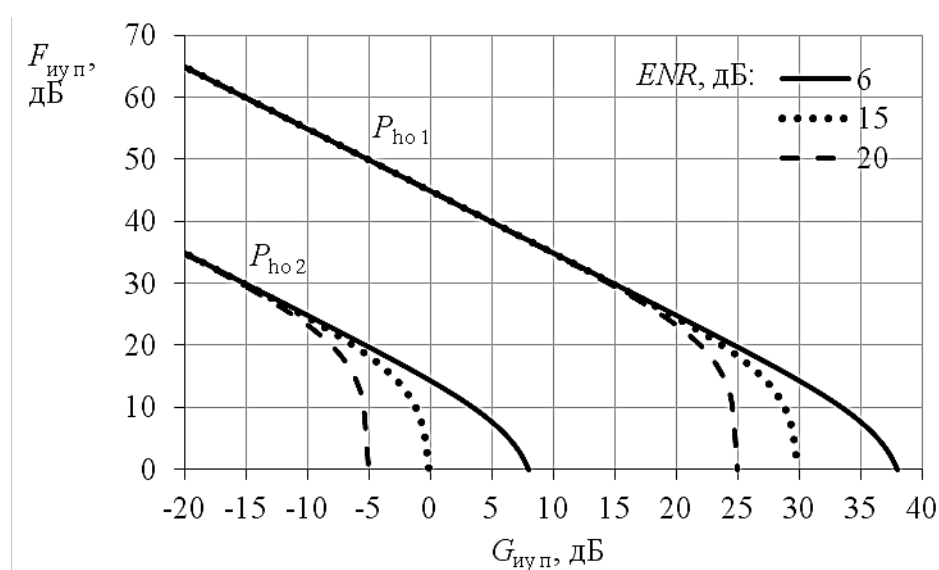


Рис. 1. Взаимосвязь $F_{иу п}$, $G_{иу п}$, и ENR для $P_{ho 1} = 45$ дБ (верхние три кривые) и $P_{ho 2} = 15$ дБ (нижние три кривые)

Также можно записать $F_{иу max 1}$ через $G_{иу}$. Так как из определения КШ известно, что $F_{иу} \geq 1$ отн. ед., то наименьшее теоретическое значение КШ, в отн. ед., которое возможно измерить на любом ИКШ, известно, то есть:

$$F_{иу min min} = 1, \quad (13)$$

следовательно, из (10) можно просто найти максимальный КП при заданном ENR :

$$G_{иу max} = P_{ho max} / (1 + ENR), \quad (14)$$

соответственно

$$R_{0 max} \approx G_{иу max} \cdot (1 + ENR) = P_{ho max}. \quad (15)$$

Более детальные исследования, которые, возможно, будут приведены в следующей публикации, показывают, что при $G_{\text{ИУ}} [\text{дБ}] \leq (G_{\text{ИУ max}} [\text{дБ}] - 10)$ вторым слагаемым в левой части (11) можно пренебречь, т.е. максимальная шумовая площадь будет

$$S_{0 \text{ max}} \approx P_{h0 \text{ max}} \text{ при } G_{\text{ИУ}} [\text{дБ}] \leq (G_{\text{ИУ max}} [\text{дБ}] - 10), \quad (16)$$

в противном случае $S_{0 \text{ max}}$ будет зависеть от конкретного значения R_0 .

Максимальное же значение КШ $F_{\text{ИУ max}}$ из (10) найти сложнее, так как наименьшее возможное значение КП $G_{\text{ИУ min min}}$, в отличие от $F_{\text{ИУ min min}}$, заранее не определено.

Приведём соображения для нахождения $G_{\text{ИУ min min}}$. Очевидно, что минимальные значения КП ИУ соответствуют случаю, когда в качестве ИУ выступает устройство, имеющее КП < 1 отн. ед., например аттенюатор. Запишем формулу вычисления КП по методу Y-фактора [9], отн. ед.:

$$G_{\text{ИУ}} = (P_{\text{ш h}} - P_{\text{ш c}}) / (P_{\text{ш h к}} - P_{\text{ш c к}}), \quad (17)$$

где $P_{\text{ш h}}$ и $P_{\text{ш c}}$ — как и ранее, мощности, отображаемые ИКШ, при включённом и выключенном ГШ при подключённом ко входу ИКШ ИУ (т.е. на этапе измерения), Вт; $P_{\text{ш h к}}$, $P_{\text{ш c к}}$ — мощности, отображаемые ИКШ, при включённом и выключенном ГШ, когда он подключён непосредственно ко входу ИКШ (т.е. на этапе пользовательской калибровки), Вт.

Так как для $G_{\text{ИУ}} \leq 1$ отн. ед. справедливо выражение $P_{\text{ш h}} \leq P_{\text{ш h к}}$ и $P_{\text{ш c}} \approx P_{\text{ш c к}}$, то минимальное значение $G_{\text{ИУ}}$ будет достигаться при минимальном значении числителя и максимальном значении знаменателя в (17). Теоретическим минимумом для КП является 0 отн. ед. (или $-\infty$ дБ). Числитель в (17) тем меньше, чем меньше $G_{\text{ИУ}}$; минимальное теоретическое значение числителя стремится к нулю Вт, но на практике ограничено флуктуациями. Знаменатель, в свою очередь, будет тем больше, чем больше ENR ; теоретически равен ∞ Вт при $ENR = \infty$ отн. ед. На практике, если $P_{\text{ш h}} \leq P_{\text{ш h к}}$, ENR ограничен точкой сжатия ИКШ на этапе пользовательской калибровки, когда ко входу ИКШ непосредственно подключён ГШ. То есть условие достижения КП ИУ $G_{\text{ИУ min min}}$ сводится к равенству числителя в (17) некоторому минимальному порогу флуктуаций и равенству $ENR = ENR_{\text{max}}$, при котором ИКШ находится на грани перегрузки на этапе пользовательской калибровки. Распишем эти условия.

Найдём значения числителей из (5), (6) и (9) (для идеальной калибровки по (7)):

$$P_{\text{ш h}} - P_{\text{ш c}} = G_{\text{ИУ min}} \cdot (N_h - N_0) = G_{\text{ИУ min}} \cdot N_0 \cdot ENR, \quad (18)$$

если задаться некоторым минимальным порогом флуктуаций, то

$$G_{\text{ИУ min}} \cdot N_0 \cdot ENR = n \cdot \sigma_{\text{фл}}, \quad (19)$$

где $\sigma_{\text{фл}}$ — среднее квадратическое отклонение флуктуаций мощности, Вт; n — некоторое положительное действительное число.

Выражая из последнего равенства $G_{\text{иу min}}$, получим:

$$G_{\text{иу min}} = n \cdot \sigma_{\text{фл0}} / ENR, \quad (20)$$

где $\sigma_{\text{фл0}} = \sigma_{\text{фл}} / N_0$, отн. ед., соответственно

$$R_{0 \text{ min}} \approx n \cdot \sigma_{\text{фл0}}. \quad (21)$$

Если $\sigma_{\text{фл}}$ изначально задано в дБ, то перед расчётом $\sigma_{\text{фл0}}$ и подстановкой в (20) перевод в Вт рекомендуется проводить согласно [8], т.е. по формуле:

$$\sigma_{\text{фл}} [\text{Вт}] = P_{\text{ш c}} [\text{Вт}] \cdot (10^{0,1 \cdot \sigma_{\text{фл}} [\text{дБ}]} - 1).$$

Выражение (20) для $G_{\text{иу min}}$ — это минимальное значение КП при всех возможных $F_{\text{иу}}$ для заданного ENR . Для нахождения $G_{\text{иу min min}}$ нужно найти ENR_{max} . Чтобы получить выражение для ENR_{max} , запишем уравнение мощностей, аналогичное (5), только для этапа пользовательской калибровки:

$$P_{\text{ш h к}} = N_h \cdot G_{\text{икш}} + N_{\text{икш}} \cdot G_{\text{икш}},$$

заменяя N_h согласно (9), для условия идеальной калибровки (7) получим:

$$ENR = P_{ho \text{ к}} - 1,$$

где $P_{ho \text{ к}}$ — относительная входная мощность ИКШ при включенном ГШ на этапе калибровки, отн. ед.;

$$ENR_{\text{max}} = P_{ho \text{ max}} - 1. \quad (22)$$

Подставляя (22) в (20), в итоге получим:

$$G_{\text{иу min min}} = n \cdot \sigma_{\text{фл0}} / (P_{ho \text{ max}} - 1), \quad (23)$$

а после подстановки (20) и (23) в (10) при условии $P_{ho} = P_{ho \text{ max}}$ найдём:

$$F_{\text{иу max}} \approx (P_{ho \text{ max}} / (n \cdot \sigma_{\text{фл0}}) - 1) \cdot ENR, \quad (24)$$

$$F_{\text{иу max max}} \approx (P_{ho \text{ max}} / (n \cdot \sigma_{\text{фл0}}) - 1) \cdot (P_{ho \text{ max}} - 1). \quad (25)$$

Обратим внимание на то, что для нахождения $F_{\text{иу max}}$ используется не $G_{\text{иу min min}}$, как ожидалось выше, а $G_{\text{иу min}}$, т.к. для $F_{\text{иу max}}$ предполагается, что ENR — это переменная величина, а в (22) и (23) $ENR = \text{const}$. Также следует отметить, что $F_{\text{иу max max}}$ достигается именно при ENR_{max} , а не при некотором ENR_{min} , как можно предположить из (10). Это следует из анализа выражения (24).

Если рассчитать ENR_{max} , например, для $P_{ho \text{ max}} = 80$ дБ (что на практике не редкость), то получим:

$$ENR_{\text{max}} [\text{дБ}] = 10 \cdot \lg (P_{ho \text{ max}} - 1) = 10 \cdot \lg (10^{0,1 \cdot 80 [\text{дБ}]} - 1) \approx 80 \text{ дБ}.$$

Производители ГШ, как правило, предлагают изделия с ENR не более 30 дБ, поэтому для получения $ENR > 30$ дБ совместно с ГШ необходимо использовать усилители, подключая их по специальным схемам, приводимым, например, в [10].

Аналогичным образом для выявления взаимосвязи через чувствительность ИКШ, прибегая к тем же преобразованиям, что и для $P_{шh}$, из (6) для $P_{шc}$ можно получить:

$$F_{иу} \approx P_{co} / G_{иу}, \quad (26)$$

где $P_{co} = P_{шc} / N_0$ — относительная входная мощность ИКШ при выключенном ГШ, отн. ед.;

$$S_0 \approx P_{co}. \quad (27)$$

На рис. 2 приводятся зависимости $F_{иу п}$ от $G_{иу п}$ для разных значений P_{co} . Таким образом, нижние пределы КШ и КП ИУ ($F_{иу min}$ и $G_{иу min}$), при измерении которых ИКШ находится на грани собственных шумов, оказываются ограниченными некоторой чувствительностью ИКШ $P_{co min}$. Зная $P_{co min}$, можно из (26) записать выражения для минимального КШ $F_{иу min 1}$ при заданном $G_{иу}$ и минимального КП $G_{иу min 1}$ при заданном $F_{иу}$. Из (26) и (27) достаточно просто находятся $F_{иу min}$ и $S_{0 min}$:

$$F_{иу min} \approx \max [P_{co min} / G_{иу max}]; [1 \text{ отн. ед.}], \quad (28)$$

где «1 отн. ед.» в правой части появляется из тех соображений, что КШ по определению не может быть меньше 1 отн. ед.;

$$S_{0 min} \approx \max [P_{co min}; G_{иу max}]. \quad (29)$$

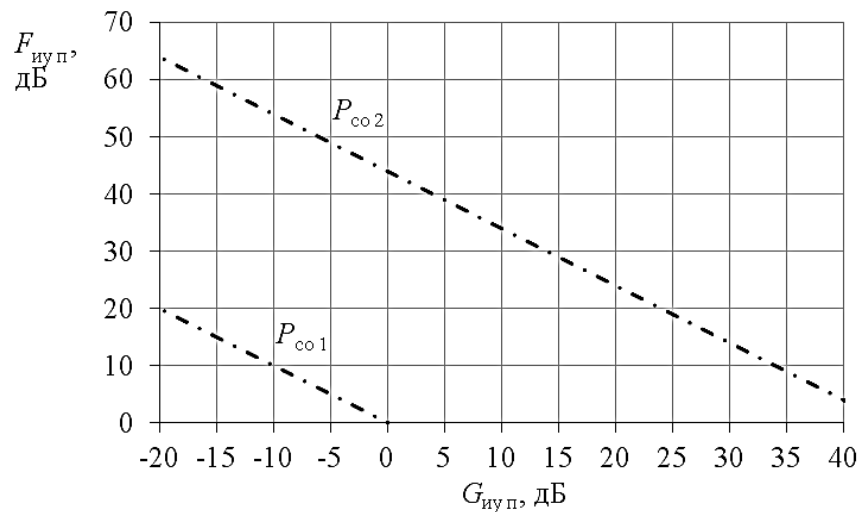


Рис. 2. Взаимосвязь $F_{иу п}$ и $G_{иу п}$ для $P_{со 1} = 0$ дБ (нижняя линия) и $P_{со 2} = 45$ дБ (верхняя линия)

Заметим, что выражения (5) и (6) справедливы как для $G_{иу} > 1$ отн. ед., так и для $G_{иу} \leq 1$ отн. ед. При этом следует иметь в виду, что если под ИУ понимается аттенюатор, то $N_{иу} = N_0 (1 - G_{иу})$, Вт (это выражение можно получить, если записать выражение для выходной мощности аттенюатора

при условии наличия на его входе согласованной нагрузки, т.е. $N_{\text{вых}} = N_0 = N_0 \cdot G_{\text{ИУ}} + N_{\text{ИУ}}$. То есть при достаточно большом ослаблении аттенюатора $G_{\text{ИУ}} \ll 1$ отн. ед. его собственный шум $N_{\text{ИУ}} \approx N_0$ и в это же самое время мощность на его выходе также равна N_0 .

Если для известных значений относительной мощности P_{co} и P_{ho} на выходе ИУ решать систему уравнений (10) и (26) графически, то искомые $G_{\text{ИУ}}$ и $F_{\text{ИУ}}$ будут на пересечении кривой и прямой согласно этим уравнениям. Если же решать систему алгебраически, например относительно $F_{\text{ИУ}}$, то получится выражение, аналогичное (3), где $Y = P_{\text{ho}} / P_{\text{co}}$. Таким образом, для известной точки сжатия $P_{\text{ho max}}$ и чувствительности $P_{\text{ho min}}$ возможные значения S_0 (а значит, возможные значения КП и КШ ИУ тоже) будут соответствовать области между кривой и прямой (см. пример на рис. 3, заштрихованная область).

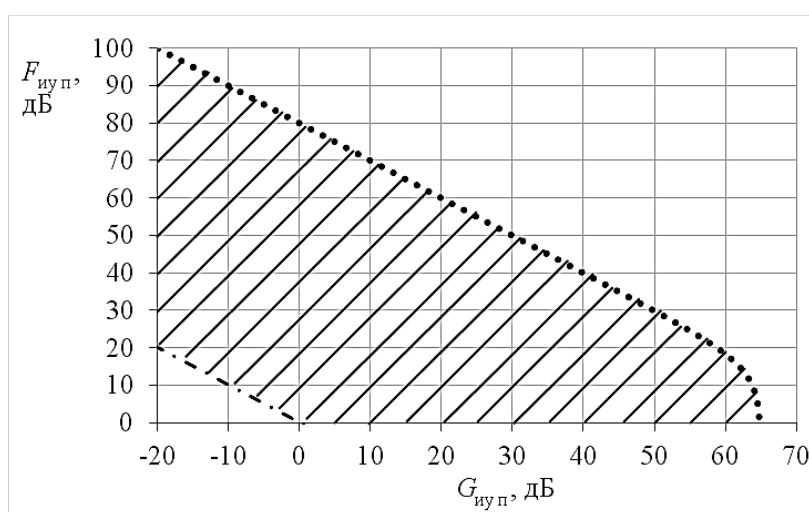


Рис. 3. Область возможных (потенциальных) значений $F_{\text{ИУ п}}$ и $G_{\text{ИУ п}}$ для $P_{\text{co min}} = 0 \text{ дБ}$ (нижняя линия) и $P_{\text{ho max}} = 80 \text{ дБ}$ (верхняя линия)

На практике величины $P_{\text{ho max}}$ и $P_{\text{co min}}$ находятся при снятии амплитудной (динамической) характеристики измерительного тракта ИКШ.

Из рис. 3 видно, что, например, при заданном $G_{\text{ИУ}} = -10 \text{ дБ}$ соответственно $F_{\text{ИУ min 1}} = 10 \text{ дБ}$, а $F_{\text{ИУ max 1}} = 90 \text{ дБ}$; для заданного $F_{\text{ИУ}} = 10 \text{ дБ}$ пределы КП будут $G_{\text{ИУ min 1}} = -10 \text{ дБ}$, а $G_{\text{ИУ max 1}} \approx 63,8 \text{ дБ}$; в свою очередь, $G_{\text{ИУ max}} \approx 65 \text{ дБ}$, а пределы шумовой площади S_0 можно найти по границам заштрихованной области: $S_{0 \text{ min}} = 0 \text{ дБ}$; $S_{0 \text{ max}} = 80 \text{ дБ}$.

Выражение (14) для $G_{\text{ИУ max}}$ — это максимальное из $G_{\text{ИУ max 1}}$ по формуле (12) для всех возможных КШ ИУ. Наибольшее же значение КП ИУ $G_{\text{ИУ max max}}$ будет достигаться при некотором ENR_{min} . Если предположить, что минимальный ENR соответствует случаю, когда числитель в (4) равен определённому минимальному порогу флуктуаций, то есть:

$$N_{h \min} - N_0 = n \cdot \sigma_{\text{фл}},$$

$$ENR_{\min} \approx (N_{h \min} - N_0) / N_0 = n \cdot \sigma_{\text{фл}0},$$

то, подставляя последнее выражение в (14), получим:

$$G_{\text{ИУ max max}} = P_{ho \max} / (1 + n \cdot \sigma_{\text{фл}0}). \quad (30)$$

Подводя итоги, отметим следующее. На данный момент некоторые производители заявляют верхний предел измерения КШ и КП ИУ в 30–40 дБ, неявно пользуясь простой формулой $(ENR [\text{дБ}] + 15)$, без каких-либо пояснений; при этом типичное значение точки сжатия ИКШ $P_{sh \max}$ около –44 дБм в полосе 100 кГц (т.е. $P_{ho \max} \approx 80$ дБ). В действительности полученные соотношения показывают, что для метода Y -фактора величины КП и КШ ИУ, а также ИОШТ ГШ оказываются взаимосвязаны, и без знания этих зависимостей нельзя объективно оценить предельные возможности ИКШ. Из выведенных формул видно, что, например, для $P_{ho \max} \approx 80$ дБ при определённых условиях можно измерить КП ИУ до 65 дБ. В данной работе рассмотрено три вида пределов измерения КШ и КП:

- 1) пределы КШ или КП, если заранее известна одна из этих величин и ИОШТ ГШ — см., например, формулу (12);
- 2) пределы КШ и КП при заданной ИОШТ — формулы (14), (20), (24), (28);
- 3) наименьшие и наибольшие возможные значения КП (при наличии специальных ГШ) и КШ ИУ — (13), (23), (25), (30).

Также выведены пределы для шумовой площади и шумового диапазона, что бывает более удобно для практики — (15), (16), (21), (29). Эти выражения описывают диапазоны измерений КШ и КП ИУ через параметры амплитудной (динамической) характеристики измерительного тракта ИКШ — относительными точкой сжатия $P_{ho \max}$ и чувствительностью $P_{co \min}$ — для случая измерения методом Y -фактора при «идеальной калибровке» ИКШ. В ходе исследования было установлено, что для нахождения нижнего предела измерения КП помимо среднего уровня собственного шума ИКШ необходима информация о величине минимально достижимых флуктуаций.

Выведенные формулы позволяют более объективно нормировать и интерпретировать технические характеристики ИКШ, а также более гибко и обосновано подбирать оборудование для требуемых измерительных задач.

Список литературы

1. Алмазов-Долженко К.И. Коэффициент шума и его измерение на СВЧ / под ред. акад. Н.Д. Девяткова. — М.: Научный мир, 2000. — С. 240.
2. Белоусов А.П., Каменецкий Ю.А. Коэффициент шума. — М.: Радио и связь, 1981. — 112 с.
3. Friis H.T. Noise Figures of Radio Receivers // Proc. of the IRE. — July, 1944. — P. 419–422.

4. Бельчиков С. Коэффициент шума. Теория и практика измерений // Компоненты и технологии. — 2008. — № 4. — С. 34–37. — URL: <https://kit-e.ru>.
5. Бельчиков С. Коэффициент шума. Теория и практика измерений // Компоненты и технологии. — 2008. — № 5. — С. 174–178. — URL: <https://kit-e.ru>.
6. Балаханов М.В. и др. Радиотехнические эталоны для приоритетных научно-технических направлений и новейших технологий: [монография]. — Менделеево: ВНИИФТРИ, 2012. — 120 с.
7. ГОСТ 8.475–82. Стандартный коэффициент шума и эквивалентная шумовая температура усилительных и приёмных устройств. Методика выполнения измерений. — М.: Гос. ком. СССР по стандартам, Изд-во стандартов, 1983. — 27 с.
8. Ваулин И.Н. Оценка неопределённостей (погрешностей) косвенных измерений в дБ // Вестник метролога. — 2021. — № 1. — С. 18–20.
9. Измеритель коэффициента шума X5M-18: руководство по эксплуатации: в 3 ч. Ч. 3. — Томск: Микран, 2011. — URL: <https://www.micran.ru/productions/IIS/kia/nfa/x5m/>.
10. Measurements on devices with very high noise figure: Application Note. — 1EF110. — 06.2020. — Version 0. — München: Rohde & Schwarz, 2020. — 10 с. — URL: www.rohde-schwarz.com/appnote/1EF110.

Статья поступила в редакцию: 05.08.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 06.07.2022 г.

Статья принята в работу: 05.08.2022 г.