

## 2. Чувствительность радиоприёмных устройств

Чувствительность – одна из основных характеристик радиоприёмного устройства. Она определяет его способность принимать слабые сигналы. В диапазоне СВЧ чувствительность приёмника определяется в первую очередь шумами. Невозможность приёма очень слабых сигналов обусловлена, как правило, не тем, что их нельзя усилить до нужного уровня, а тем, что в радиоприёмнике кроме полезного сигнала присутствуют шумы – как внешние, принимаемые антенной, так и собственные, возникающие в каскадах приёмника. Поэтому, усиливая сигнал, мы одновременно будем усиливать и шумы. Определяемая при этих условиях чувствительность называется *шумовой чувствительностью*; именно она и будет рассматриваться.

Количественное определение чувствительности зависит от типа РПУ. Например,

***чувствительность РПУ РЛС сантиметрового диапазона волн*** – это номинальная\*) мощность сигнала в антенне, при которой на выходе линейной части приёмника обеспечивается заданное отношение сигнал-шум при заданном уровне сигнала.

В соответствии с этим определением в дальнейшем будут получены выражения для расчёта чувствительности.

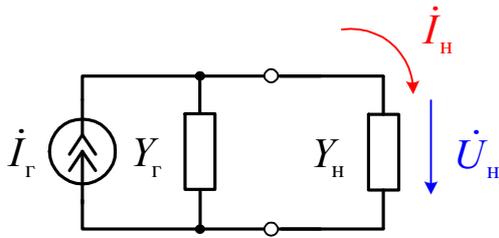
### ***2.1. Номинальная мощность двухполюсника. Коэффициент передачи номинальной мощности четырёхполюсника***

При расчёте шумовых характеристик как отдельных каскадов приёмника, так и РПУ в целом удобно использовать понятия ***номинальной мощности двухполюсника и коэффициента передачи номинальной мощности четырёхполюсника***. Дадим определения этих понятий.

Рассмотрим эквивалентную схему активного двухполюсника (источника сигнала либо шума) (рис. 2.1). В общем случае и внутренняя

---

\*) Понятие номинальной мощности будет определено в п. 2.1.



**Рис. 2.1. Активный двух-полюсник, нагруженный на проводимость  $Y_n$**

проводимость эквивалентного источника сигнала (генератора)  $Y_g = g_g + jb_g$ , и проводимость нагрузки  $Y_n = g_n + jb_n$  – комплексные.

Из курса «Основы теории цепей» известно, что в случае гармонического колебания мощность, отдаваемая генератором в нагрузку, равна

$$P_n = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ \dot{U}_n \dot{I}_n^* \}, \quad (2.1)$$

где  $\dot{U}_n$ ,  $\dot{I}_n$  – комплексная амплитуда напряжения на нагрузке и тока в нагрузке, равные соответственно

$$\dot{U}_n = \frac{\dot{I}_g}{Y_g + Y_n}, \quad \dot{I}_n = \dot{U}_n Y_n = \frac{\dot{I}_g}{Y_g + Y_n} Y_n. \quad (2.2)$$

Подставляя (2.2) в (2.1), получим

$$P_n = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{\dot{I}_g}{Y_g + Y_n} \frac{\dot{I}_g^*}{(Y_g + Y_n)^*} Y_n^* \right\} = \frac{1}{2} \frac{|\dot{I}_g|^2}{|Y_g + Y_n|^2} \operatorname{Re} \{ Y_n^* \} = \frac{1}{2} |\dot{I}_g|^2 \frac{g_n}{|Y_g + Y_n|^2}.$$

Учитывая, что  $\frac{1}{2} |\dot{I}_g|^2$  равно квадрату эффективного значения тока генератора  $I_{г.эфф}$ , запишем выражение для мощности в нагрузке в следующем виде:

$$P_n = \frac{I_{г.эфф}^2 g_n}{|Y_g + Y_n|^2}. \quad (2.3)$$

Из курса «Основы теории цепей» известно, что максимальная мощность передаётся в нагрузку при условии согласования, когда  $Y_n = Y_g^*$  и, следовательно,  $Y_g + Y_n = 2g_g$ :

$$P_{n \max} = P_n \Big|_{Y_n = Y_g^*} = \frac{I_{г.эфф}^2 g_g}{(2g_g)^2} = \frac{I_{г.эфф}^2}{4g_g}.$$

Эта мощность, величина которой определяется только параметрами эквивалентного генератора, и называется **номинальной мощностью двухполюсника**.

Максимальная мощность, которую может отдать двухполюсник в нагрузку, называется **номинальной мощностью двухполюсника**. Эта мощность передаётся в нагрузку при условии согласования.

Итак, номинальная мощность двухполюсника равна

$$P_{\text{г.ном}} = \frac{I_{\text{г}}^2}{4g_{\text{г}}}. \quad (2.4,а)$$

Здесь эффективное значение тока эквивалентного генератора для краткости обозначено как  $I_{\text{г}}$ . При использовании эквивалентной схемы двухполюсника с источником ЭДС номинальная мощность равна

$$P_{\text{г.ном}} = \frac{E_{\text{г}}^2}{4R_{\text{г}}}, \quad (2.4,б)$$

где  $R_{\text{г}} = 1/g_{\text{г}}$  – внутреннее сопротивление двухполюсника,  $E_{\text{г}} = I_{\text{г}}R_{\text{г}}$  – эффективное значение ЭДС эквивалентного генератора.

Ясно, что чем больше номинальная мощность двухполюсника, тем больше и мощность, отдаваемая в нагрузку при произвольном рассогласовании, – **фактическая (или проходная) мощность**. Выразим эту мощность через номинальную мощность. В соответствии с (2.3)

$$P_{\text{н}} = \frac{I_{\text{г}}^2 g_{\text{н}}}{|Y_{\text{г}} + Y_{\text{н}}|^2} = \frac{I_{\text{г}}^2 g_{\text{н}}}{(g_{\text{г}} + g_{\text{н}})^2 + (b_{\text{г}} + b_{\text{н}})^2}.$$

В РПУ источником сигнала является либо антенна, либо предыдущий каскад приёмника; нагрузкой являются каскады приёмника. Будем считать, что антенна настроена, т.е. её проводимость чисто активная, а резонансные каскады приёмника настроены на частоту сигнала. В этом случае суммарная реактивная проводимость генератора и нагрузки  $b_{\text{г}} + b_{\text{н}} = 0$ . Поэтому

$$P_{\text{н}} = \frac{I_{\text{г}}^2 g_{\text{н}}}{(g_{\text{г}} + g_{\text{н}})^2} = \frac{I_{\text{г}}^2}{4g_{\text{г}}} \cdot \frac{4g_{\text{г}}g_{\text{н}}}{(g_{\text{г}} + g_{\text{н}})^2}.$$

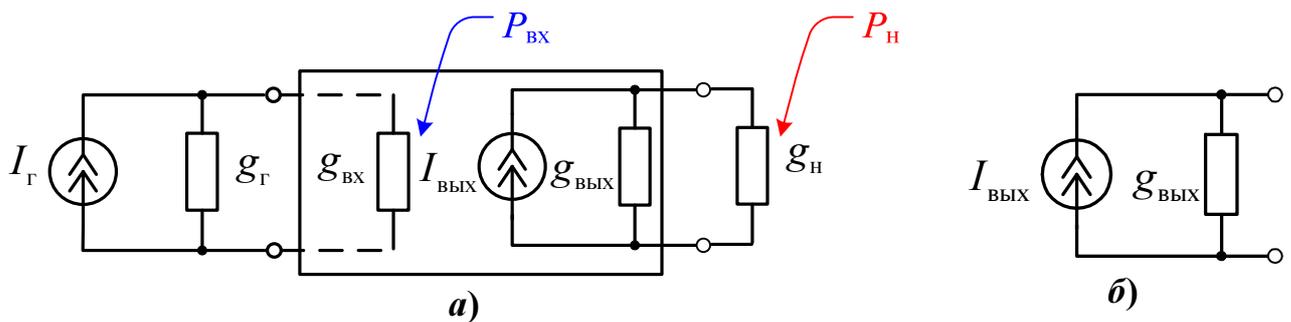
Первый множитель этого выражения представляет собой номинальную мощность двухполюсника, а второй множитель, зависящий только от отношения активных проводимостей  $g_{\text{г}}$  и  $g_{\text{н}}$ , называется **коэффициентом рассогласования нагрузки**

$$q = \frac{4g_{\Gamma}g_{\text{H}}}{(g_{\Gamma} + g_{\text{H}})^2} = \frac{4R_{\Gamma}R_{\text{H}}}{(R_{\Gamma} + R_{\text{H}})^2}. \quad (2.5)$$

Таким образом,

$$P_{\text{H}} = P_{\Gamma, \text{НОМ}} q. \quad (2.6)$$

В связи с тем, что было введено понятие номинальной мощности двухполюсника (источника сигнала), необходимо уточнить определение коэффициента передачи по мощности четырёхполюсника (каскада РПУ). Рассмотрим эквивалентную схему каскада РПУ, изображённую на рис. 2.2,а. Мощность  $P_{\text{ВХ}}$ , потребляемая от источника сигнала, рассеивается на активной составляющей входной проводимости четырёхполюсника  $g_{\text{ВХ}}$ , а мощность  $P_{\text{H}}$ , отдаваемая четырёхполюсником в нагрузку, – на активной составляющей проводимости нагрузки  $g_{\text{H}}$ .



**Рис. 2.2. К определению коэффициента передачи проходной мощности и коэффициента передачи номинальной мощности**

Отношение мощности в нагрузке к мощности, рассеиваемой входной проводимостью четырёхполюсника, называется **коэффициентом передачи проходной мощности**:

$$K_P = P_{\text{H}} / P_{\text{ВХ}}. \quad (2.7)$$

Отношение номинальной мощности на выходе четырёхполюсника  $P_{\text{ВЫХ, НОМ}}$  к номинальной мощности источника сигнала  $P_{\Gamma, \text{НОМ}}$  называется **коэффициентом передачи номинальной мощности**:

$$K_{P, \text{НОМ}} = P_{\text{ВЫХ, НОМ}} / P_{\Gamma, \text{НОМ}}. \quad (2.8)$$

Следует подчеркнуть, что при определении номинальной мощности на выходе четырёхполюсника  $P_{\text{ВЫХ, НОМ}}$  не оговариваются условия согласования на его входе. Это значит, что номинальная мощность на выходе четырёхполюсника и, следовательно, коэффициент передачи номинальной мощности в общем случае зависят от коэффициента рассогласования четырёхполюсника с источником

сигнала. Из определения коэффициента передачи номинальной мощности также следует, что он не зависит от сопротивления нагрузки.

Для того чтобы определить номинальную мощность на выходе четырёхполюсника  $P_{\text{ВЫХ.НОМ}}$ , нужно заменить четырёхполюсник со стороны его выходных зажимов эквивалентным двухполюсником (эквивалентным генератором) (рис. 2.2,б). При этом величина тока эквивалентного генератора определяется как выходной ток четырёхполюсника в режиме короткого замыкания. Номинальная мощность такого эквивалентного двухполюсника равна

$$P_{\text{ВЫХ.НОМ}} = \frac{I_{\text{ВЫХ}}^2}{4g_{\text{ВЫХ}}}.$$

Ясно, что в общем случае, когда четырёхполюсник не обязательно согласован с источником сигнала и нагрузкой, коэффициенты передачи проходной и номинальной мощности различаются. Однако они однозначно связаны друг с другом следующими соотношениями:

$$K_P = \frac{P_{\text{Н}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{P_{\text{ВЫХ.НОМ}} q_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{Г.НОМ}} q_{\text{ВХ}}} = K_{P.\text{НОМ}} \frac{q_{\text{ВЫХ}}}{q_{\text{ВХ}}}, \quad (2.9)$$

$$K_{P.\text{НОМ}} = K_P \frac{q_{\text{ВХ}}}{q_{\text{ВЫХ}}}, \quad (2.10)$$

где  $q_{\text{ВХ}} = \frac{4g_{\text{Г}}g_{\text{ВХ}}}{(g_{\text{Г}} + g_{\text{ВХ}})^2}$  – коэффициент рассогласования по входу,

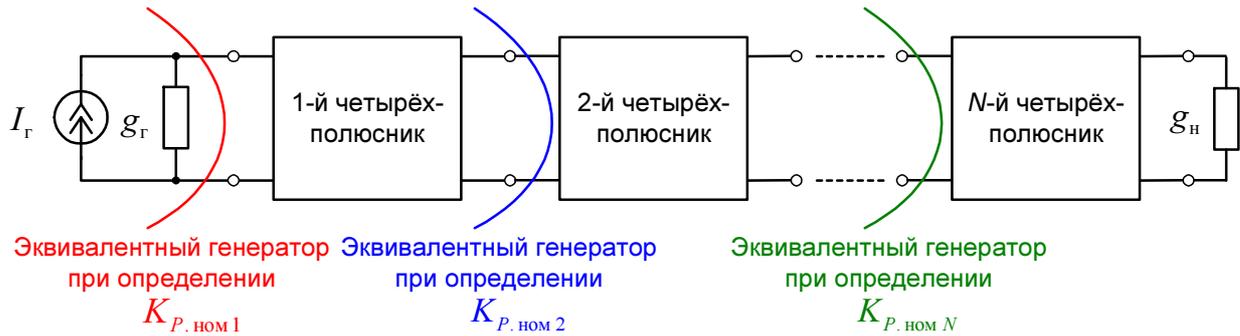
$q_{\text{ВЫХ}} = \frac{4g_{\text{ВЫХ}}g_{\text{Н}}}{(g_{\text{ВЫХ}} + g_{\text{Н}})^2}$  – коэффициент рассогласования по выходу.

Следует подчеркнуть, что в отличие от понятия номинальной мощности, которая означает наибольшую мощность, отдаваемую источником сигнала в нагрузку, коэффициент передачи номинальной мощности не определяет наибольший коэффициент передачи мощности. Поскольку отношение  $q_{\text{ВЫХ}}/q_{\text{ВХ}}$  может быть как меньше единицы, так и больше, то коэффициент передачи проходной мощности может быть как меньше коэффициента передачи номинальной мощности, так и больше его.

При каскадном соединении четырёхполюсников их коэффициенты передачи номинальной мощности перемножаются:

$$K_{P.\text{НОМ}} = K_{P.\text{НОМ}1} K_{P.\text{НОМ}2} \cdots K_{P.\text{НОМ}N}.$$

При этом коэффициент передачи номинальной мощности каждого четырёхполюсника определяется при внутренней проводимости  $g_{\text{Г}}$  источника сигнала, равной выходной проводимости всей системы, предшествующей данному четырёхполюснику (рис. 2.3).



**Рис. 2.3. К определению коэффициента передачи номинальной мощности каскадно-соединённых четырёхполюсников**

## 2.2. Статистические характеристики собственного шума РПУ

Экспериментально установлено, что собственный шум РПУ – это стационарный случайный процесс с нормальным распределением вероятностей мгновенных значений напряжения, т.е. гауссов случайный процесс. Его среднее значение равно нулю, поскольку собственный шум не содержит постоянной составляющей.

Из курса «Статистическая радиотехника» известно, что распределение мощности шума по частоте характеризуется энергетическим спектром (спектральной плотностью мощности) шума. В статистической радиотехнике принято использовать двусторонний (математический) энергетический спектр шума, определённый как для положительных, так и для отрицательных частот. Мы же будем пользоваться односторонним (физическим) энергетическим спектром шума, который определён только для положительных (физически существующих) частот. При этом будем различать **спектральную плотность мощности**  $G(f)$ , которая имеет размерность [Вт/Гц], и **спектральную плотность дисперсии**<sup>\*)</sup>  $G_{\sigma_{\text{ш}}}^2(f)$ , которая имеет размерность [В<sup>2</sup>/Гц]. Интеграл от спектральной плотности по частоте определяет, соответственно, мощность шума

$$P_{\text{ш}} = \int_0^{\infty} G(f) df \quad (2.11)$$

или его дисперсию

$$\sigma_{\text{ш}}^2 = \int_0^{\infty} G_{\sigma_{\text{ш}}}^2(f) df. \quad (2.12)$$

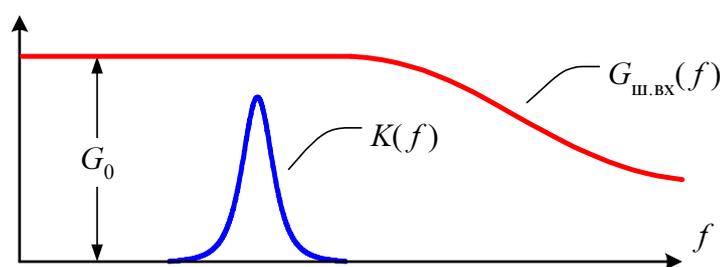
<sup>\*)</sup> Этот термин не является общепринятым; его применяют в том случае, когда нужно подчеркнуть отличие от спектральной плотности мощности. В статистической радиотехнике эта функция называется просто спектральной плотностью случайного процесса.

В последнее время в практических расчётах и технической документации широко используется функция  $G_{\sigma_{\text{ш}}}(f) = \sqrt{G_{\sigma_{\text{ш}}^2}(f)}$ , которая имеет размерность  $[В/\sqrt{Гц}]$  и называется спектральной плотностью шумового напряжения\*\*).

Для радиоприёмных устройств ширина спектра шума, действующего на входе БВЧ, обычно много больше полосы пропускания. Поэтому такой шум можно считать белым, т.е. имеющим равномерную спектральную плотность  $G_0$  (рис. 2.4). В этом случае мощность шума на выходе равна

$$P_{\text{ш.вых}} = G_0 \int_0^{\infty} K_p(f) df, \quad (2.13)$$

где  $K_p(f)$  – частотно-зависимый коэффициент передачи по мощности, пропорциональный квадрату амплитудно-частотной характеристики БВЧ.



**Рис. 2.4. К определению мощности шума на выходе узкополосного БВЧ**

При вычислении мощности шума на выходе БВЧ обычно пользуются понятием **эквивалентной шумовой полосы пропускания** (или, короче, просто **шумовой полосой**). Для того чтобы определить эту характеристику, представим АЧХ четырёхполосника в виде произведения максимального коэффициента передачи  $K_0$  и нормированной АЧХ  $\kappa(f)$ :

$$K(f) = K_0 \kappa(f).$$

Тогда мощность шума на выходе четырёхполосника будет определяться выражением

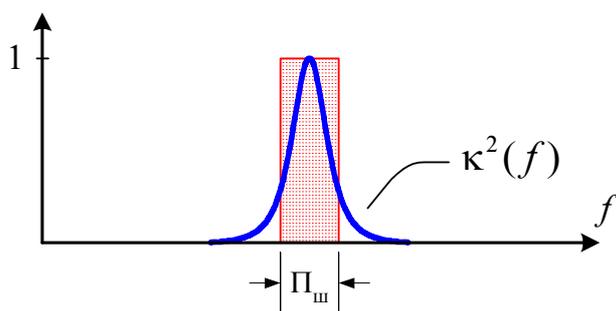
\*\*) Этот термин также не является общепринятым и представляет собой дословный перевод выражения *noise voltage spectral density*, используемого в англоязычной технической документации.

$$P_{\text{ш.вых}} = G_0 K_{P0} \int_0^{\infty} \kappa^2(f) df,$$

где  $K_{P0}$  – максимальное значение коэффициента передачи по мощности.

Величина  $\Pi_{\text{ш}} = \int_0^{\infty} \kappa^2(f) df$  называется **эквивалентной шумовой полосой пропускания четырёхполюсника**. Таким образом,

$$P_{\text{ш.вых}} = G_0 K_{P0} \Pi_{\text{ш}}. \quad (2.14)$$



**Рис. 2.5.** К определению шумовой полосы четырёхполюсника

Шумовая полоса имеет простой геометрический смысл: она равна основанию прямоугольника единичной высоты, площадь которого равна площади под графиком квадрата нормированной АЧХ (рис. 2.5).

### Тепловой шум пассивных цепей

Одной из составляющих собственного шума РПУ являются тепловые шумы пассивных цепей (проводимостей). Эти шумы вызваны хаотическим тепловым движением свободных электронов, которое создаёт случайную разность потенциалов на концах цепи.

Интенсивность теплового шума пассивной цепи с сопротивлением  $R$  характеризуется дисперсией шумовой ЭДС, измеренной в некоторой заданной шумовой полосе  $\Pi_{\text{ш}}$ . В статистической физике показано, что дисперсия шумовой ЭДС определяется **формулой Найквиста**, которая справедлива во всём диапазоне радиочастот:

$$\overline{e_{\text{ш}}^2} = E_{\text{ш}}^2 = 4kTR\Pi_{\text{ш}}, \quad (2.15)$$

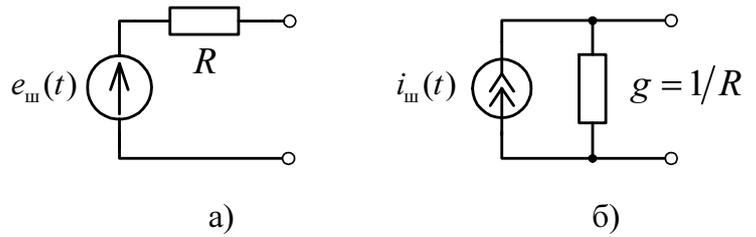
где  $E_{\text{ш}}$  – эффективное значение шумовой ЭДС;  $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура, при которой находится шумящая цепь. Экспериментально установлено, что интенсивность теплового шума не зависит от величины тока, протекающего через цепь (если только этот ток не изменяет температуру цепи).

Шумящую цепь можно представить эквивалентной схемой, со-

держащей источник шумовой ЭДС  $e_{ш}(t)$  и нешумящее сопротивление (рис. 2.6,а) либо источник шумового тока  $i_{ш}(t)$  и нешумящую проводимость (рис. 2.6,б). Поскольку  $i_{ш}(t) = e_{ш}(t)/R$ , то дисперсия шумового тока равна

$$\overline{i_{ш}^2} = I_{ш}^2 = \frac{\overline{e_{ш}^2}}{R^2} = 4kTg\Pi_{ш}. \quad (2.16)$$

где  $I_{ш}$  – эффективное значение шумового тока. Это соотношение называется формулой Найквиста для дисперсии шумового тока эквивалентного источника. Она имеет такой же вид, что и для источника шумовой ЭДС (2.15), только вместо сопротивления  $R$  в неё входит проводимость  $g = 1/R$ .



**Рис. 2.6. Эквивалентные схемы пассивной шумящей цепи**

Интенсивность теплового шума удобнее всего характеризовать номинальной мощностью эквивалентного источника шумового тока. Поскольку внутренняя проводимость эквивалентного источника шумового тока совпадает с «шумящей» проводимостью  $g$ , то, подставляя (2.16) в (2.4,а), получим, что **номинальная мощность теплового шума пассивной цепи, измеренная в полосе  $\Pi_{ш}$ , не зависит от проводимости цепи и равна**

$$P_{ш.ном} = \frac{I_{ш}^2}{4g} = kT\Pi_{ш}. \quad (2.17)$$

Это соотношение называется **формулой Найквиста для номинальной мощности теплового шума**. Разделив (2.17) на шумовую полосу, определим спектральную плотность номинальной мощности теплового шума:

$$G_{ш.ном} = kT. \quad (2.18)$$

Таким образом, **спектральная плотность номинальной мощности теплового шума любого пассивного двухполюсника не зависит от его структуры и параметров и определяется только его температурой.**

Зная номинальную мощность теплового шума, можно определить фактическую мощность, выделяемую на произвольной проводимости нагрузки:

$$P_{\text{ш}} = P_{\text{ш.ном}} q = kT\Pi_{\text{ш}} q, \quad (2.19)$$

где  $q = 4gg_{\text{н}} / (g + g_{\text{н}})^2$  – коэффициент рассогласования нагрузки.

### 2.3. Коэффициент шума и шумовая температура четырёхполюсника (каскада РПУ)

В каскаде РПУ существует множество источников шумов. Эти шумы усиливаются, преобразуются по частоте, проходят через частотно-избирательные цепи и, в конечном счёте, образуют результирующий выходной шум каскада. Мощность этого шума необходимо знать для расчёта отношения сигнал-шум на выходе каскада. Однако использовать мощность выходного шума в качестве характеристики шумовых свойств каскада неудобно, поскольку она зависит также от его коэффициента усиления и шумовой полосы пропускания. Поэтому для характеристики шумовых свойств как отдельных каскадов, так и приёмника в целом вводят специальный безразмерный показатель – **коэффициент шума**. Часто пользуются также (особенно для характеристики шумовых свойств малошумящих устройств) связанной с коэффициентом шума величиной – **шумовой температурой**. Дадим определение этих понятий.

#### 1-е определение коэффициента шума



**Рис. 2.7. К определению коэффициента шума четырёхполюсника**

Рассмотрим линейный четырёхполюсник, на вход которого подаётся сигнал от источника (генератора) с внутренней проводимостью  $g_{\text{г}}$  (рис. 2.7). Входные зажимы обозначим 1 и 1', выходные – 2 и 2'. Четырёхполюсник – это анализируемый каскад приёмника, а генератор – это антенна либо предыдущий каскад. Штриховка показывает, что четырёхполюсник и внутренняя проводимость генератора являются шумящими. Проводимость нагрузки считаем нешумящей, поскольку её

тепловой шум принято учитывать при расчёте шумовых характеристик следующего каскада.

Будем считать, что сигнал на входе четырёхполосника отсутствует, а есть только тепловой шум внутренней проводимости генератора. Тогда на выходе четырёхполосника будет действовать шум, мощность которого складывается из мощности прошедшего через четырёхполосник теплового шума проводимости генератора и мощности собственного шума четырёхполосника.

Для того чтобы охарактеризовать шумовые свойства четырёхполосника, мощность этого суммарного шума сравнивают с некоторой эталонной мощностью. В качестве такого эталона берут мощность той составляющей выходного шума, которая обусловлена тепловым шумом внутренней проводимости генератора, или, иначе говоря, мощность теплового шума внутренней проводимости генератора, пересчитанную на выход четырёхполосника. А поскольку мощность теплового шума зависит от температуры, при которой находится проводимость, то для определённости температуру принято брать стандартной:  $T_0 = 293 \text{ К}$  (т.е.  $20^\circ \text{С}$ ).

**Коэффициентом шума** четырёхполосника называется число, которое показывает, во сколько раз суммарная мощность шумов четырёхполосника вместе с эквивалентом источника сигнала больше мощности шума только эквивалента источника сигнала, пересчитанной на выход. При этом мощность определяется в заданной шумовой полосе  $\Pi_{\text{ш}}$ , а температура, при которой находится внутренняя проводимость эквивалента источника сигнала, считается стандартной (293 К).

Из определения коэффициента шума следует, что он не зависит от шумовой полосы. Мощность теплового шума эквивалента источника сигнала зависит от его внутренней проводимости, поэтому коэффициент шума зависит от  $g_r$ . В связи с этим его следует определять (измерять или рассчитывать) для того значения  $g_r$ , с которым будет работать каскад.

Рассмотрим количественные соотношения в случае согласования четырёхполосника по входу (т.е. с источником сигнала) и по выходу (т.е. с нагрузкой). Поскольку тепловой шум внутренней проводимости источника сигнала и собственный шум статистически независимы, то суммарная мощность шумов четырёхполосника вместе с эквивалентом источника сигнала, рассеиваемая на нагрузке, равна

$$P_{ш.2-2'} = P_{ш.г.2-2'} + P_{ш.соб.2-2'},$$

где  $P_{ш.г.2-2'}$  – мощность шума генератора, приведённая к выходу четырёхполюсника (к зажимам 2–2'),  $P_{ш.соб.2-2'}$  – мощность собственного шума. По определению коэффициента шума он равен

$$K_{ш} = \frac{P_{ш.2-2'}}{P_{ш.г.2-2'}} = \frac{P_{ш.г.2-2'} + P_{ш.соб.2-2'}}{P_{ш.г.2-2'}} = 1 + \frac{P_{ш.соб.2-2'}}{P_{ш.г.2-2'}}. \quad (2.20)$$

Поскольку мощность шума внутренней проводимости генератора, пересчитанная на выход четырёхполюсника, равна  $P_{ш.г.1-1'}K_p$ , то

$$K_{ш} = 1 + \frac{P_{ш.соб.2-2'}}{P_{ш.г.1-1'}K_p} = 1 + \frac{P_{ш.соб.2-2'}/K_p}{P_{ш.г.1-1'}}, \quad (2.21)$$

где  $K_p$  – коэффициент передачи по мощности четырёхполюсника. Назовём величину  $P_{ш.соб.1-1'} = P_{ш.соб.2-2'}/K_p$  **мощностью собственного шума, приведённой ко входу** (или, иначе, **пересчитанной на вход**) **четырёхполюсника**, и в дальнейшем будем её обозначать как  $P'_{ш.соб.}$ <sup>\*</sup>, а мощность шума проводимости генератора – как  $P_{ш.г.}$ . Тогда

$$K_{ш} = 1 + \frac{P'_{ш.соб.}}{P_{ш.г.}}, \quad (2.22)$$

а поскольку при согласовании по входу мощность теплового шума внутренней проводимости генератора, находящейся при температуре  $T_0$ , совпадает с номинальной мощностью, которая в соответствии с (2.17) равна  $kT_0\Pi_{ш}$ , то

$$K_{ш} = 1 + \frac{P'_{ш.соб.}}{kT_0\Pi_{ш}}. \quad (2.23)$$

Величина коэффициента шума часто выражается в децибелах:

$$K_{ш\text{ дБ}} = 10\lg K_{ш}. \quad (2.24)$$

Для коэффициента шума используются и другие, эквивалентные приведённому выше, определения. Рассмотрим их.

<sup>\*</sup> Здесь штрих в обозначении  $P'_{ш.соб.}$  указывает на то, что это не реальная мощность шумов, а некоторая условная величина, которой удобно характеризовать интенсивность собственного шума; использование этой мощности позволяет при расчётах условно считать четырёхполюсник нешумящим.

## 2-е определение коэффициента шума

Ранее коэффициент шума был определён как отношение суммарной мощности шума эталонного источника и собственного шума на выходе четырёхполосника к пересчитанной на выход мощности эталонного шума:

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{ш.2-2}'}}{P_{\text{ш.г.2-2}'}}$$

Суммарная мощность шума  $P_{\text{ш.2-2}'}$  – это мощность на выходе реального, шумящего, четырёхполосника  $P_{\text{ш.вых.реальн.}}$ . Пересчитанную мощность эталонного шума  $P_{\text{ш.г.2-2}'}$  можно рассматривать как мощность на выходе идеального, нешумящего, четырёхполосника  $P_{\text{ш.вых.ид.}}$ . Тогда коэффициент шума будет равен

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{ш.вых.реальн.}}}{P_{\text{ш.вых.ид.}}} \quad (2.25)$$

Пусть теперь на входе четырёхполосника действует некоторый сигнал. Умножая числитель и знаменатель (2.25) на мощность сигнала на выходе четырёхполосника  $P_{\text{с.вых}}$ , получим:

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{ш.вых.реальн.}}}{P_{\text{ш.вых.ид.}}} \cdot \frac{P_{\text{с.вых}}}{P_{\text{с.вых}}} = \frac{(P_{\text{с}} / P_{\text{ш}})_{\text{вых.ид.}}}{(P_{\text{с}} / P_{\text{ш}})_{\text{вых.реальн.}}} \quad (2.26)$$

Таким образом, в соответствии с (2.26) можно дать следующее определение коэффициента шума:

**коэффициент шума** показывает, во сколько раз отношение сигнал-шум по мощности на выходе реального четырёхполосника меньше, чем на выходе идеального (при условии, что входной шум – это тепловой шум внутренней проводимости источника сигнала, находящейся при стандартной температуре).

## 3-е определение коэффициента шума

Поскольку идеальный четырёхполосник не вносит дополнительного шума, то отношение сигнал-шум на его выходе такое же, как на входе, и равно отношению сигнал-шум на входе реального четырёхполосника. Поэтому выражение (2.26) для коэффициента шума можно переписать так:

$$K_{\text{ш}} = \frac{(P_{\text{с}} / P_{\text{ш}})_{\text{вх.реальн.}}}{(P_{\text{с}} / P_{\text{ш}})_{\text{вых.реальн.}}} \quad (2.27)$$

Этому выражению соответствует ещё одно определение коэффициента шума:

**коэффициент шума** показывает, во сколько раз уменьшается отношение сигнал-шум по мощности при прохождении через четырёхполосник (при условии, что входной шум – это тепловой шум внутренней проводимости источника сигнала, находящейся при стандартной температуре).

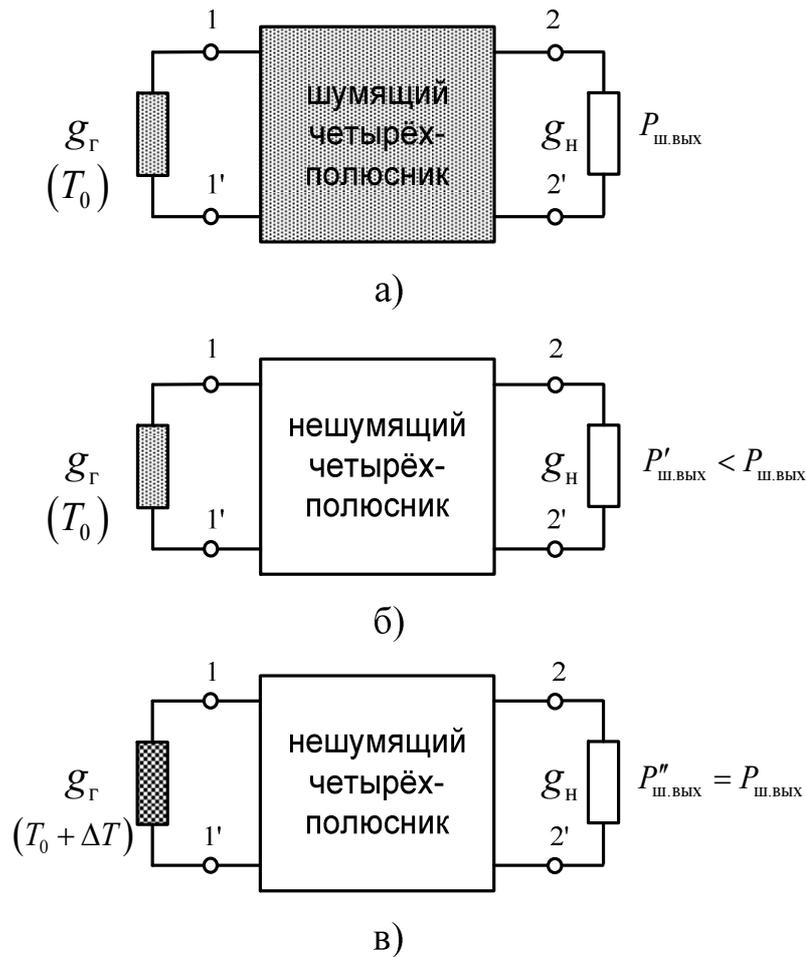
### Шумовая температура

Теперь рассмотрим понятие **шумовой температуры четырёхполосника**. Для этого мысленно проведём следующий эксперимент. Пусть имеется шумящий четырёхполосник с проводимостью генератора  $g_{\text{г}}$ , подключённой ко входу, и проводимостью нагрузки  $g_{\text{н}}$ , подключённой к выходу (рис. 2.8,а). Проводимость  $g_{\text{г}}$ , находящаяся при стандартной (комнатной) температуре  $T_0$ , – это эталонный источник шума. Зафиксируем мощность  $P_{\text{ш.вых}}$  на нагрузке. Она складывается из мощности собственного шума и мощности теплового шума внутренней проводимости генератора, пересчитанной на выход.

Теперь допустим, что мы можем сделать четырёхполосник нешумящим (рис. 2.8,б). Тогда, естественно, суммарная мощность шума на выходе уменьшится:  $P'_{\text{ш.вых}} < P_{\text{ш.вых}}$ . Для того чтобы восстановить прежнее значение этой мощности, увеличим температуру, при которой находится внутренняя проводимость генератора, на некоторую величину  $\Delta T$  (рис. 2.8,в; здесь более густая штриховка внутренней проводимости генератора показывает, что интенсивность теплового шума стала больше). Приращение температуры  $\Delta T$  и называется шумовой температурой четырёхполосника:

$$T_{\text{ш}} = \Delta T.$$

**Шумовой температурой четырёхполосника** называется такая температура, на которую нужно увеличить температуру внутренней проводимости генератора для того, чтобы мощность шума на выходе нешумящего четырёхполосника была равна суммарной мощности шумов шумящего четырёхполосника и проводимости генератора.



**Рис. 2.8. К определению шумовой температуры четырёхполюсника**

Рассмотрим связь между коэффициентом шума и шумовой температурой. По определению шумовой температуры суммарная мощность шумов на выходе четырёхполюсника равна пересчитанной на выход мощности теплового шума внутренней проводимости генератора, находящейся при температуре  $T_0 + T_{ш}$ :

$$P_{ш.ВЫХ} = P_{ш.2-2'} = P_{ш.г.2-2'} \Big|_{T_0+T_{ш}}.$$

Следовательно, выражение (2.20) для коэффициента шума можно записать в следующем виде:

$$K_{ш} = \frac{P_{ш.г.2-2'} \Big|_{T_0+T_{ш}}}{P_{ш.г.2-2'} \Big|_{T_0}}.$$

Мощность теплового шума, которая выделяется на нагрузке, равна произведению мощности шума на входе на коэффициент передачи по мощности:

$$P_{\text{ш.г.2-2'}} \Big|_{T_0+T_{\text{ш}}} = K_P P_{\text{ш.г}} \Big|_{T_0+T_{\text{ш}}},$$

$$P_{\text{ш.г.2-2'}} \Big|_{T_0} = K_P P_{\text{ш.г}} \Big|_{T_0}.$$

При согласовании четырёхполюсника по входу мощность теплового шума равна номинальной мощности, которая определяется формулой Найквиста (2.17):

$$P_{\text{ш.г}} \Big|_{T_0} = kT_0 \Pi_{\text{ш}},$$

$$P_{\text{ш.г}} \Big|_{T_0+T_{\text{ш}}} = k(T_0 + T_{\text{ш}}) \Pi_{\text{ш}}.$$

Следовательно, коэффициент шума равен

$$K_{\text{ш}} = \frac{k(T_0 + T_{\text{ш}}) \Pi_{\text{ш}}}{kT_0 \Pi_{\text{ш}}} = 1 + \frac{T_{\text{ш}}}{T_0}.$$

Таким образом, коэффициент шума и шумовая температура связаны следующими соотношениями:

$$\boxed{K_{\text{ш}} = 1 + \frac{T_{\text{ш}}}{T_0}}, \quad (2.28)$$

$$\boxed{T_{\text{ш}} = T_0 (K_{\text{ш}} - 1)}. \quad (2.29)$$

Из формулы (2.23) для коэффициента шума согласованного четырёхполюсника следует, что мощность его собственного шума, приведённая ко входу и равная номинальной мощности, определяется выражением

$$\boxed{P'_{\text{ш.соб}} = kT_0 (K_{\text{ш}} - 1) \Pi_{\text{ш}}}. \quad (2.30,а)$$

Подставляя в эту формулу выражение (2.28), связывающее коэффициент шума с шумовой температурой, получим, что

$$P'_{\text{ш.соб}} = kT_{\text{ш}} \Pi_{\text{ш}}. \quad (2.30,б)$$

Сравним последнее выражение с формулой Найквиста (2.17) для номинальной мощности теплового шума активной проводимости:

$$P_{\text{ш.ном}} = kT \Pi_{\text{ш}}.$$

Видно, что в выражении (2.30,б) для номинальной мощности приведённого собственного шума **шумовая температура четырёхполюсника играет такую же роль, что и физическая температура шумящей проводимости в формуле Найквиста.**

Если четырёхполосник не согласован с источником сигнала, то фактическая приведённая мощность собственного шума четырёхполосника, в соответствии с (2.6), получается умножением номинальной мощности (2.30) на коэффициент рассогласования по входу:

$$P'_{\text{ш.соб}} = P'_{\text{ш.соб.ном}} q_{\text{вх}} = kT_0 (K_{\text{ш}} - 1) \Pi_{\text{ш}} q_{\text{вх}} = kT_{\text{ш}} \Pi_{\text{ш}} q_{\text{вх}}. \quad (2.31)$$

И коэффициент шума, и шумовая температура в одинаковой степени характеризуют шумовые свойства четырёхполосника. Однако при малой интенсивности собственного шума удобнее пользоваться шумовой температурой, поскольку это более «контрастная» характеристика.

Поясним сказанное следующим примером. Пусть у одного блока коэффициент шума  $K_{\text{ш1}}=1,1$ , а у другого –  $K_{\text{ш2}}=1,05$ . Имея такие значения  $K_{\text{ш}}$ , можно решить, что шумовые свойства этих блоков примерно одинаковы. Однако их шумовые температуры

$$T_{\text{ш1}} = T_0 (K_{\text{ш1}} - 1) = 293 \cdot (1,1 - 1) \approx 30 \text{ К},$$

$$T_{\text{ш2}} = T_0 (K_{\text{ш2}} - 1) = 293 \cdot (1,05 - 1) \approx 15 \text{ К}$$

существенно различаются. И действительно: первый блок будет «шуметь» вдвое сильнее второго.

## ***2.4. Коэффициент шума и шумовая температура пассивного четырёхполосника***

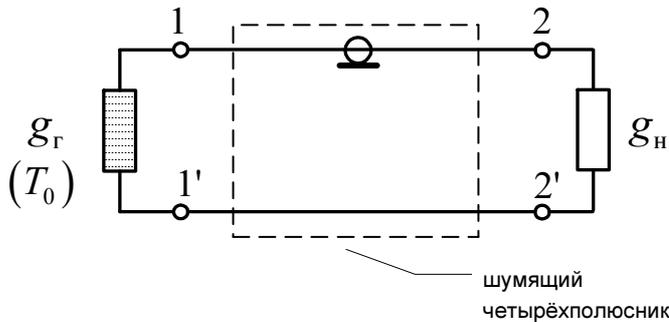
Мы рассмотрели общее определение коэффициента шума и шумовой температуры произвольного четырёхполосника. Рассмотрим теперь частный случай такого четырёхполосника, для которого эти характеристики можно определить в явном виде. Это – пассивный четырёхполосник. К таким четырёхполосникам относятся многие элементы РПУ: передающие линии (фидеры и волноводы), аттенюаторы, циркуляторы, направленные ответвители и другие устройства, не содержащие активных усилительных приборов.

Рассмотрим шумовые свойства пассивного четырёхполосника на примере фидера, т.е. кабеля, соединяющего антенну со входом приёмника. Пусть фидер находится при абсолютной температуре  $T_{\text{ф}}$ . Источником внешнего шума на входе фидера, как обычно, является внутренняя проводимость  $g_{\text{г}}$  источника сигнала, находящаяся при стандартной температуре  $T_0$  (рис. 2.9). На выходе фидера

включена нешумящая нагрузка  $g_n$ . Будем считать, что по входу и выходу фидер согласован с источником сигнала и нагрузкой.

По определению (2.20) коэффициент шума фидера равен

$$K_{ш.ф} = 1 + \frac{P_{ш.соб.2-2'}}{P_{ш.г.2-2'}}$$



**Рис. 2.9.** К определению шумовой температуры пассивного четырёхполюсника

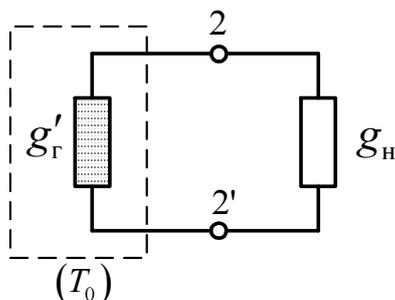
Мощность теплового шума внутренней проводимости генератора, пересчитанная на выход четырёхполюсника, в соответствии с формулой Найквиста (2.17) равна

$$P_{ш.г.2-2'} = kT_0 \Pi_{ш} K_p,$$

где  $K_p$  – коэффициент передачи по мощности согласованного фидера.

Определим мощность собственного шума на выходе фидера. Для этого будем рассуждать следующим образом. Собственный шум фидера – это тепловой шум пассивной цепи. Следовательно, его мощность прямо пропорциональна абсолютной температуре, при которой находится фидер. Поэтому, если мы найдём мощность собственного шума  $P_{ш.соб.2-2'}|_{T_0}$  при стандартной температуре  $T_0$ , то потом сможем определить мощность собственного шума при произвольной температуре  $T_\phi$  по формуле

$$P_{ш.соб.2-2'}|_{T_\phi} = \frac{T_\phi}{T_0} P_{ш.соб.2-2'}|_{T_0}. \tag{2.32}$$



**Рис. 2.10.** Эквивалентная схема пассивного четырёхполюсника при стандартной температуре

Итак, начнём с того, что определим мощность собственного шума фидера при стандартной температуре  $T_0$ . Поскольку внутренняя проводимость источника сигнала по условию определения коэффициента шума находится также при температуре  $T_0$ , то фидер и источник сигнала можно рассматривать как единый шумящий двухполюсник, имеющий температуру  $T_0$

(рис. 2.10). Внутренняя проводимость  $g'_r$  этого эквивалентного двухполюсника равна выходной проводимости четырёхполюсника  $g_n$ , т.к. согласование с нагрузкой сохраняется.

Теперь запишем выражение для суммарной мощности шума на нагрузке двумя способами: сначала исходя из схемы на рис. 2.9, содержащей шумящую внутреннюю проводимость генератора и шумящий четырёхполюсник, (а), а затем – исходя из эквивалентной схемы на рис. 2.10, содержащей только единый шумящий двухполюсник, (б):

$$(а) \quad P_{ш.2-2'}|_{T_0} = P_{ш.г.2-2'}|_{T_0} + P_{ш.соб.2-2'}|_{T_0} = kT_0 \Pi_{ш} K_P + P_{ш.соб.2-2'}|_{T_0},$$

$$(б) \quad P_{ш.2-2'}|_{T_0} = kT_0 \Pi_{ш}.$$

Приравнявая правые части этих двух выражений для суммарной мощности шумов, получим

$$kT_0 \Pi_{ш} K_P + P_{ш.соб.2-2'}|_{T_0} = kT_0 \Pi_{ш},$$

откуда находим мощность собственного шума при стандартной температуре:

$$P_{ш.соб.2-2'}|_{T_0} = kT_0 (1 - K_P) \Pi_{ш}. \quad (2.33)$$

Далее, подставляя (2.33) в (2.32), определим мощность собственного шума фидера, находящегося при произвольной температуре  $T_\phi$ :

$$P_{ш.соб.2-2'}|_{T_\phi} = \frac{T_\phi}{T_0} \cdot kT_0 (1 - K_P) \Pi_{ш} = kT_\phi \Pi_{ш} (1 - K_P). \quad (2.34)$$

В соответствии с определением (2.20) коэффициент шума фидера равен

$$K_{ш.ф} = 1 + \frac{P_{ш.соб.2-2'}|_{T_\phi}}{P_{ш.г.2-2'}|_{T_0}} = 1 + \frac{kT_\phi \Pi_{ш} (1 - K_P)}{kT_0 \Pi_{ш} K_P} = 1 + \frac{T_\phi}{T_0} \left( \frac{1}{K_P} - 1 \right).$$

Величина  $1/K_P$ , обратная коэффициенту передачи по мощности согласованного фидера, называется **коэффициентом потерь или затуханием** в фидере и обозначается  $L_\phi$ . Таким образом,

$$\boxed{K_{ш.ф} = 1 + \frac{T_\phi}{T_0} (L_\phi - 1)}. \quad (2.35)$$

В соответствии с (2.29) шумовая температура фидера равна

$$T_{ш.ф} = T_0 (K_{ш.ф} - 1) = T_ф (L_ф - 1). \quad (2.36)$$

Особенно простой вид эти выражения принимают в том случае, когда фидер находится при комнатной (стандартной) температуре  $T_0 = 293 \text{ К}$  (т.е.  $20^\circ \text{С}$ ):

$$K_{ш.ф} \Big|_{T_0} = L_ф, \quad (2.37)$$

$$T_{ш.ф} \Big|_{T_0} = T_0 (L_ф - 1). \quad (2.38)$$

Из формулы (2.35) следует, что коэффициент шума фидера увеличивается при увеличении затухания в фидере и его температуры. Поэтому для ослабления влияния шума фидера на чувствительность РПУ уменьшают затухание в фидере, а также, в некоторых случаях, применяют его охлаждение.

В заключение ещё раз подчеркнём, что полученные соотношения справедливы не только для фидера, но и для любого пассивного четырёхполюсника, например, аттенюатора.

Если для четырёхполюсника не выполняется условие согласования по входу и выходу, то в полученных формулах в качестве коэффициента передачи по мощности  $K_p$  следует брать коэффициент передачи номинальной мощности  $K_{p \text{ ном}}$  (2.8) и определять затухание как  $L_ф = 1/K_{p \text{ ном}}$ .

## ***2.5. Коэффициент шума и шумовая температура каскадно-соединённых четырёхполюсников***

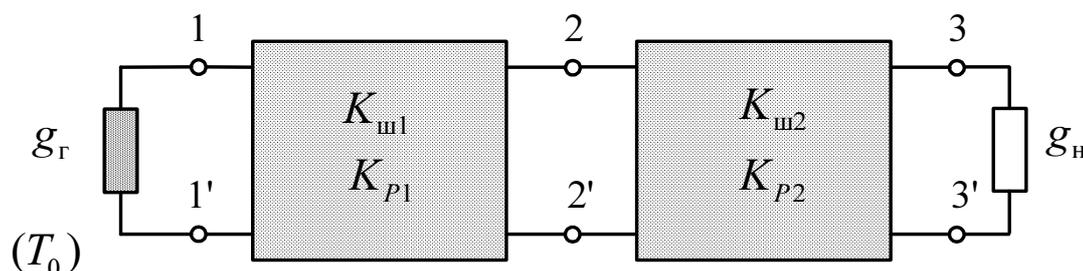
Высокочастотный тракт радиоприёмника представляет собой систему каскадно-соединённых линейных блоков, т.е. четырёхполюсников. Для определения коэффициента шума приёмника в целом достаточно определить (измерить либо рассчитать) коэффициенты шума отдельных его блоков, а затем определённым образом их просуммировать.

Рассмотрим сначала систему из двух каскадно-соединённых четырёхполюсников, согласованных между собой, а также с источником сигнала и с нагрузкой (рис. 2.11). Первый из них имеет коэффициент шума  $K_{ш1}$  и коэффициент передачи мощности  $K_{p1}$ , второй, со-

ответственно,  $K_{ш2}$  и  $K_{P2}$ . По определению (2.20) результирующий коэффициент шума равен

$$K_{ш} = \frac{P_{ш. 3-3'}}{P_{ш.г. 3-3'}}, \quad (2.39)$$

где  $P_{ш. 3-3'}$  – полная мощность шума на нагрузке системы четырёхполюсников (на зажимах 3–3');  $P_{ш.г. 3-3'}$  – мощность теплового шума внутренней проводимости генератора, пересчитанная на выход системы четырёхполюсников.



**Рис. 2.11. К определению коэффициента шума двух каскадно-соединённых четырёхполюсников**

Полная мощность шума на выходе системы четырёхполюсников равна сумме трёх составляющих:

$$P_{ш. 3-3'} = P_{ш.г. 3-3'} + P_{ш.соб1. 3-3'} + P_{ш.соб2. 3-3'}, \quad (2.40)$$

где  $P_{ш.соб1. 3-3'}$ ,  $P_{ш.соб2. 3-3'}$  – соответственно мощность собственного шума 1-го и 2-го четырёхполюсника, пересчитанная на выход. Найдём каждую из этих составляющих мощности.

1) *Мощность теплового шума внутренней проводимости генератора, пересчитанная на выход системы четырёхполюсников:*

$$P_{ш.г. 3-3'} = P_{ш.г} K_{P1} K_{P2} = kT_0 \Pi_{ш} K_{P1} K_{P2}. \quad (2.41)$$

2) *Мощность собственного шума 1-го четырёхполюсника, пересчитанная на выход системы:*

$$P_{ш.соб1. 3-3'} = P'_{ш.соб1} K_{P1} K_{P2} = kT_0 \Pi_{ш} (K_{ш1} - 1) K_{P1} K_{P2}, \quad (2.42)$$

где  $P'_{ш.соб1}$  – мощность собственного шума 1-го четырёхполюсника, приведённая к его входу.

3) *Мощность собственного шума 2-го четырёхполюсника:*

$$P_{\text{ш.соб2. 3-3}'} = P'_{\text{ш.соб2}} K_{P2} = kT_0 \Pi_{\text{ш}} (K_{\text{ш2}} - 1) K_{P2}, \quad (2.43)$$

где  $P'_{\text{ш.соб2}}$  – мощность собственного шума 2-го четырёхполосника, приведённая к его входу.

Подставляя (2.41)-(2.43) в (2.40), а затем – (2.40) и (2.41) в (2.39), получим следующее выражение для коэффициента шума системы четырёхполосников:

$$\begin{aligned} K_{\text{ш}} &= \frac{1}{kT_0 \Pi_{\text{ш}} K_{P1} K_{P2}} \left[ kT_0 \Pi_{\text{ш}} K_{P1} K_{P2} + \right. \\ &+ kT_0 \Pi_{\text{ш}} (K_{\text{ш1}} - 1) K_{P1} K_{P2} + kT_0 \Pi_{\text{ш}} (K_{\text{ш2}} - 1) K_{P2} \left. \right] = \\ &= \frac{K_{P1} + (K_{\text{ш1}} - 1) K_{P1} + (K_{\text{ш2}} - 1)}{K_{P1}} = 1 + (K_{\text{ш1}} - 1) + \frac{K_{\text{ш2}} - 1}{K_{P1}} = K_{\text{ш1}} + \frac{K_{\text{ш2}} - 1}{K_{P1}}. \end{aligned}$$

Итак, результирующий коэффициент шума системы из двух каскадно-соединённых четырёхполосников равен

$$\boxed{K_{\text{ш}} = K_{\text{ш1}} + \frac{K_{\text{ш2}} - 1}{K_{P1}}}. \quad (2.44)$$

Теперь найдём результирующую шумовую температуру системы четырёхполосников. Подставляя (2.44) в (2.29), получим:

$$T_{\text{ш}} = T_0 (K_{\text{ш}} - 1) = T_0 (K_{\text{ш1}} - 1) + \frac{T_0 (K_{\text{ш2}} - 1)}{K_{P1}} = T_{\text{ш1}} + \frac{T_{\text{ш2}}}{K_{P1}}.$$

Таким образом,

$$\boxed{T_{\text{ш}} = T_{\text{ш1}} + \frac{T_{\text{ш2}}}{K_{P1}}}. \quad (2.45)$$

Рассуждая аналогично, можно показать, что при каскадном соединении  $N$  четырёхполосников результирующий коэффициент шума равен

$$K_{\text{ш}} = K_{\text{ш1}} + \frac{K_{\text{ш2}} - 1}{K_{P1}} + \frac{K_{\text{ш3}} - 1}{K_{P1} K_{P2}} + \dots + \frac{K_{\text{шN}} - 1}{K_{P1} \dots K_{P(N-1)}}, \quad (2.46)$$

а результирующая шумовая температура равна

$$T_{\text{ш}} = T_{\text{ш1}} + \frac{T_{\text{ш2}}}{K_{P1}} + \frac{T_{\text{ш3}}}{K_{P1} K_{P2}} + \dots + \frac{T_{\text{шN}}}{K_{P1} \dots K_{P(N-1)}}. \quad (2.47)$$

В общем случае, если условия согласования не выполняются, в этих формулах в качестве коэффициентов передачи по мощности следует брать коэффициенты передачи номинальной мощности.

Заметим, что полученные формулы для  $K_{ш}$  и  $T_{ш}$  справедливы при условии, что полосы пропускания всех четырёхполосников (каскадов радиоприёмника) одинаковы либо полосы пропускания последующих четырёхполосников уже, чем предыдущих.

Из полученных выражений следует, что результирующий коэффициент шума каскадно-соединенных четырёхполосников зависит от последовательности их соединения.

*Для снижения интенсивности результирующих шумов необходимо, чтобы 1-й каскад обладал по возможности малым коэффициентом шума (малой шумовой температурой) и большим коэффициентом передачи номинальной мощности (т.е. большим усилением).*

## 2.6. Расчёт чувствительности РПУ

Зная шумовые характеристики РПУ, можно определить его чувствительность. Напомним определение чувствительности радиолокационного приёмника сантиметрового диапазона волн.

**Чувствительность** – это номинальная мощность сигнала в антенне, при которой на выходе линейной части приёмника обеспечивается заданное отношение сигнал-шум.

Рассмотрим расчёт чувствительности исходя из этого определения. До сих пор, говоря о полной мощности шумов на выходе РПУ, мы имели в виду суммарную мощность теплового шума эквивалента источника сигнала (т.е. антенны), пересчитанную на выход, и мощность собственного шума. Для расчёта чувствительности РПУ необходимо знать полную мощность шумов приёмника и реальной антенны, а не её эквивалента. Интенсивность шумов антенны характеризуется *эквивалентной шумовой температурой антенны*.

*Эквивалентной шумовой температурой антенны* называется такая температура, при которой номинальная мощность теплового шума внутреннего сопротивления антенны равна номинальной мощности шумов антенны.

Эквивалентная шумовая температура антенны учитывает как тепловой шум активной составляющей сопротивления антенны, так и внешние шумы (космические шумы, шумовое излучение Солнца, атмосферные шумы), принимаемые антенной. С помощью этой характеристики можно заменить реальные шумы антенны некоторым условным тепловым шумом. При этом, так же как и для обычного теплового шума, номинальная мощность шумов антенны с шумовой температурой  $T_A$ , измеренная в полосе  $\Pi_{ш}$ , вычисляется по формуле Найквиста:

$$P_{ш.А.НОМ} = kT_A \Pi_{ш}. \quad (2.48)$$

Номинальная мощность собственных шумов приёмника, приведённая к его входу (т.е. к выходу антенны), в соответствии с (2.30,б) равна

$$P'_{ш.СОБ.НОМ} = kT_{ш} \Pi_{ш}.$$

(Напомним, что штрих в обозначении  $P'_{ш.СОБ.НОМ}$  указывает на то, что это не реальная мощность шумов, а приведённая). Поскольку шумы антенны и приёмника статистически независимы, то полная номинальная мощность шумов приёмника и антенны, приведённая ко входу приёмника, равна

$$P'_{ш.ВХ.НОМ} = P_{ш.А.НОМ} + P'_{ш.СОБ.НОМ} = k(T_A + T_{ш})\Pi_{ш}. \quad (2.49)$$

Таким образом, шумовые температуры антенны и приёмника складываются, и поэтому можно определить **полную шумовую температуру радиоприёмного устройства** как

$$T_{ш\text{ РПУ}} = T_A + T_{ш}. \quad (2.50)$$

Тогда полная номинальная мощность шума, приведённая ко входу РПУ, будет определяться выражением

$$P'_{ш.ВХ.НОМ} = kT_{ш\text{ РПУ}} \Pi_{ш}. \quad (2.51)$$

Теперь найдём чувствительность РПУ. Поскольку приведённый ко входу собственный шум заменяет собой реальный шум приёмника, то отношение сигнал-шум на выходе РПУ можно записать как отношение соответствующих номинальных мощностей, приведённых ко входу приёмника:

$$D = \frac{P_{с.НОМ}}{P'_{ш.ВХ.НОМ}}.$$

Тогда номинальная мощность сигнала, соответствующая чувствительности, будет равна

$$P_{с. ном} = kT_{ш РПУ} \Pi_{ш} D = k(T_A + T_{ш}) \Pi_{ш} D. \quad (2.52)$$

В таком виде выражение для чувствительности РПУ наиболее удобно для практического использования. Выражение, связывающее чувствительность с коэффициентом шума, легко получить, подставив в (2.52) формулу (2.29) для шумовой температуры

$$T_{ш} = T_0 (K_{ш} - 1).$$

Рассмотрим более подробно, от чего зависит чувствительность РПУ. Для этого конкретизируем его структуру (рис. 2.12): пусть приёмник соединён с антенной согласованным фидером, имеющим затухание  $L_{\phi}$  и находящимся при температуре  $T_{\phi}$ ; шумовая температура антенны равна  $T_A$ , а приёмника  $T_{ш. пр}$ .

Результирующую шумовую температуру фидера и приёмника определим как шумовую температуру двух каскадно-соединённых четырёхполюсников по формуле (2.45):

$$T_{ш} = T_{ш. \phi} + \frac{T_{ш. пр}}{K_{P. \phi}} = T_{ш. \phi} + T_{ш. пр} L_{\phi}.$$

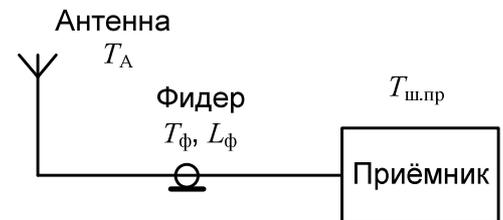


Рис. 2.12. Структура РПУ

В соответствии с (2.36) шумовая температура фидера определяется как

$$T_{ш. \phi} = T_{\phi} (L_{\phi} - 1),$$

поэтому результирующая шумовая температура равна

$$T_{ш} = T_{\phi} (L_{\phi} - 1) + T_{ш. пр} L_{\phi}.$$

Подставляя  $T_{ш}$  в (2.52), получим, что чувствительность РПУ определяется следующим выражением:

$$P_{с. ном} = k(T_A + T_{ш}) \Pi_{ш} D = k \left[ T_A + T_{\phi} (L_{\phi} - 1) + T_{ш. пр} L_{\phi} \right] \Pi_{ш} D. \quad (2.53)$$

Из этой формулы видно, какими путями можно повысить чувствительность РПУ. Для повышения чувствительности необходимо:

- 1) иметь низкие шумовые температуры антенны  $T_A$  и приёмника  $T_{ш. пр}$  и низкую физическую температуру фидера  $T_{\phi}$ ;
- 2) максимально снижать затухание в фидере  $L_{\phi}$ ;
- 3) работать с узкополосными сигналами, что позволит уменьшить полосу пропускания приёмника и, следовательно, его шумовую полосу  $\Pi_{ш}$ ;

- 4) совершенствовать обработку сигнала, что позволило бы получить то же качество работы системы при меньших значениях отношения сигнал-шум на выходе РПУ.

### **Контрольные вопросы**

1. При каком условии мощность, отдаваемая источником сигнала в нагрузку, равна номинальной мощности источника?
2. Какой формулой определяется дисперсия ЭДС теплового шума активной проводимости?
3. Какой формулой определяется номинальная мощность теплового шума активной проводимости?
4. Зависит ли спектральная плотность номинальной мощности теплового шума активной проводимости от: а) температуры; б) величины проводимости?
5. Какая величина называется коэффициентом шума четырёхполюсника?
6. Какая величина называется шумовой температурой четырёхполюсника?
7. Как связаны между собой коэффициент шума и шумовая температура четырёхполюсника?
8. Как определяется шумовая полоса четырёхполюсника?
9. Каково минимально возможное (теоретически) значение коэффициента шума четырёхполюсника?
10. Чем определяется коэффициент шума пассивного четырёхполюсника?
11. От чего зависит результирующий коэффициент шума двух каскадно-соединённых четырёхполюсников?
12. Зависит ли коэффициент шума системы каскадно-соединённых четырёхполюсников от последовательности их соединения?
13. Какие требования следует предъявлять к первому блоку радиоприёмника для уменьшения результирующего коэффициента шума?
14. Какая величина называется эквивалентной шумовой температурой антенны?
15. Чем определяется чувствительность РПУ?