

9. Чувствительность радиоприёмных устройств

Чувствительность – одна из основных характеристик радиоприёмного устройства. Она определяет его способность принимать слабые сигналы. Невозможность приёма очень слабых сигналов обусловлена 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 будем одновременно усиливать и шумы.

Напомним определение чувствительности для двух типов РПУ (см. гл. 1).

- **Чувствительность РПУ амплитудно-модулированных сигналов** – это минимальная э.д.с. в антенне стандартно-модулированного сигнала с АМ, который развивает в приёмнике, настроенном на частоту сигнала, стандартную выходную мощность при заданном отношении сигнал/шум.
- **Чувствительность РПУ РЛС сантиметрового диапазона волн** – это минимальная номинальная^{*)} мощность сигнала в антенне, при которой на выходе линейной части приёмника отношение сигнал/шум равно заданной величине.

В соответствии с этими определениями в дальнейшем будут получены выражения для расчёта чувствительности.

В обоих приведённых определениях чувствительности качество приёма сигнала характеризуется отношением сигнал/шум на выходе приёмника. Это отношение часто используют для характеристики качества приёма и в других РПУ – навигационных, связных и пр. Поэтому для него используют специальное наименование – **коэффициент различимости** (или **коэффициент шумозащищённости**).

Коэффициент различимости – это отношение мощности полезного сигнала P_c к мощности шума $P_{ш}$, измеряемое на выходе блока высокой частоты приёмника (т.е. на выходе линейной части приёмного тракта):

^{*)} Понятие номинальной мощности будет введено в этой главе несколько позднее.

$$D = \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}_{\text{вых. БВЧ}} \right).$$

9.1. Номинальная мощность двухполюсника. Коэффициент передачи номинальной мощности

При расчёте шумовых характеристик как отдельных каскадов приёмника, так и РПУ в целом очень 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. 9.1). В общем случае и внутренняя проводимость эквивалентного источника сигнала (генератора) $Y_{\Gamma} = g_{\Gamma} + jb_{\Gamma}$, и проводимость нагрузки $Y_{\text{н}} = g_{\text{н}} + jb_{\text{н}}$ – комплексные. Из курса «Основы теории цепей» известно, что в случае гармонического колебания мощность, отдаваемая генератором в нагрузку, равна

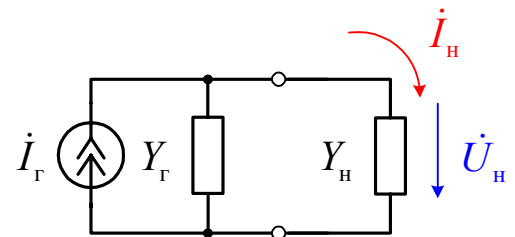


Рис. 9.1. Активный двухполюсник, нагруженный на проводимость $Y_{\text{н}}$

$$P_{\text{н}} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ \dot{U}_{\text{н}} \dot{I}_{\text{н}}^* \}, \quad (9.1)$$

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

$$\dot{U}_{\text{н}} = \frac{\dot{I}_{\Gamma}}{Y_{\Gamma} + Y_{\text{н}}}, \quad \dot{I}_{\text{н}} = \dot{U}_{\text{н}} Y_{\text{н}} = \frac{\dot{I}_{\Gamma} Y_{\text{н}}}{Y_{\Gamma} + Y_{\text{н}}}. \quad (9.2)$$

Подставляя (9.2) в (9.1), получим

$$P_{\text{н}} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{\dot{I}_{\Gamma}}{Y_{\Gamma} + Y_{\text{н}}} \frac{\dot{I}_{\Gamma}^* Y_{\text{н}}^*}{(Y_{\Gamma} + Y_{\text{н}})^*} \right\} = \frac{1}{2} \frac{|\dot{I}_{\Gamma}|^2}{|Y_{\Gamma} + Y_{\text{н}}|^2} \operatorname{Re} \{ Y_{\text{н}}^* \} = \frac{\frac{1}{2} |\dot{I}_{\Gamma}|^2 g_{\text{н}}}{|Y_{\Gamma} + Y_{\text{н}}|^2}.$$

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

$$P_H = \frac{I_{Г.эфф}^2 g_H}{|Y_G + Y_H|^2}. \quad (9.3)$$

Известно, что максимальная мощность передаётся в нагрузку при условии согласования, когда $Y_H = Y_G^*$, и равна

$$P_{H \max} = P_H|_{Y_H=Y_G^*} = \frac{I_{Г.эфф}^2 g_G}{(2g_G)^2} = \frac{I_{Г.эфф}^2}{4g_G}.$$

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.

Номинальная мощность двухполюсника равна

$$P_{Г.ном} = \frac{I_G^2}{4g_G}. \quad (9.4,а)$$

Здесь эффективное значение тока эквивалентного генератора для краткости обозначено как I_G . При использовании эквивалентной схемы двухполюсника с источником ЭДС номинальная мощность равна

$$P_{Г.ном} = \frac{E_G^2}{4R_G}, \quad (9.4,б)$$

где $R_G = 1/g_G$ – внутреннее сопротивление двухполюсника.

Ясно, что чем больше номинальная мощность двухполюсника, тем больше и мощность, отдаваемая в нагрузку при произвольном рассогласовании, – **фактическая мощность**. Выразим эту мощность через номинальную мощность. В соответствии с (9.3)

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

В РПУ источником сигнала является либо антенна, либо предыдущий каскад приёмника; нагрузкой являются каскады приёмника. Считаем, что антенна настроена, а резонансные каскады приёмника настроены на частоту сигнала. В этом случае суммарная реактивная проводимость $b_{\text{г}} + b_{\text{н}} = 0$. Поэтому

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

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

$$q = \frac{4g_{\text{г}}g_{\text{н}}}{(g_{\text{г}} + g_{\text{н}})^2} = \frac{4R_{\text{г}}R_{\text{н}}}{(R_{\text{г}} + R_{\text{н}})^2}. \quad (9.5)$$

Таким образом,

$$\boxed{P_{\text{н}} = P_{\text{г, ном}} q}. \quad (9.6)$$

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. 9.2. Мощность $P_{\text{вх}}$, потребляемая от источника сигнала, рассеивается на активной составляющей входной проводимости четырёхполюсника $g_{\text{вх}}$, а мощность $P_{\text{н}}$ – на активной составляющей проводимости нагрузки $g_{\text{н}}$.

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

$$K_{\text{п}} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (9.7)$$

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

$$K_{P.\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{ВЫХ.НОМ}}}{P_{\text{Г.НОМ}}}. \quad (9.8)$$

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, нужно заменить четырёхполюсник эквивалентным двухполюсником (эквивалентным генератором) (рис. 9.2). При этом величина тока эквивалентного генератора определяется как выходной ток четырёхполюсника в режиме короткого замыкания. Номинальная мощность эквивалентного двухполюсника равна

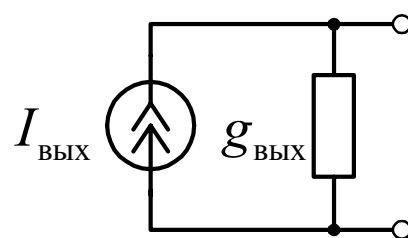


Рис. 9.2. Эквивалентный двухполюсник

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

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:

$$K_P = \frac{P_{\text{Н}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{P_{\text{ВЫХ.НОМ}} q_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{Г.НОМ}} q_{\text{ВХ}}} = K_{P.\text{НОМ}} \frac{q_{\text{ВЫХ}}}{q_{\text{ВХ}}}, \quad (9.9)$$

$$K_{P.\text{НОМ}} = K_P \frac{q_{\text{ВХ}}}{q_{\text{ВЫХ}}}. \quad (9.10)$$

Подчеркнём, 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. Отношение $q_{\text{вых}}/q_{\text{вх}}$ может быть как меньше единицы, так и больше. Поэтому 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:

$$K_{P, \text{ном}} = K_{P, \text{ном} 1} K_{P, \text{ном} 2} \dots K_{P, \text{ном} N}.$$

При этом коэффициент передачи номинальной мощности каждого четырёхполюсника определяется при внутренней проводимости g_{Γ} источника сигнала, равной выходной проводимости всей системы, предшествующей данному четырёхполюснику (см. рис. 9.3).

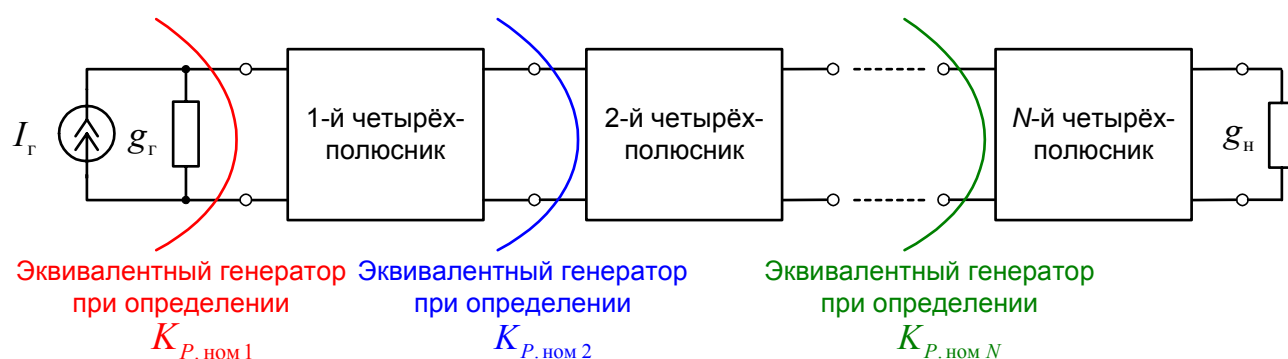


Рис. 9.3. К определению коэффициента передачи номинальной мощности каскадно соединённых четырёхполюсников

9.2. Статистические характеристики собственного шума РПУ

Собственный шум РПУ – это стационарный случайный процесс с нормальным распределением мгновенных значений напряжения (гауссов случайный процесс). Его среднее значение равно нулю, поскольку собственный шум не содержит постоянной составляющей. Плотность вероятности такого случайного процесса не зависит от времени и равна

$$w(u_{\text{ш}}) = \frac{1}{\sigma_{\text{ш}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u_{\text{ш}}^2}{2\sigma_{\text{ш}}^2}}. \quad (9.11)$$

Из раздела «Статистическая радиотехника» курса «Радиотехнические цепи и сигналы» известно, что распределение мощности шума по частоте характеризуется энергетическим спектром (спектральной плотностью) шума. Однако в статистической радиотехнике используют двусторонний (математический) энергетический спектр шума, определенный как для положительных, так и для отрицательных частот. Мы же будем пользоваться, как правило, односторонним (физическим) энергетическим спектром шума $G(f)$, который определён только для положительных (физически существующих) частот. При этом мощность шума равна

$$P_{\text{ш}} = \int_0^{\infty} G(f) df. \quad (9.12)$$

При действии шума со спектральной плотностью $G_{\text{ш.вх}}(f)$ на входе четырёхполюсника с АЧХ $K(f)$ энергетический спектр шума на выходе равен

$$G_{\text{ш.вых}}(f) = K^2(f) G_{\text{ш.вх}}(f). \quad (9.13)$$

Мощность шума на выходе четырёхполюсника, соответственно, равна

$$P_{\text{ш.вых}} = \int_0^{\infty} K^2(f) G_{\text{ш.вх}}(f) df. \quad (9.14)$$

Для радиоприёмных устройств и их каскадов ширина спектра шума, действующего на входе, обычно много больше полосы пропускания четырёхполюсника (каскада РПУ) (рис. 9.4). В этом случае

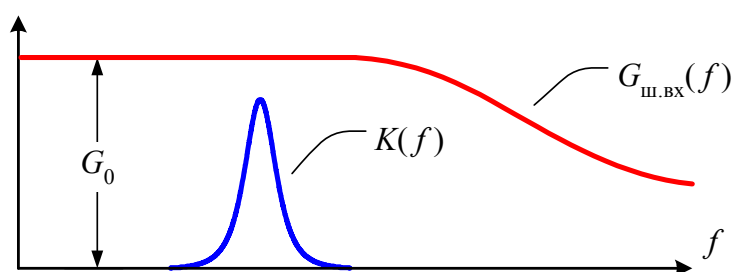


Рис. 9.4. К определению мощности шума на выходе узкополосного каскада

$$G_{\text{ш.вых}}(f) \approx G_0 K^2(f),$$

где G_0 – спектральная плотность входного шума, и мощность шума на выходе равна

$$P_{\text{ш.вых}} \approx G_0 \int_0^{\infty} K^2(f) df. \quad (9.15)$$

В дальнейшем мы будем писать вместо знака приближенного равенства – точное. Это означает, что при вычислении мощности шума на выходе четырёхполосника мы заменяем реальный входной шум белым шумом со спектральной плотностью G_0 .

Шумовая полоса

Представим АЧХ четырёхполосника в виде произведения максимального коэффициента передачи K_0 и нормированной АЧХ $\kappa(f)$:

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

Тогда

$$P_{\text{ш.вых}} = G_0 K_0^2 \int_0^{\infty} \kappa^2(f) df.$$

Назовём величину $\Pi_{\text{ш}} = \int_0^{\infty} \kappa^2(f) df$ **шумовой полосой четырёхполосника**. Таким образом,

$$P_{\text{ш.вых}} = G_0 K_0^2 \Pi_{\text{ш}}. \quad (9.16)$$

Шумовая полоса имеет простой геометрический смысл: она равна основанию прямоугольника единичной высоты, площадь которого равна площади под графиком квадрата нормированной АЧХ (рис. 9.5).

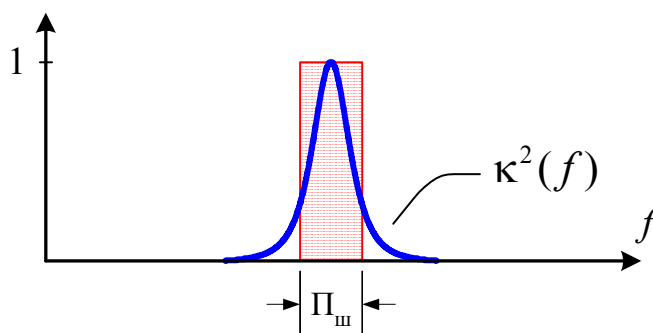


Рис. 9.5. К определению шумовой полосы четырёхполосника

Тепловой шум

Одним из источников собственного шума РПУ являются тепловые шумы пассивных цепей (проводимостей). Причиной возникновения этих шумов является тепловое движение свободных электронов, которое создаёт флуктуации разности потенциалов на концах проводника.

Интенсивность теплового шума пассивной цепи с сопротивлением R характеризуется дисперсией шумовой ЭДС, измеренной в некоторой заданной шумовой полосе $\Pi_{\text{ш}}$. Дисперсия шумовой ЭДС определяется формулой Найквиста, которая справедлива во всем диапазоне радиочастот:

$$\overline{e_{\text{ш}}^2} = E_{\text{ш}}^2 = 4kTR\Pi_{\text{ш}}, \quad (9.17)$$

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.

Шумящая цепь представляется эквивалентной схемой, содержащей шумовую ЭДС и нешумящее сопротивление (рис. 9.6,а) либо шумовой источник тока и нешумящую проводимость (рис. 9.6,б). Поскольку $i_{\text{ш}}(t) = e_{\text{ш}}(t)/R$, то дисперсия шумового тока равна

$$\overline{i_{\text{ш}}^2} = I_{\text{ш}}^2 = \frac{\overline{e_{\text{ш}}^2}}{R^2} = 4kTg\Pi_{\text{ш}}. \quad (9.18)$$

Это – формула Найквиста для дисперсии шумового тока эквивалентного источника. Видно, что она имеет такой же вид, что и для источника шумовой ЭДС, только вместо сопротивления R в неё входит проводимость $g = 1/R$.

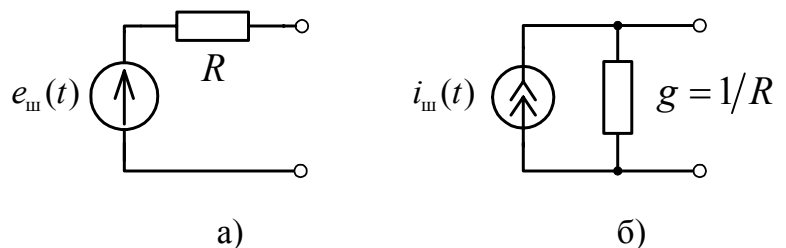


Рис. 9.6. Эквивалентные схемы пассивной шумящей цепи

Экспериментально установлено, что интенсивность теплового шума не зависит от величины тока, протекающего через цепь (если только этот ток не изменяет температуру цепи).

Интенсивность теплового шума удобно характеризовать номинальной мощностью эквивалентного генератора шумового тока. Поскольку внутренняя проводимость эквивалентного источника шумового тока совпадает с «шумящей» проводимостью g , то, подставляя (9.18) в (9.4,а), получим, что номинальная мощность теплового шума пассивной цепи, измеренная в полосе $\Pi_{\text{ш}}$, равна:

$$P_{\text{ш.ном}} = \frac{I_{\text{ш}}^2}{4g} = kT\Pi_{\text{ш}}. \quad (9.19)$$

Видно, что **номинальная мощность теплового шума пассивной цепи не зависит от проводимости цепи.**

Разделив (9.19) на шумовую полосу, определим спектральную плотность номинальной мощности теплового шума:

$$G_{\text{ш.ном}} = kT. \quad (9.20)$$

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 шума, можно определить фактическую мощность, рассеиваемую на любом сопротивлении нагрузки:

$$P_{\text{ш}} = P_{\text{ш.ном}} q = kT\Pi_{\text{ш}} q, \quad (9.21)$$

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

9.3. Коэффициент шума и шумовая температура активного четырёхполюсника (каскада РПУ)

Слово «активный» в названии этого раздела подчеркивает, что в составе каскада РПУ есть не только пассивные элементы (проводимости), но и активные усилительные приборы.

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 расчета отношения сигнал/шум на выходе каскада. Однако использовать эту величину в качестве характеристики интенсивности собственных шумов неудобно, поскольку она зависит не только от шумовых свойств каскада, но и от его коэффициента усиления и шумовой полосы. 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. Для этого рассмотрим четырёхполюсник, на вход которого подаётся сигнал от источника (генератора) с внутренней проводимостью g_r (рис. 9.7). Входные зажимы обозначим 1 и 1', вы-



Рис. 9.7. К определению коэффициента шума четырёхполюсника

ходные – 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 расчете шумовых характеристик следующего каскада.

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

Для того чтобы охарактеризовать шумовые свойства четырёхполюсника, мощность суммарного шума, рассеиваемую на нагрузке, 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 четырёхполюсника. А

поскольку мощность теплового шума зависит от температуры, при которой находится проводимость, то для определённости температуру принято брать стандартной: $T_0 = 293 \text{ K}$ (т.е. 20°C).

Коэффициентом шума линейного четырёхполюсника называется число, показывающее, во сколько раз суммарная мощность шумов четырёхполюсника вместе с эквивалентом источника сигнала больше мощности шумов только эквивалента источника сигналов, пересчитанной на выход. При этом мощность определяется в некоторой заданной шумовой полосе $\Pi_{\text{ш}}$, а температура, для которой определяется мощность тепловых шумов эквивалента источника сигнала, считается стандартной (293 K).

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 $g_{\text{г}}$. В связи с этим его следует определять (измерять или рассчитывать) для того значения $g_{\text{г}}$, с которым будет работать каскад.

Рассмотрим количественные соотношения. Поскольку тепловой шум внутренней проводимости источника сигнала и собственный шум статистически независимы, то суммарная мощность шумов четырёхполюсника вместе с эквивалентом источника сигнала, рассеиваемая на нагрузке, равна $P_{\text{ш.}\Sigma} = P_{\text{ш.г.2-2}'} + P_{\text{ш.соб.2-2}'}$. Здесь $P_{\text{ш.г.2-2}'}$ – мощность шума генератора, приведённая к выходу четырёхполюсника (к зажимам 2 – 2'). По определению коэффициента шума

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{ш.}\Sigma}}{P_{\text{ш.г.2-2}'}} = \frac{P_{\text{ш.г.2-2}'} + P_{\text{ш.соб.2-2}'}}{P_{\text{ш.г.2-2}'}} = 1 + \frac{P_{\text{ш.соб.2-2}'}}{P_{\text{ш.г.2-2}'}}. \quad (9.22)$$

Выражая по ф-ле (9.6) фактические мощности шума через номинальные и записывая номинальную мощность шума генератора на выходе четырёхполюсника $P_{\text{ш.г.ном.2-2}'}$ как $P_{\text{ш.г.ном.1-1}'} K_{P.\text{ном.}}$, получаем, что

$$K_{\text{ш}} = 1 + \frac{P_{\text{ш.соб.ном.2-2}'} q_{\text{вых}}}{P_{\text{ш.г.ном.2-2}'} q_{\text{вых}}} = 1 + \frac{P_{\text{ш.соб.ном.2-2}'}}{P_{\text{ш.г.ном.1-1}'} K_{P.\text{ном.}}}. \quad (9.23)$$

Величина $P_{\text{ш.соб.ном.2-2'}}/K_{P.\text{ном.}}$, которую в дальнейшем будем обозначать $P_{\text{ш.соб.ном.1-1'}}$, называется **номинальной мощностью собственного шума, пересчитанной на вход четырёхполюсника**. Таким образом,

$$K_{\text{ш}} = 1 + \frac{P_{\text{ш.соб.ном.1-1'}}}{P_{\text{ш.г.ном.1-1'}}}, \quad (9.24)$$

а поскольку номинальная мощность теплового шума внутренней проводимости генератора, находящейся при температуре T_0 , в соответствии с (9.19) равна $kT_0\Pi_{\text{ш}}$, то

$$K_{\text{ш}} = 1 + \frac{P_{\text{ш.соб.ном.1-1'}}}{kT_0\Pi_{\text{ш}}}. \quad (9.25)$$

Если пользоваться не номинальной, а фактической мощностью собственных шумов, то

$$K_{\text{ш}} = 1 + \frac{P_{\text{ш.соб.1-1'}}}{kT_0\Pi_{\text{ш}}q_{\text{вх}}}, \quad (9.26)$$

где $q_{\text{вх}} = \frac{4g_{\text{г}}g_{\text{вх}}}{(g_{\text{г}} + g_{\text{вх}})^2}$ – коэффициент рассогласования входной проводимости четырёхполюсника.

Величина коэффициента шума часто выражается в децибелах:

$$K_{\text{ш дБ}} = 10\lg K_{\text{ш}}.$$

Из определения коэффициента шума следует, что он не зависит от проводимости нагрузки, поскольку $P_{\text{ш.соб.ном.2-2'}}$ и $K_{P.\text{ном.}}$ не зависят от $g_{\text{н}}$.

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

1) Ранее коэффициент шума был определен как отношение суммарной мощности шума эталонного источника и собственного шума, пересчитанной на выход четырёхполюсника, к пересчитанной мощности эталонного шума:

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

Суммарная мощность шума $P_{ш.Σ}$ – это мощность на выходе реального, шумящего, четырёхполюсника $P_{ш.вых.реальн.}$. Пересчитанную мощность эталонного шума $P_{ш.г2-2'}$ можно рассматривать как мощность на выходе идеального, нешумящего, четырёхполюсника $P_{ш.вых.ид.}$. Тогда коэффициент шума будет равен

$$K_{ш} = \frac{P_{ш.вых.реальн.}}{P_{ш.вых.ид.}}. \quad (9.27)$$

Пусть теперь на входе четырёхполюсника действует некоторый сигнал. Умножая числитель и знаменатель (9.27) на мощность сигнала на выходе $P_{с.вых.}$, получим:

$$K_{ш} = \frac{P_{ш.вых.реальн.}}{P_{ш.вых.ид.}} \frac{P_{с.вых.}}{P_{с.вых.}} = \frac{(P_{с.} / P_{ш.})_{вых.ид.}}{(P_{с.} / P_{ш.})_{вых.реальн.}}. \quad (9.28)$$

Таким образом, в соответствии с (9.28) можно дать следующее определение коэффициента шума:

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

2) При прохождении через идеальный четырёхполюсник отношение сигнал/шум не меняется и равно отношению сигнал/шум на входе реального четырёхполюсника. Поэтому выражение (9.28) для коэффициента шума можно переписать так:

$$K_{ш} = \frac{(P_{с.} / P_{ш.})_{вх.реальн.}}{(P_{с.} / P_{ш.})_{вых.реальн.}}. \quad (9.29)$$

Этому выражению соответствует ещё одно определение коэффициента шума:

Коэффициент шума показывает, во сколько раз уменьшается отношение сигнал/шум по мощности при прохождении через четырёхполюсник (при условии, что входной шум – это тепло-

вой шум внутренней проводимости источника сигнала, находящейся при стандартной температуре).

Теперь рассмотрим понятие **шумовой температуры четырёхполюсника**. Для этого мысленно проведём следующий эксперимент. Пусть имеется шумящий четырёхполюсник с проводимостью g_r на входе и g_n на выходе (рис. 9.8,а). Проводимость g_r , находящаяся при стандартной (комнатной) температуре T_0 , – это эталонный источник шума. Зафиксируем мощность $P_{ш\Sigma}$ на нагрузке. Она складывается из мощности собственного шума и мощности шумов внутренней проводимости генератора, пересчитанной на выход. Теперь допустим, что мы можем сделать четырёхполюсник нешумящим (рис. 9.8,б). Тогда, естественно, мощность шума на выходе уменьшится: $P'_{ш\Sigma} < P_{ш\Sigma}$. Для того чтобы восстановить прежнее значение мощности шума, будем нагревать внутреннюю проводимость генератора (рис. 9.8,в; здесь более густая штриховка внутренней проводимости генератора показывает, что интенсивность теплового шума стала больше). Приращение ΔT и называется шумовой температурой четырёхполюсника:

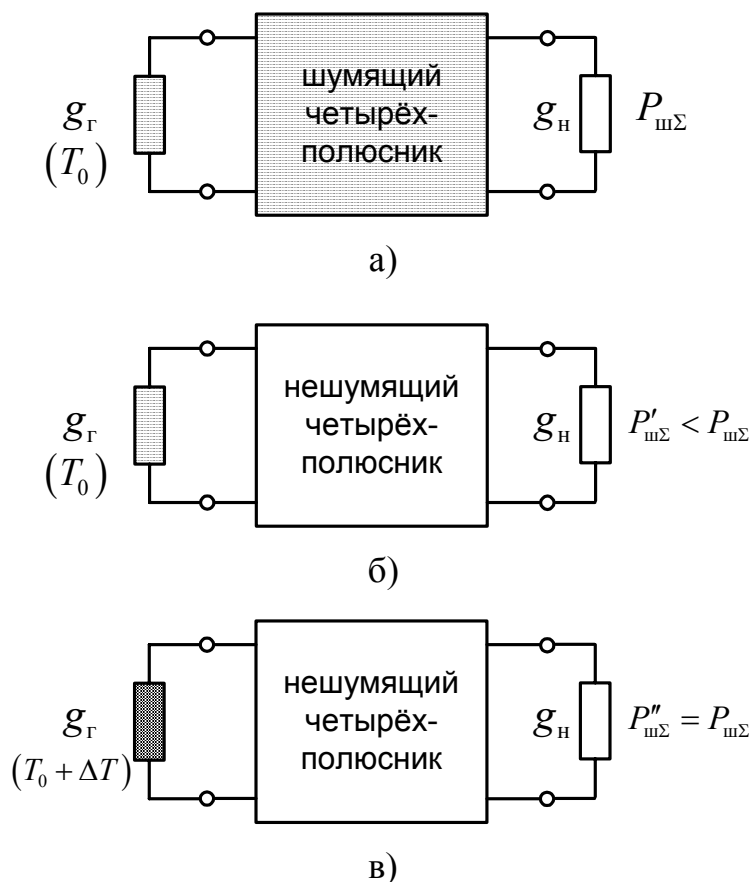


Рис. 9.8. К определению шумовой температуры четырёхполюсника

$$T_{ш} = \Delta T.$$

Шумовой температурой четырёхполюсника называется такая температура, на которую нужно увеличить температуру выходной проводимости эталонного источника шума для того чтобы мощность шума на выходе нешумящего четырёхполюсника была равна суммарной мощности шумов шумящего четырёхполюсника и эталонного источника шума.

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

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

Следовательно, выражение (9.22) для коэффициента шума можно записать в следующем виде:

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

Выражая мощность теплового шума на выходе через номинальную мощность шума на входе и используя ф-лу (9.19) для номинальной мощности теплового шума, получим:

$$K_{ш} = \frac{P_{ш.г.ном.1-1'} \Big|_{T_0 + T_{ш}} K_{P.ном.} q_{вых}}{P_{ш.г.ном.1-1'} \Big|_{T_0} K_{P.ном.} q_{вых}} = \frac{k(T_0 + T_{ш})\Pi_{ш}}{kT_0\Pi_{ш}} = 1 + \frac{T_{ш}}{T_0}.$$

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

$$\boxed{K_{ш} = 1 + \frac{T_{ш}}{T_0}}, \quad (9.30)$$

$$\boxed{T_{ш} = T_0(K_{ш} - 1)}. \quad (9.31)$$

Зная коэффициент шума или шумовую температуру, можно рассчитать номинальную мощность собственного шума четырёхполосника, приведённую к его входу:

$$\boxed{P_{ш.соб.ном.1-1'} = kT_0(K_{ш} - 1)\Pi_{ш} = kT_{ш}\Pi_{ш}}. \quad (9.32)$$

Сравним последнее выражение с ф-лой Найквиста (9.19) для номинальной мощности теплового шума активной проводимости:

$$P_{ш.ном.} = kT\Pi_{ш}.$$

Видно, что в выражении (9.32) для приведённой мощности собственного шума *шумовая температура четырёхполюсника играет такую же роль, что и физическая температура шумящей проводимости в формуле Найквиста.*

Фактическая приведённая мощность собственного шума четырёхполюсника равна

$$P_{\text{ш.соб.л-л}'} = P_{\text{ш.соб.ном.л-л}'} q_{\text{вх}} = kT_0 (K_{\text{ш}} - 1) \Pi_{\text{ш}} q_{\text{вх}} = kT_{\text{ш}} \Pi_{\text{ш}} q_{\text{вх}}. \quad (9.33)$$

И коэффициент шума, и шумовая температура в одинаковой степени характеризуют шумовые свойства четырёхполюсника. 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 – $K_{\text{ш2}}=1,05$. Глядя на такие значения $K_{\text{ш}}$, можно решить, что шумовые свойства этих блоков примерно одинаковы. Однако их шумовые температуры

$$T_{\text{ш1}} = T_0 (K_{\text{ш1}} - 1) \approx 300 (1,1 - 1) = 30 \text{ К и}$$

$$T_{\text{ш2}} = T_0 (K_{\text{ш2}} - 1) \approx 300 (1,05 - 1) = 15 \text{ К}$$

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

9.4. Коэффициент шума и шумовая температура пассивного четырёхполюсника

Мы рассмотрели общие определения коэффициента шума и шумовой температуры произвольного четырёхполюсника. Рассмотрим теперь частный случай четырёхполюсника, когда эти характеристики можно определить в явном виде. Это – пассивный четырёхполюсник. К таким четырёхполюсникам относятся многие элементы РПУ: передающие линии (фидеры и волноводы), аттенуаторы, циркуляторы, направленные ответвители и другие устройства, не содержащие усилительных приборов.

Рассмотрим шумовые свойства пассивного четырёхполюсника на примере фидера. Пусть фидер находится при температуре $T_{\text{ф}}$. Источником внешнего шума на входе фидера, как обычно, является

внутренняя проводимость g_{Γ} источника сигнала, находящаяся при стандартной температуре T_0 (рис. 9.9). На выходе фидера включена нешумящая нагрузка g_H . По входу и выходу четырёхполюсник в общем случае не согласован с источником сигнала и нагрузкой. По определению (9.22) коэффициент шума фидера равен

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

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 фидера. Поэтому, если мы найдем 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_{Φ} как

$$P_{ш.соб.2-2'}|_{T_{\Phi}} = P_{ш.соб.2-2'}|_{T_0} \frac{T_{\Phi}}{T_0}. \quad (9.34)$$

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. 9.10). Внутренняя проводимость этого эквивалентного двухполюсника равна выходной

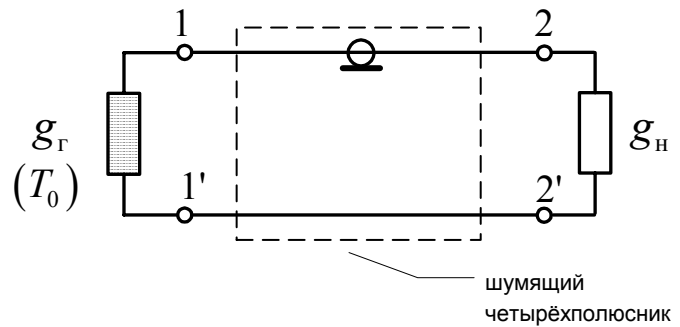


Рис. 9.9. К определению шумовой температуры пассивного четырёхполюсника

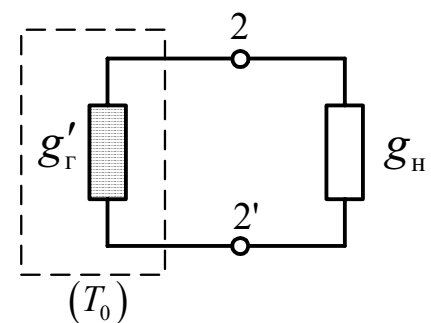


Рис. 9.10. Эквивалентная схема пассивного четырёхполюсника при стандартной температуре

проводимости четырёхполюсника (с учётом проводимости генератора), поэтому коэффициент рассогласования по выходу $q_{\text{вых}}$ будет таким же, как в схеме на рис. 9.9.

Теперь запишем выражение для суммарной мощности шума на нагрузке двумя способами: сначала исходя из схемы на рис. 9.9, содержащей шумящую внутреннюю проводимость генератора и шумящий четырёхполюсник, (а), а затем – исходя из эквивалентной схемы на рис. 9.10, содержащей только единый шумящий двухполюсник, (б):

$$(а) \quad P_{\text{ш.}\Sigma.2-2'}|_{T_0} = P_{\text{ш.г.}2-2'}|_{T_0} + P_{\text{ш.соб.}2-2'}|_{T_0} = kT_0 \Pi_{\text{ш}} K_{P.\text{ном.}} q_{\text{вых}} + P_{\text{ш.соб.}2-2'}|_{T_0},$$

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

(В последнем выражении учтено, что хотя внутренняя проводимость эквивалентного двухполюсника g'_r отличается от внутренней проводимости генератора g_r , на величину номинальной мощности теплового шума это не влияет, и она равна $kT_0 \Pi_{\text{ш}}$).

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

$$kT_0 \Pi_{\text{ш}} K_{P.\text{ном.}} q_{\text{вых}} + P_{\text{ш.соб.}2-2'}|_{T_0} = kT_0 \Pi_{\text{ш}} q_{\text{вых}},$$

откуда находим мощность собственного шума при стандартной температуре:

$$P_{\text{ш.соб.}2-2'}|_{T_0} = kT_0 (1 - K_{P.\text{ном.}}) \Pi_{\text{ш}} q_{\text{вых}}. \quad (9.35)$$

Подставляя (9.35) в (9.34), определим мощность собственного шума фидера, находящегося при температуре T_{ϕ} :

$$P_{\text{ш.соб.}2-2'}|_{T_{\phi}} = \frac{T_{\phi}}{T_0} \cdot kT_0 (1 - K_{P.\text{ном.}}) \Pi_{\text{ш}} q_{\text{вых}} = kT_{\phi} \Pi_{\text{ш}} (1 - K_{P.\text{ном.}}) q_{\text{вых}}. \quad (9.36)$$

В соответствии с определением (9.22) коэффициент шума фидера равен

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

Величина $1/K_{P_{\text{ном}}}$ называется **коэффициентом потерь (затуханием)** в фидере и обозначается $L_{\text{ф}}$. Таким образом,

$$K_{\text{ш.ф}} = 1 + (L_{\text{ф}} - 1) \frac{T_{\text{ф}}}{T_0}. \quad (9.37)$$

В соответствии с (9.31) шумовая температура фидера равна

$$T_{\text{ш.ф}} = T_0 (K_{\text{ш.ф}} - 1) = T_{\text{ф}} (L_{\text{ф}} - 1). \quad (9.38)$$

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

$$K_{\text{ш.ф}} \Big|_{T_0} = L_{\text{ф}}, \quad (9.39)$$

$$T_{\text{ш.ф}} \Big|_{T_0} = T_0 (L_{\text{ф}} - 1). \quad (9.40)$$

Выводы

- 1) Коэффициент шума и шумовая температура фидера увеличиваются при увеличении физической температуры фидера.
- 2) $K_{\text{ш.ф}}$ и $T_{\text{ш.ф}}$ увеличиваются при увеличении потерь в фидере. Для фидера без потерь $L_{\text{ф}} = 1$ и $K_{\text{ш.ф}} = 1$, $T_{\text{ш.ф}} = 0$, т.е. он «не шумит». На практике для уменьшения интенсивности шумов фидера используется его охлаждение.
- 3) Эти закономерности справедливы не только для фидера, но и для любых пассивных четырёхполюсников.

9.5. Коэффициент шума и шумовая температура каскадно соединённых четырёхполюсников

Линейный 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 блоков, а затем определенным образом их просуммировать.

Рассмотрим сначала систему из двух каскадно соединённых четырёхполюсников (рис. 9.11). Первый из этих четырёхполюсников имеет коэффициент шума $K_{ш1}$ и коэффициент передачи проходной мощности K_{P1} , второй, соответственно, – $K_{ш2}$ и K_{P2} . По определению (9.22) результирующий коэффициент шума равен

$$K_{ш} = \frac{P_{ш.Σ}}{P_{ш.г.3-3'}}, \quad (9.41)$$

где $P_{ш.Σ}$ – 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.

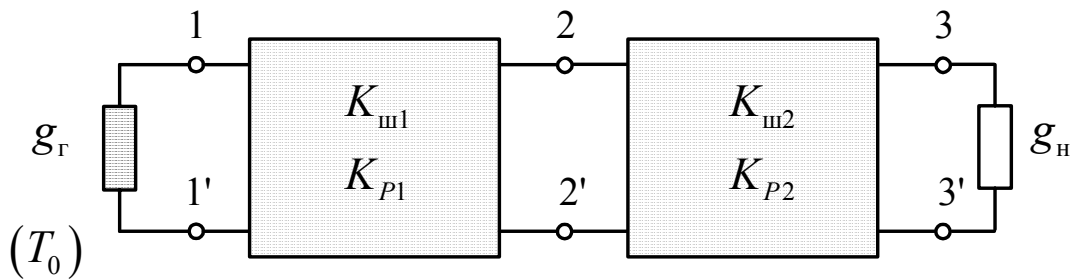


Рис. 9.11. К определению коэффициента шума двух каскадно соединённых четырёхполюсников

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

$$P_{ш.Σ} = P_{ш.г.3-3'} + P_{ш.собр.1.3-3'} + P_{ш.собр.2.3-3'}. \quad (9.42)$$

Найдём каждую из этих составляющих мощности.

1) *Тепловой шум внутренней проводимости генератора, пересчитанный на выход системы четырёхполюсников:*

$$\begin{aligned} P_{ш.г.3-3'} &= P_{ш.г.1-1'} K_{P1} K_{P2} = kT_0 \Pi_{ш} q_1 \cdot K_{P1ном} \frac{q_2}{q_1} \cdot K_{P2ном} \frac{q_3}{q_2} = \\ &= kT_0 \Pi_{ш} K_{P1ном} K_{P2ном} q_3, \end{aligned} \quad (9.43)$$

где $K_{P1ном}$, $K_{P2ном}$ – коэффициент передачи номинальной мощности 1-го и 2-го четырёхполюсника соответственно; q_1 – коэффициент рас-
согласования между внутренней проводимостью генератора и вход-

ной проводимостью 1-го четырёхполюсника; q_2 – коэффициент рассогласования между выходной проводимостью 1-го четырёхполюсника и входной проводимостью 2-го четырёхполюсника; q_3 – коэффициент рассогласования между выходной проводимостью 2-го четырёхполюсника и проводимостью нагрузки.

2) *Собственный шум 1-го четырёхполюсника, пересчитанный на выход системы:*

$$\begin{aligned} P_{\text{ш.соб.1.3-3}'} &= P_{\text{ш.соб.1.1-1}'} K_{P1} K_{P2} = kT_0 \Pi_{\text{ш}} (K_{\text{ш1}} - 1) q_1 \cdot K_{P1\text{ном}} \frac{q_2}{q_1} \cdot K_{P2\text{ном}} \frac{q_3}{q_2} = \\ &= kT_0 \Pi_{\text{ш}} (K_{\text{ш1}} - 1) K_{P1\text{ном}} K_{P2\text{ном}} q_3, \end{aligned} \quad (9.44)$$

где $P_{\text{ш.соб.1.1-1}'}$ – номинальная мощность собственного шума 1-го четырёхполюсника, приведённая к его входу.

3) *Собственный шум 2-го четырёхполюсника:*

$$\begin{aligned} P_{\text{ш.соб.2.3-3}'} &= P_{\text{ш.соб.2.2-2}'} K_{P2} = kT_0 \Pi_{\text{ш}} (K_{\text{ш2}} - 1) q_2 \cdot K_{P2\text{ном}} \frac{q_3}{q_2} = \\ &= kT_0 \Pi_{\text{ш}} (K_{\text{ш2}} - 1) K_{P2\text{ном}} q_3, \end{aligned} \quad (9.45)$$

где $P_{\text{ш.соб.2.2-2}'}$ – номинальная мощность собственного шума 2-го четырёхполюсника, приведённая к его входу.

Подставляя (9.43)-(9.45) в (9.42), а затем – (9.42) и (9.43) в (9.41), получим следующее выражение для коэффициента шума системы четырёхполюсников:

$$\begin{aligned} K_{\text{ш}} &= \frac{1}{kT_0 \Pi_{\text{ш}} K_{P1\text{ном}} K_{P2\text{ном}} q_3} \left[kT_0 \Pi_{\text{ш}} K_{P1\text{ном}} K_{P2\text{ном}} q_3 + \right. \\ &\quad \left. + kT_0 \Pi_{\text{ш}} (K_{\text{ш1}} - 1) K_{P1\text{ном}} K_{P2\text{ном}} q_3 + kT_0 \Pi_{\text{ш}} (K_{\text{ш2}} - 1) K_{P2\text{ном}} q_3 \right] = \\ &= \frac{K_{P1\text{ном}} + (K_{\text{ш1}} - 1) K_{P1\text{ном}} + (K_{\text{ш2}} - 1)}{K_{P1\text{ном}}} = 1 + (K_{\text{ш1}} - 1) + \frac{K_{\text{ш2}} - 1}{K_{P1\text{ном}}} = \\ &= K_{\text{ш1}} + \frac{K_{\text{ш2}} - 1}{K_{P1\text{ном}}}. \end{aligned}$$

Итак,

$$K_{\text{ш}} = K_{\text{ш1}} + \frac{K_{\text{ш2}} - 1}{K_{P1.\text{ном}}} \quad (9.46)$$

Теперь найдём шумовую температуру системы из двух каскадно соединённых четырёхполюсников. Подставляя (9.46) в (9.31), получим:

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

Таким образом,

$$T_{\text{ш}} = T_{\text{ш1}} + \frac{T_{\text{ш2}}}{K_{P1.\text{ном}}} \quad (9.47)$$

Аналогичным образом можно показать, что при каскадном соединении нескольких четырёхполюсников результирующий коэффициент шума равен

$$K_{\text{ш}} = K_{\text{ш1}} + \frac{K_{\text{ш2}} - 1}{K_{P1.\text{ном}}} + \frac{K_{\text{ш3}} - 1}{K_{P1.\text{ном}} K_{P2.\text{ном}}} + \dots + \frac{K_{\text{шN}} - 1}{K_{P1.\text{ном}} \dots K_{P(N-1).\text{ном}}}, \quad (9.48)$$

а результирующая шумовая температура равна

$$T_{\text{ш}} = T_{\text{ш1}} + \frac{T_{\text{ш2}}}{K_{P1.\text{ном}}} + \frac{T_{\text{ш3}}}{K_{P1.\text{ном}} K_{P2.\text{ном}}} + \dots + \frac{T_{\text{шN}}}{K_{P1.\text{ном}} \dots K_{P(N-1).\text{ном}}}. \quad (9.49)$$

Из полученных выражений следует, что результирующий коэффициент шума каскадно соединённых четырёхполюсников 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).*

Замечание. Полученные формулы для $K_{\text{ш}}$ и $T_{\text{ш}}$ справедливы при условии, что полосы пропускания всех каскадов радиоприёмника одинаковы либо полосы пропускания последующих каскадов уже, чем предыдущих.

9.6. Расчёт чувствительности РПУ

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

Чувствительность – это минимальная номинальная мощность сигнала в антенне, при которой на выходе линейной части РПУ развивается 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. 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:

$$P_{ш.А.ном} = kT_A \Pi_{ш}. \quad (9.50)$$

Номинальная мощность собственных шумов приёмника, приведенная к его входу (т.е. к выходу антенны), в соответствии с (9.32) равна

$$P'_{ш.соб.ном} = kT_{ш} \Pi_{ш}.$$

(Здесь 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

$$P'_{\text{ш.}\Sigma.\text{ном}} = P_{\text{ш.А.ном}} + P'_{\text{ш.соб.ном}} = k(T_A + T_{\text{ш}})\Pi_{\text{ш}}. \quad (9.51)$$

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

$$T_{\text{ш РПУ}} = T_A + T_{\text{ш}}. \quad (9.52)$$

Тогда

$$P'_{\text{ш.}\Sigma.\text{ном}} = kT_{\text{ш РПУ}}\Pi_{\text{ш}}. \quad (9.53)$$

Теперь найдём чувствительность РПУ. Если заданная величина отношения сигнал/шум по мощности на выходе РПУ (коэффициент различимости) равна D , то номинальная мощность сигнала, соответствующая чувствительности, равна

$$P_{\text{с.ном}} = P'_{\text{ш.}\Sigma.\text{ном}} D = kT_{\text{ш РПУ}}\Pi_{\text{ш}} D = k(T_A + T_{\text{ш}})\Pi_{\text{ш}} D. \quad (9.54)$$

В таком виде выражение для чувствительности РПУ наиболее удобно для запоминания. Выражение через коэффициент шума легко получить, подставив $T_{\text{ш}} = T_0(K_{\text{ш}} - 1)$.

Определение чувствительности РПУ через номинальную мощность принимаемого сигнала используется в диапазоне сантиметровых волн. В диапазоне метровых и более длинных волн чувствительность РПУ выражается через ЭДС сигнала в антенне. Получим выражение для чувствительности РПУ в этом диапазоне. Поскольку номинальная мощность сигнала в соответствии с (9.4,б) равна $P_{\text{с.ном}} = E_c^2 / 4R_{\text{г}}$ и внутреннее сопротивление источника сигнала равно R_A , то ЭДС сигнала в антенне определяется выражением

$$E_c = \sqrt{4R_A P_{\text{с.ном}}} = 2\sqrt{k(T_A + T_{\text{ш}})\Pi_{\text{ш}} D R_A}. \quad (9.55)$$

Рассмотрим более подробно, от чего зависит чувствительность РПУ. Для этого конкретизируем его структуру (рис. 9.12): пусть приёмник соединён с антенной фидером, имеющим физическую темпе-

ратуру T_ϕ и коэффициент потерь L_ϕ ; шумовая температура антенны равна T_A , а приёмника – $T_{ш.пр}$.

Результирующую шумовую температуру фидера и приёмника определим как шумовую температуру двух каскадно соединённых четырёхполосников по ф-ле (9.49):

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

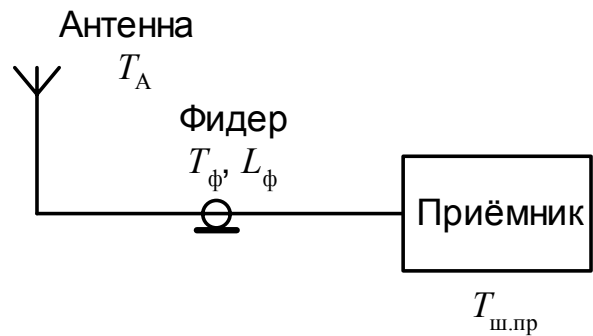


Рис. 9.12. Структура РПУ

В соответствии с (9.38) шумовая температура фидера определяется как

$$T_{ш.ф} = T_\phi (L_\phi - 1).$$

Поэтому результирующая шумовая температура равна

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

Подставляя $T_{ш}$ в (9.54), получим, что чувствительность РПУ определяется следующим выражением:

$$P_{с.ном} = k(T_A + T_{ш})\Pi_{ш}D = k\left[T_A + T_\phi (L_\phi - 1) + T_{ш.пр} L_\phi\right]\Pi_{ш}D. \quad (9.56)$$

Из (9.56) видно, как можно повысить чувствительность РПУ. Для этого необходимо:

- 1) иметь низкие шумовые температуры антенны T_A и приёмника $T_{ш}$ и низкую физическую температуру фидера T_ϕ ;
- 2) максимально снижать потери фидера L_ϕ ;
- 3) работать с узкополосными сигналами, что позволит сузить полосу пропускания приемника и, следовательно, его шумовую полосу $\Pi_{ш}$;
- 4) совершенствовать систему вторичной обработки сигнала, которая позволила бы получить то же качество работы системы при меньших значениях коэффициента различимости D (отношения сигнал/шум на выходе РПУ).

9.7. Измерение коэффициента шума

До сих пор мы говорили о способах расчёта коэффициента шума. Теперь рассмотрим задачу его экспериментального определения. Для измерения коэффициента шума обычно используются специальные прокалиброванные генераторы шума. Существуют также методы измерения с использованием генератора стандартных сигналов.

Рассмотрим методику измерения коэффициента шума четырёхполюсника с помощью генератора шума. Для правильного измерения генератор должен удовлетворять следующим требованиям:

- спектральная плотность шума должна быть постоянна в полосе пропускания четырёхполюсника (т.е. блока РПУ или всего РПУ);
- внутреннее сопротивление генератора должно быть равно внутреннему сопротивлению источника сигнала;
- спектральная плотность шума должна быть прямо пропорциональна величине постоянного тока, протекающего через элемент, генерирующий шум.

Схема измерения показана на рис. 9.13. Здесь помимо сопротивления нагрузки четырёхполюсника R_H условно показаны внутреннее сопротивление генератора R_T и входное сопротивление четырёхполюсника R_{BX} .

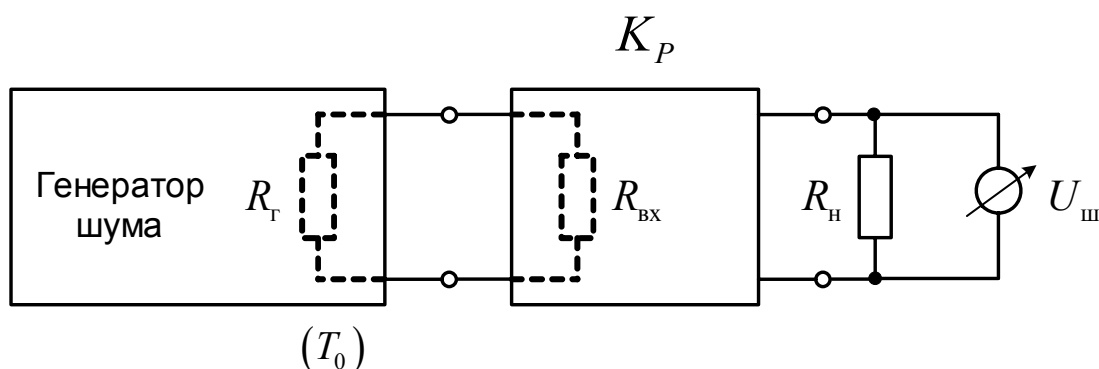


Рис. 9.13. Схема измерения коэффициента шума

Для определения коэффициента шума проводится два измерения мощности шума (или эффективного напряжения шума $U_{ш} = \sqrt{P_{ш} R_H}$) на выходе четырёхполюсника.

При **первом измерении** генератор подсоединён к четырёхполюснику, но не включён. В этом случае на входе четырёхполюсника действует только тепловой шум внутреннего сопротивления генератора R_T . При этом суммарная мощность выходного шума равна

$$P_{\Sigma}^{(1)} = P_{\Sigma, \Gamma} K_P + P_{\Sigma, \text{ш.ш.об}},$$

где K_P – коэффициент передачи проходной мощности четырёхполюсника. По определению (9.22) коэффициент шума равен

$$K_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma, \text{ш.ш.в.х.}}}{P_{\Sigma, \Gamma, \text{в.х.}}} = \frac{P_{\Sigma}^{(1)}}{P_{\Sigma, \Gamma} K_P}. \quad (9.57)$$

В этом выражении неизвестен коэффициент передачи проходной мощности. Для того чтобы можно было его исключить, производится второе измерение.

При **втором измерении** генератор включается и к тепловому шуму внутреннего сопротивления генератора добавляется измерительный шум. В этом случае суммарная мощность выходного шума равна

$$P_{\Sigma}^{(2)} = P_{\Sigma}^{(1)} + P_{\Sigma, \text{ш.изм}} K_P.$$

Величина мощности измерительного шума $P_{\Sigma, \text{ш.изм}}$ задаётся так, чтобы мощность выходного шума возросла вдвое:

$$P_{\Sigma}^{(2)} = 2P_{\Sigma}^{(1)}.$$

Тогда

$$P_{\Sigma, \text{ш.изм}} K_P = P_{\Sigma}^{(2)} - P_{\Sigma}^{(1)} = P_{\Sigma}^{(1)}$$

и, следовательно, $K_P = \frac{P_{\Sigma}^{(1)}}{P_{\Sigma, \text{ш.изм}}}$. Подставляя K_P в (9.57), получим:

$$K_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}^{(1)}}{P_{\Sigma, \Gamma} \frac{P_{\Sigma}^{(1)}}{P_{\Sigma, \text{ш.изм}}}} = \frac{P_{\Sigma, \text{ш.изм}}}{P_{\Sigma, \Gamma}}. \quad (9.58)$$

Поскольку источники теплового шума и измерительного шума имеют один и тот же коэффициент рассогласования с четырёхполюсником, то отношение фактических мощностей шума в (9.57) равно отношению номинальных мощностей:

$$K_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma, \text{ш.изм. ном}}}{P_{\Sigma, \Gamma, \text{ном}}}.$$

Но $P_{\text{ш. г. ном}} = kT_0 \Pi_{\text{ш}}$, где $\Pi_{\text{ш}}$ – шумовая полоса четырёхполосника, а номинальная мощность измерительного шума равна

$$P_{\text{ш. изм. ном}} = G_{\text{ш. изм. ном}} \Pi_{\text{ш}},$$

где $G_{\text{ш. изм. ном}}$ – спектральная плотность номинальной мощности измерительного шума. Следовательно, измеренное значение коэффициента шума определяется выражением

$$K_{\text{ш}} = \frac{G_{\text{ш. изм. ном}}}{kT_0}. \quad (9.59)$$

Таким образом, задача измерения коэффициента шума сводится к определению такой спектральной плотности номинальной мощности измерительного шума, при которой суммарная мощность шума на выходе четырёхполосника удваивается. Для калиброванных измерительных генераторов шума она отсчитывается по регулятору выходного уровня шума. В ряде случаев спектральная плотность номинальной мощности измерительного шума может быть рассчитана по величине тока, протекающего через «шумящий» элемент генератора.

Рассмотрим определение $G_{\text{ш. изм. ном}}$ в случае использования генератора на ламповом шумовом диоде (рис. 9.14). В таком генераторе шум возникает за счёт *дробового эффекта*^{*)}, т.е. случайных флуктуаций потока электронов, эмитируемых катодом. Диод должен работать в режиме насыщения, т.е. при таком достаточно большом напряжении на аноде, когда все электроны, вылетающие с катода, достигают анода. При этом величина анодного тока не зависит от напряжения на аноде и определяется только температурой катода, которая, в свою очередь, задаётся током накала $I_{\text{н}}$ (рис. 9.15). В режиме насыщения случайная составляющая анодного тока имеет постоянную спектральную плот-

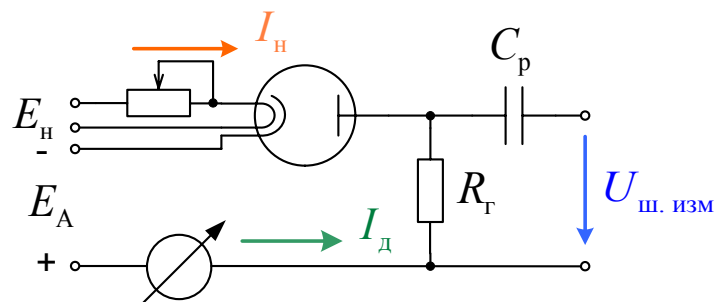


Рис. 9.14. Упрощённая схема генератора шума

ность. Диод должен работать в режиме насыщения, т.е. при таком достаточно большом напряжении на аноде, когда все электроны, вылетающие с катода, достигают анода. При этом величина анодного тока не зависит от напряжения на аноде и определяется только температурой катода, которая, в свою очередь, задаётся током накала $I_{\text{н}}$ (рис. 9.15). В режиме насыщения случайная составляющая анодного тока имеет постоянную спектральную плот-

^{*)} Название эффекта связано с тем, что импульсы тока, возникающие при попадании электронов на анод, подобны ударам случайного потока дробин о мишень.

ность мощности в широком интервале частот (до 3 - 5 ГГц) и поэтому её можно считать белым шумом.

Дисперсия случайной составляющей анодного тока, измеренная в полосе $\Pi_{\text{ш}}$, определяется формулой Шотки:

$$\overline{i_{\text{ш}}^2} = 2eI_{\text{д}}\Pi_{\text{ш}}, \quad (9.60)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона. Следовательно, в соответствии с (9.4,а), номинальная мощность измерительного шума определяется выражением

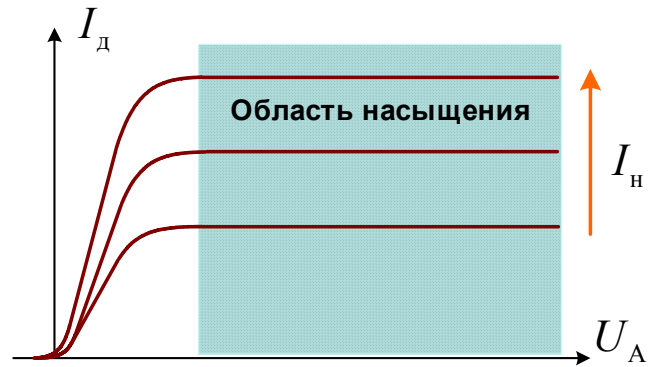


Рис. 9.15. Вольт-амперная характеристика шумового диода

$$P_{\text{ш. изм. ном}} = \frac{\overline{i_{\text{ш}}^2}}{4g_{\Gamma}} = \frac{2eI_{\text{д}}\Pi_{\text{ш}}}{4g_{\Gamma}} = \frac{1}{2}eI_{\text{д}}\Pi_{\text{ш}}R_{\Gamma},$$

а спектральная плотность номинальной мощности равна

$$G_{\text{ш. изм. ном}} = \frac{1}{2}eI_{\text{д}}R_{\Gamma}.$$

Подставляя $G_{\text{ш. изм. ном}}$ в (9.59), получим следующее выражение для определения коэффициента шума в случае использования генератора на шумовом диоде:

$$K_{\text{ш}} = \frac{eI_{\text{д}}R_{\Gamma}}{2kT_0}. \quad (9.61)$$

Подставляя в (9.61) численные значения физических констант $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $T_0 = 293$ К, получим инженерную расчетную формулу^{*)}:

$$K_{\text{ш}} \approx 20I_{\text{д}}R_{\Gamma}. \quad (9.62)$$

Напомним, что здесь $I_{\text{д}}$ – такое значение постоянной составляющей анодного тока шумового диода, при котором мощность шума на выходе четырехполюсника вдвое больше, чем при выключенном шумовом генераторе.

^{*)} Более точное значение коэффициента в ф-ле (9.62) равно 19,80. Это размерная величина:

$$\left[\frac{e}{2kT_0} \right] = \frac{\text{Кл}}{\text{Дж/К} \times \text{К}} = \frac{\text{Кл}}{\text{Дж}} = \frac{\text{Кл}}{\text{В} \times \text{Кл}} = \text{В}^{-1}.$$

Замечание: при измерении уровня шума на выходе четырёхполюсника в диапазоне умеренно высоких частот обычно используется вольтметр эффективного напряжения. В этом случае удвоению мощности шума соответствует увеличение эффективного напряжения в $\sqrt{2} \approx 1,41$ раза.

9.5. Контрольные вопросы и задачи

Примеры ответа на типовые контрольные вопросы

Вопрос 9.1. ?

Ответ.

Контрольные вопросы

1. ?

Примеры решения типовых задач

Задача 9.1. Определить коэффициент передачи номинальной мощности резонансного усилительного каскада на биполярном транзисторе, включённом по схеме с общим эмиттером. Внутренняя проводимость источника сигнала $g_{\Gamma} = 20$ мСм, резонансная проводимость колебательного контура $g_k = 0,3$ мСм. Y -параметры транзистора вещественны и имеют следующие значения: $Y_{11} = g_{11} = 5$ мСм, $Y_{21} = g_{21} = 30$ мСм, $Y_{22} = g_{22} = 0,5$ мСм.

Решение. Эквивалентная схема усилительного каскада с полным включением транзистора и нагрузки в колебательный контур показана на рис. 9.16. По определению (9.8) коэффициент передачи номинальной мощности равен $K_{P, \text{ном}} = P_{\text{вых. ном}} / P_{\Gamma, \text{ном}}$. Номинальная мощность источника сигнала (генератора) равна $P_{\Gamma, \text{ном}} = I_{\Gamma}^2 / 4g_{\Gamma}$. Для определения выходной номинальной мощности усилителя $P_{\text{вых. ном}}$ нужно заменить усилительный каскад со стороны выходных зажимов эк-

вивалентным двухполюсником, показанным на рис. 9.2. Ток эквивалентного генератора равен $I_{\text{вых}} = g_{21} U_{\text{вх}}$, где $U_{\text{вх}}$ – напряжение на входе каскада, равное

$$U_{\text{вх}} = I_{\text{г}} / (g_{\text{г}} + g_{11}).$$

Следовательно,

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{г}} g_{21} / (g_{\text{г}} + g_{11}).$$

Внутренняя проводимость эквивалентного двухполюсника равна $g_{\text{вых}} = g_{22} + g_{\text{к}}$. Таким

образом, $P_{\text{вых.ном}} = \frac{I_{\text{вых}}^2}{4g_{\text{вых}}} = I_{\text{г}}^2 \frac{g_{21}^2}{(g_{\text{г}} + g_{11})^2 \cdot 4(g_{22} + g_{\text{к}})}$. Коэффициент передачи номинальной мощности равен

$$\begin{aligned} K_{P.\text{ном}} &= P_{\text{вых.ном}} / P_{\text{г.ном}} = \frac{I_{\text{г}}^2 g_{21}^2}{(g_{\text{г}} + g_{11})^2 \cdot 4(g_{22} + g_{\text{к}})} \bigg/ \frac{I_{\text{г}}^2}{4g_{\text{г}}} = \\ &= \frac{g_{21}^2 g_{\text{г}}}{(g_{\text{г}} + g_{11})^2 (g_{22} + g_{\text{к}})} = \frac{30^2 \cdot 20}{(20 + 5)^2 (0,5 + 0,3)} = 36. \end{aligned}$$

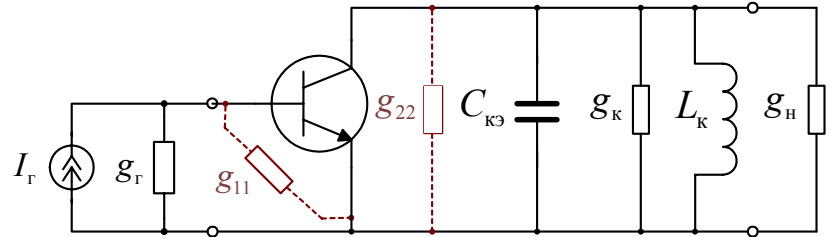


Рис. 9.16. Эквивалентная схема усилительного каскада

Контрольные задачи

Задача 9.4.