

3101

1967

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 3101



Б.В. Фефилов

ГРАФИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УРОВНЯ ШУМА
СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ
НА ЛАМПАХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

1967.

13 - 3101

Б.В. Фефилов

**ГРАФИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УРОВНЯ ШУМА
СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ
НА ЛАМПАХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ**

Для сравнения различных схем усилителей по величине собственного приведенного ко входу шума наиболее удобной единицей шума является среднеквадратичное число шумовых зарядов ($\bar{N}_{\text{ш}}$), не зависящее от типа используемого детектора ядерных излучений. Однако в ядерной электронике целью определения шума является, в конечном результате, определение ошибки измерения энергии регистрируемой частицы. Поэтому для системы детектор-усилитель величину шума удобнее всего определять в единицах энергии /1/ как полную ширину на половине высоты кривой спектрального распределения фиксированного заряда на входе усилителя (Δ), называемую также "шириной линии шума".

Взаимосвязь единиц измерения шума можно представить следующими выражениями:

$$\text{число шумовых зарядов } \bar{N}_{\text{ш}} = \bar{Q}_{\text{ш}} / q = \frac{\bar{U}_{\text{ш}} C}{q} \quad (1)$$

в среднеквадратичных электронах или электронно-дырочных (ионных) парах,

$$\text{ширина линии шума } \Delta = \sigma \xi \bar{N}_{\text{ш}} \quad (2)$$

в электронвольтах.

Здесь $\bar{Q}_{\text{ш}}$ - величина шумового заряда в среднеквадратичных кулонах, $\bar{U}_{\text{ш}}$ - величина шума в среднеквадратичных вольтах, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ кул - заряд электрона, C - общая входная емкость в фарадах, $\sigma = 2,36$ для Гауссового распределения, ξ - среднее значение энергии, расходуемой на образование пары. Для кремниевых полупроводниковых детекторов

$$\Delta^{\text{Si}} = 2,36 \cdot 3,6 \bar{N}_{\text{ш}} = 8,5 \bar{N}_{\text{ш}} \quad (3)$$

для германиевых полупроводниковых детекторов

$$\Delta G^{\circ} = 2,36 \cdot 2,95 \bar{N}_{\text{ш}} = 7 \bar{N}_{\text{ш}} \quad (4)$$

Основные источники шума усилителей на лампах, биполярных транзисторах и полевых транзисторах достаточно хорошо описаны в литературе /2-9/. Для спектрометрических измерений на полупроводниковых детекторах ядерных излучений во входных каскадах предусилителей с предельно низким уровнем шума могут быть успешно применены в настоящее время только лампы и полевые транзисторы. Обычные биполярные транзисторы пока имеют уровень собственного шума на порядок выше. Целью настоящей работы является попытка свести довольно сложный и громоздкий расчет приведенного ко входу шума системы детектор-усилитель на лампах и полевых транзисторах до уровня простых таблиц и номограмм.

Положение облегчается тем, что основные источники шума ламп и полевых транзисторов описываются подобными выражениями:

1. Среднеквадратичное значение дробового шума лампы или теплового шума канала полевого транзистора, отнесенное ко входу,

$$\bar{U}_{\text{ша}}^2 = 4kTR_{\text{ша}} \Delta\omega/2\pi \quad (5)$$

где $R_{\text{ша}} = \frac{M}{S}$ (для ламп $M = 3 - 5$, для полевых транзисторов $M = 0,5 - 0,7$ в зависимости от режима).

2. Среднеквадратичное значение шума сеточного тока лампы или тока затвора полевого транзистора

$$\bar{U}_{\text{ш}}^2 = 2qI \frac{\Delta\omega}{g\omega^2 C^2} \quad (6)$$

где I_g в общем случае включает в себя также суммарный ток утечки и генерации в объеме полупроводникового детектора (I_D), а C - суммарная входная емкость усилителя вместе с емкостью монтажа и детектора.

3. Среднеквадратичное значение шума входного сопротивления при $R \gg 1/\omega C$

$$\bar{U}_{\text{шR}}^2 = \frac{2kT}{\pi R} \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega^2 C^2} \quad (7)$$

где R в общем случае представляет собой параллельное соединение внутреннего сопротивления детектора, сопротивления смещения и сопротивления утечки в цепи сетки лампы или затвора транзистора. Если $R \gg \frac{2kT}{qI_g}$, то вклад шума от R незначителен.

4. Среднеквадратичное значение фликкер-шума

$$\bar{U}_{\text{шг}}^2 = A \frac{\Delta\omega}{\omega} \quad (8)$$

Обычно для ламп $A = 10^{-13} \text{ кул}^2 / \text{пф}^2$, а для современных полевых транзисторов с низким уровнем шума коэффициент $A \approx 10^{-15} \text{ кул}^2 / \text{пф}^2$.

Таким образом, эквивалентная схема входной цепи спектрометрического предусилителя на лампах и полевых транзисторах, включающая приведенные ко входу вышеперечисленные источники шума, может быть представлена в общем виде на рис. 1.

Для наиболее распространенной схемы зарядового предусилителя, собранного по каскодной схеме с емкостной отрицательной обратной связью, самое общее выражение для $R_{\text{ша}}$ /8/:

$$R_{\text{ша}} = \frac{M}{S} \left(1 + \frac{C_{\text{ag}}^2}{C_1^2} \right) + R_{\Gamma} \left(\frac{C_{\text{д}} + C_0}{C} \right) + R_{\Pi} \left(\frac{C_{\text{д}}}{C} \right)^2, \quad (9)$$

где R_{Γ} - противогенерационное сопротивление в цепи управляющей сетки (затвора),

R_{Π} - последовательное сопротивление детектора,

$$C = C_{\text{д}} + C_{\text{м}} + C_0 + C_{\text{гк}} + C_{\text{ag}},$$

$$C_1 = C_{\text{д}} + C_{\text{м}} + C_{\text{гк}},$$

C_0 - емкость обратной связи.

Для полевых транзисторов, в зависимости от режима рабочей точки, справедливы следующие выражения:

$$R_{\text{ша}} = \frac{1}{2S} \cdot \frac{1 + 3z^{1/2}}{1 + 2z^{1/2}}; \quad z = \frac{U_{\text{gs}} + U_{\text{diff}}}{U_0};$$

$$C_{gs} + C_{gd} = C_{g0} \frac{(1 + z^{1/2})}{(1 + 2z^{1/2})};$$

$$S = S_0 (1 - z^{1/2}).$$

В зависимости от $\frac{C_{\text{внешн}}}{C_{g0}}$ имеется оптимальное значение $z_{\text{опт}}$, например, для $\frac{C_{\text{внешн}}}{C_{g0}} = 0,5$, $z_{\text{опт}} = 0,34 - 0$.

Несмотря на сравнительно простые выражения для $R_{\text{ша}}$ и I_g , точный расчет шума может быть произведен только после экспериментального измерения этих параметров. Сравнительно простая методика измерения $R_{\text{ша}}$ и I_g описана в работе /10/.

Сигнал и компоненты шума имеют различный спектральный состав и усиливаются усилителем по-разному. В спектрометрических усилителях для увеличения отношения сигнала к шуму применяются формирующие цепи, ограничивающие полосу частот сверху и снизу (интегрирующие и дифференцирующие цепочки). Поэтому при расчетах приведенного ко входу шума необходимо учитывать коэффициент передачи цепей, ограничивающих полосу частот усилителя, как для компонент шума, так и для сигнала. Если P - коэффициент передачи формирующих цепей для заданной формы сигнала, а $\bar{U}_{\text{швх}}(\omega)$ - суммарный приведенный ко входу шум, то

$$\bar{U}_{\text{ш}} = P \cdot \bar{U}_{\text{швх}}(\omega) \quad (10)$$

это среднеквадратичная величина приведенного ко входу и нормализованного по сигналу шума, которая и будет фигурировать в дальнейших расчетах.

Коэффициент передачи усилителя, имеющего n интегрирующих и m дифференцирующих RC-цепей,

$$K(\omega) = \frac{U_{\text{вых}}(\omega)}{U_{\text{вх}}(\omega)} = \frac{(\omega \tau_D)^m}{(1 + \omega^2 \tau_I^2)^{n/2} (1 + \omega^2 \tau_D^2)^{m/2}}$$

Каждый источник шума дает на выходе усилителя соответственно свой вклад:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{\text{Ш Вых}}^2(\omega) &= \bar{U}_{\text{Ш Вх}}^2(\omega) K^2(\omega) d\omega = \\ &= \bar{U}_{\text{Ш Вх}}^2(\omega) \int_0^{\infty} \frac{(\omega r_{\text{Д}})^m}{(1 + \omega^2 r_{\text{И}}^2)^{n/2} (1 + \omega^2 r_{\text{Д}}^2)^{m/2}} d\omega. \end{aligned}$$

Коэффициент передачи для сигнала, имеющего форму скачка потенциала, можно вычислить, пользуясь операторным методом:

$$K(p) = \frac{U_{\text{Вых}}(p)}{U_{\text{Вх}}(p)} = \left(\frac{1}{1 + pr_{\text{И}}} \right)^n \cdot \left(\frac{pr_{\text{Д}}}{1 + pr_{\text{Д}}} \right)^m;$$

$$U_{\text{Вх}}(p) = \frac{U_{\text{Вх}}}{p}; \quad U_{\text{Вых max}} = P \cdot U_{\text{Вх}}$$

На основании вышеприведенных выражений были рассчитаны приведенные ко входу нормализованные по сигналу шумы в среднеквадратичных электронах для усилительного тракта, имеющего формирующие RC - цепи с одинаковыми значениями постоянной времени $r_{\text{И}} = r_{\text{Д}} = r$ (оптимальный случай для отношения сигнала к шуму):

$$\bar{N}_{\text{Ш11}} = 2,7 \left(\frac{kTR_{\text{Ша}}}{2r} \cdot \frac{C^2}{q^2} + \frac{I_{\text{г}} r}{4q} + \frac{kTr}{2q^2 R} + \frac{A}{2} \cdot \frac{C^2}{q^2} \right)^{1/2}, \quad (11)$$

$$\bar{N}_{\text{Ш21}} = 3,7 \left(\frac{kTR_{\text{Ша}}}{8r} \cdot \frac{C^2}{q^2} + \frac{3I_{\text{г}} r}{16q} + \frac{3kTr}{8q^2 R} + \frac{A}{4} \cdot \frac{C^2}{q^2} \right)^{1/2}, \quad (12)$$

$$\bar{N}_{\text{Ш12}} = 4,35 \left(\frac{3kTR_{\text{Ша}}}{8r} \cdot \frac{C^2}{q^2} + \frac{I_{\text{г}} r}{16q} + \frac{kTr}{8q^2 R} + \frac{A}{4} \cdot \frac{C^2}{q^2} \right)^{1/2}, \quad (13)$$

$$\bar{N}_{\text{Ш22}} = 7,7 \left(\frac{kTR_{\text{Ша}}}{16r} \cdot \frac{C^2}{q^2} + \frac{I_{\text{г}} r}{32q^2} + \frac{kTr}{16q^2 R} + \frac{A}{12} \cdot \frac{C^2}{q^2} \right)^{1/2}. \quad (14)$$

Здесь первый индекс обозначает число интегрирующих цепей, а второй - дифференцирующих, C и I_g включают в себя параметры внешней входной цепи.

Учитывая только дробовый шум и шум флюктуаций I_g и I_D и принимая отношение сигнала к шуму для случая однократного интегрирования и однократного дифференцирования $\gamma_{11} = 1$, легко показать, что для двукратного интегрирования и однократного дифференцирования $\gamma_{21} = 1,14$, для однократного интегрирования и двукратного дифференцирования $\gamma_{12} = 0,84$, для двукратного интегрирования и двукратного дифференцирования $\gamma_{22} = 1$. Отсюда видно, что если нет ограничений на временное разрешение, выгоднее работать в режиме формирования с двумя интегрирующими цепочками и одной дифференцирующей.

Оптимальные значения постоянной времени формирования, при которой приведенный шум минимален (равенство вклада дробового шума и шума от флюктуаций тока I_g и теплового шума входного сопротивления $\bar{U}_{ша}^2 = \bar{U}_{шг}^2 + \bar{U}_{шр}^2$):

$$\tau_{\text{опт}11} = C \left(\frac{R_{ша}}{20 I_g + 1/R} \right)^{1/2}, \quad (15)$$

$$\tau_{\text{опт}21} = 0,58 \tau_{\text{опт}11}, \quad (15a)$$

$$\tau_{\text{опт}12} = 1,73 \tau_{\text{опт}11}, \quad (15b)$$

$$\tau_{\text{опт}22} = \tau_{\text{опт}11}, \quad (15в)$$

а соответствующие значения минимального шума:

$$\bar{N}_{ш\text{min}11} = 1,06 \cdot 10^9 C^{1/2} R_{ша}^{1/4} (20 I_g + 1/R)^{1/4}, \quad (16)$$

$$\bar{N}_{ш\text{min}21} = 0,97 \bar{N}_{ш\text{min}11}, \quad (16a)$$

$$\bar{N}_{ш\text{min}12} = 1,13 \bar{N}_{ш\text{min}11}, \quad (16b)$$

$$\bar{N}_{\text{ш min } 22} = \bar{N}_{\text{ш min } 11} \quad (16\text{в})$$

На основании выражений (11 - 16) и расчетов, проведенных Цукудой^{/3/}, составлена таблица 1 компонент приведенного входного шума в среднеквадратичных электронах (электронно-дырочных пар) и таблица 2 значений ширины линии шума (в кэВ) для кремниевых детекторов от различных источников шума системы детектор - усилитель. Ширина линии шума для германиевых детекторов на 20% меньше.

Пример расчета

Расчитать уровень шума системы Ge-Li детектор - предусилитель с полевым транзистором на входе при оптимальной постоянной времени формирования. Тип формирования - двукратное интегрирование, однократное дифференцирование на RC цепях.

Параметры детектора: $C_d = 12$ пф, $I_d = 2,10 \cdot 10^{-10}$ а.

Параметры полевого транзистора: $S = 2,2$ ма/в, $I_g = 0,5 \cdot 10^{-10}$ а,
 $C_{gs} + C_{gd} = 2,6 + 2,4 = 5$ пф, $A = 10^{-15}$ кул²/пф².

При $C_0 = 1$ пф и $C_M = 2$ пф $C = 20$ пф.

$I_g + I_d = 0,25$ на, $R_{ша} = 0,6/2,2 \cdot 10^{-3} = 270$ ом.

В соответствии с выражением (15а):

$$\tau_{\text{опт } 21} = 0,58 \cdot 20 \cdot 10^{-12} \sqrt{\frac{270}{20 \cdot 0,25 \cdot 10^{-9} + 10^{-9}}} = 0,85 \text{ мксек.}$$

Пользуясь таблицей 1, находим:

$$\bar{N}_{\text{ша}} = 0,52 \cdot 20 \sqrt{\frac{270}{0,85}} = 184 \text{ э ;}$$

$$\bar{N}_{\text{шг}} = 126 \cdot \sqrt{2,5 \cdot 0,85} = 184 \text{ э ;}$$

$$\bar{N}_{\text{шR}} = 890 \sqrt{\frac{0,85}{1000}} = 26 \text{ э (R = 1 Гом) ;}$$

$$\bar{N}_{\text{шf}} = 3,7 \cdot 10^{-2} \cdot 20 = 0,74 \text{ э .}$$

Отсюда полная ширина линии шума системы детектор - усилитель

$$\Delta^{Ge} = 7 \sqrt{\bar{N}_{шa}^2 + \bar{N}_{шg}^2 + \bar{N}_{шR}^2 + \bar{N}_{шr}^2} = 1,8 \text{ кэВ.}$$

Без детектора ширина линии шума усилителя

$$\bar{N}_{шa} = 0,52 \cdot 8 \sqrt{\frac{270}{0,85}} = 74 \text{ э ;}$$

$$\bar{N}_{шg} = 126 \sqrt{0,05 \cdot 0,85} = 26 \text{ э ; } \bar{N}_{шR} = 26 \text{ э .}$$

$$\Delta^{Ge} = 0,6 \text{ кэВ}$$

с наклоном

$$\kappa = \frac{\Delta_a^{Ge}}{C} = 7 \cdot 0,52 \sqrt{\frac{270}{0,85}} = 0,065 \text{ кэВ/пф.}$$

Использование графических методов определения оптимальной постоянной времени формирования и основных источников шума системы детектор - усилитель позволяет свести до минимума все расчеты. На основании вышеприведенных расчетных выражений (11-16) и непосредственно табл. 2 были составлены номограммы для графического определения оптимальной постоянной времени формирования, минимальной ширины линии шума и вклада шумов от основных источников шума системы полупроводниковый детектор - усилитель в зависимости от параметров детектора, входной лампы или транзистора для четырех видов РС формирования.

Пример пользования номограммами

Определить оптимальную постоянную времени формирования τ_{opt} минимальную ширину линии шума и ширину линии шума от основных источников, если система кремниевый полупроводниковый детектор-ламповый предусилитель имеет следующие параметры:

$$C = 10 \text{ пф;}$$

$$R_{шa} = 500 \text{ ом;}$$

$$I_g + I_d = 2,7 \text{ на;}$$

$$R = 470 \text{ Мгом.}$$

Из номограммы 1 определяем $\tau_{\text{опт } 11} = 1 \text{ мксек.}$

Из номограммы 2 определяем $\Delta_{\text{min}}^{\text{SI}} = 2,2 \text{ кэВ.}$

Из номограммы 3 определяем $\Delta_{\text{a}}^{\text{SI}} = 1,5 \text{ кэВ,}$ $\Delta_{\text{g}}^{\text{SI}} = 1,5 \text{ кэВ,}$

$$\Delta_{\text{R}}^{\text{SI}} = 0,3 \text{ кэВ.}$$

Полная ширина линии шума с учетом R :

$$\Delta^{\text{SI}} = \sqrt{1,5^2 + 1,5^2 + 0,3^2} \approx 2,2 \text{ кэВ}$$

с наклоном 0,15 кэВ/пф.

Л и т е р а т у р а

1. В.Г. Бровченко, Ю.Д. Молчанов. ПТЭ, № 4, 5(1964).
2. А.Б. Джиллесли, Сигнал, шум и разрешающая способность усилителей. Перевод с англ., Атомиздат, 1964.
3. M. Tsucuda. IRE Trans., NS-9, N4, 69, 1962 .
4. H.R. Bilger. Nucl. Instrum., v. 40, N1, 54, 1966 .
5. Van der Ziel A.. Proc. IEE, 50, N8, 1808, 1962 .
6. T.L. Emmer. IRE Trans., NS-9, N3, 305, 1962 .
7. T.V. Blalocu. IEEE Trans., NS-11, N3, 365, 1964 .
8. I.L. Blankenship. IEEE Trans, NS-11, N3, 373, 1964 .
9. F.S. Goulding. Semiconductor Detectors for Nuclear Spectrometry, July 30, 1965, UCRL-16231, Berkeley.
10. Б.В. Фефилов, Л. Кумпф. Преприят ОИЯИ, 2110, Дубна, 1965.
11. Б.В. Фефилов. Кандидатская диссертация, ОИЯИ, Дубна, 1965.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 января 1967 г.

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Тип формирования	$\bar{N}_{шa}$ ср. кв. электрон	$\bar{N}_{шg}$ ср. кв. электрон	$\bar{N}_{шR}$ ср. кв. электрон	$\bar{N}_{шf}$ ср. кв. вл.	P	$\gamma/\gamma_{н}$	Примечание
1	Однократное интегрирование, однократное дифференцирование а/ $\tau_{н1} = \tau_{д1} = \tau$ б/ $\tau_{н1} = \tau; \tau_{д1} = \lambda\tau$	$0,76 a$ $1,07 a \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda+1}}$	$107 b$ $150 b \sqrt{\lambda \left(\frac{\lambda}{\lambda+1}\right)}$	$760 h$ $1070 h \sqrt{\lambda \left(\frac{\lambda}{\lambda+1}\right)}$	$38 \cdot 10^{-2} C$ —	0,368 —	1 —	$A_f = 10^{-15} \frac{кг \cdot м^2}{ср^2}$ $P = \frac{U_c \Delta u_c}{U_c \Delta u_c}$
2	Двукратное интегрирование, однократное дифференцирование а/ $\tau_{н1} = \tau_{н2} = \tau_{д1} = \tau$ б/ $\tau_{н1} = \tau_{н2} = \tau; \tau_{д1} = \lambda\tau$	$0,52 a$ $1,04 a \frac{\lambda}{\lambda+1}$	$126 b$ $146 b \frac{\lambda}{\lambda+1} \sqrt{2\lambda+1}$	$890 h$ $1030 h \frac{\lambda}{\lambda+1} \sqrt{2\lambda+1}$	$37 \cdot 10^{-2} C$ —	0,271 —	1,14 —	$\gamma_{н} = \frac{U_c}{\sqrt{U_{шa}^2 + U_{шg}^2}}$ для $\tau_{н}$ $a = C \sqrt{\frac{R_{шa}}{C}}$ $b = \sqrt{I_g \tau}$ $h = \sqrt{\frac{\tau}{R}}$
3	Однокр. инт., двукратное дифференц. а/ $\tau_{н1} = \tau_{д1} = \tau_{д2} = \tau$ б/ $\tau_{н1} = \tau; \tau_{д1} = \tau_{д2} = \lambda\tau$	$1,05 a$ $1,2 a \frac{\lambda}{\lambda+1} \sqrt{\frac{2\lambda+1}{\lambda}}$	$86 b$ $172 b \frac{\lambda}{\lambda+1} \sqrt{\lambda}$	$610 h$ $1220 h \frac{\lambda}{\lambda+1} \sqrt{\lambda}$	$43 \cdot 10^{-2} C$ —	0,228 —	0,94 —	
4	Двукр. инт., двукр. дифференцирование $\tau_{н1} = \tau_{н2} = \tau_{д1} = \tau_{д2} = \tau$	$0,76 a$	$107 b$	$760 h$	$44 \cdot 10^{-2} C$	0,130	1	
5	Трехкратное инт., однокр. дифференц. $\tau_{н1} = \tau_{н2} = \tau_{н3} = \tau_{д1} = \tau$	$0,44 a$	$137 b$	$970 h$	$36 \cdot 10^{-2} C$	0,224	1,27	$R_{шa}$ (ом) I_g (на) C (пф) R (мегаом) τ (мксек)
6	Однокр. инт., однокр. диф. на ЛЗ а/ $\tau_{н1} = \tau_{д3} = \tau$ [10] б/ $\tau_{н1} = \tau; 2\tau_{д3} = 16\tau$ [10] в/ $\tau_{н1} = \tau; 2\tau_{д3} = \lambda\tau$ [4]	$0,7 a$ $0,9 a$ $0,76 a \sqrt{1-e^{-\lambda}}$	$76 b$ $89 b$ $107 b \sqrt{\lambda - (1-e^{-\lambda})}$	$540 h$ $630 h$ $760 h \sqrt{\lambda - (1-e^{-\lambda})}$	$32 \cdot 10^{-2} C$ $39 \cdot 10^{-2} C$ —	0,628 0,981 —	1,21 0,98 —	
7	Однокр. инт., двукр. диф. на ЛЗ а/ $\tau_{н1} = \tau; 2\tau_{д3} = 2\tau_{д2} = 16\tau$ [10] б/ $\tau_{н1} = \tau; 2\tau_{д3} = 2\tau_{д2} = \lambda\tau$ [4]	$1,55 a$ $0,38 a \sqrt{(3-e^2)(1-e^{-\lambda})}$	$115 b$ $54 \sqrt{2\lambda - (3-e^2)(1-e^{-\lambda})}$	$815 h$ $384 h \sqrt{2\lambda - (3-e^2)(1-e^{-\lambda})}$	$63 \cdot 10^{-2} C$ —	0,981 —	0,61 —	

Т а б л и ц а 2

Тип формирования (посл. времени τ)		Ширина линии шума (кЭВ для S_i)				Без учета $\Delta R_{ш} \Delta f$	Без учета R	Примеч.
		Дробовый шум Δa	Шум сеточного тока и утечки Δg	Шум входного сопротивления ΔR	Фликкер-шум Δf	$\Delta_{мин}$ (кЭВ)	$\tau_{опт.}$ (мксек)	
Однократное интегрирование, однократное дифференцирование	τ_{11}	$6,4 \cdot 10^{-3} C \sqrt{\frac{R_{ш0}}{\tau}}$	$0,92 \sqrt{I_g \tau}$	$6,4 \sqrt{\frac{\tau}{R}}$	$3,2 \cdot 10^{-2} C$	$0,11 \sqrt{C^4 R_{ш0} I_g}$	$7 \cdot 10^{-3} C \sqrt{\frac{R_{ш0}}{I_g}}$	$T=293^\circ K$ C (пФ) $R_{ш0}$ (ом) R (Мом) I_g (нА) τ (мксек)
	τ_{21}	$4,4 \cdot 10^{-3} C \sqrt{\frac{R_{ш0}}{\tau}}$	$1,07 \sqrt{I_g \tau}$	$7,6 \sqrt{\frac{\tau}{R}}$	$3,1 \cdot 10^{-2} C$	$0,10 \sqrt{C^4 R_{ш0} I_g}$	$4 \cdot 10^{-3} C \sqrt{\frac{R_{ш0}}{I_g}}$	
Однократное интегрирование, двукратное дифференцирование	τ_{12}	$8,9 \cdot 10^{-3} C \sqrt{\frac{R_{ш0}}{\tau}}$	$0,73 \sqrt{I_g \tau}$	$5,2 \sqrt{\frac{\tau}{R}}$	$3,6 \cdot 10^{-2} C$	$0,12 \sqrt{C^4 R_{ш0} I_g}$	$12 \cdot 10^{-3} C \sqrt{\frac{R_{ш0}}{I_g}}$	
	τ_{22}	$6,4 \cdot 10^{-3} C \sqrt{\frac{R_{ш0}}{\tau}}$	$0,92 \sqrt{I_g \tau}$	$6,4 \sqrt{\frac{\tau}{R}}$	$3,7 \cdot 10^{-2} C$	$0,11 \sqrt{C^4 R_{ш0} I_g}$	$7 \cdot 10^{-3} C \sqrt{\frac{R_{ш0}}{I_g}}$	

$$I_g = I_g^+ + I_g^- + I_y;$$

$$\Delta S_i = 8,5 \sqrt{N^2 \omega};$$

$$\Delta G_e = 0,8 \Delta S_i.$$

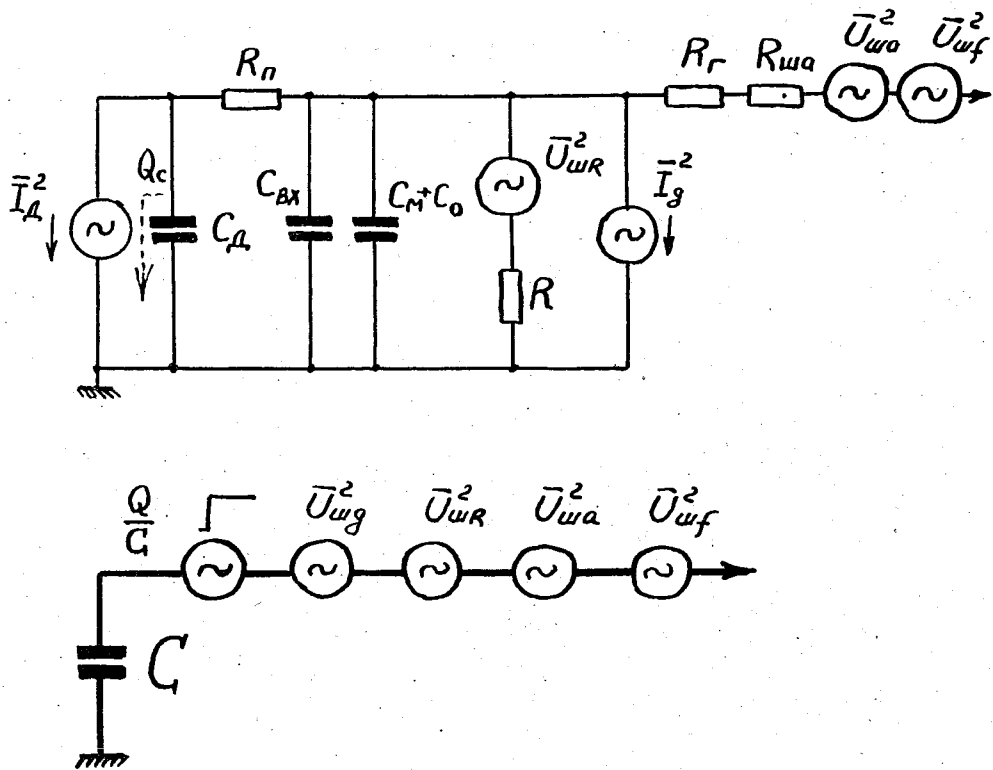


Рис. 1. Эквивалентная схема входной цепи системы детектор - усилитель.

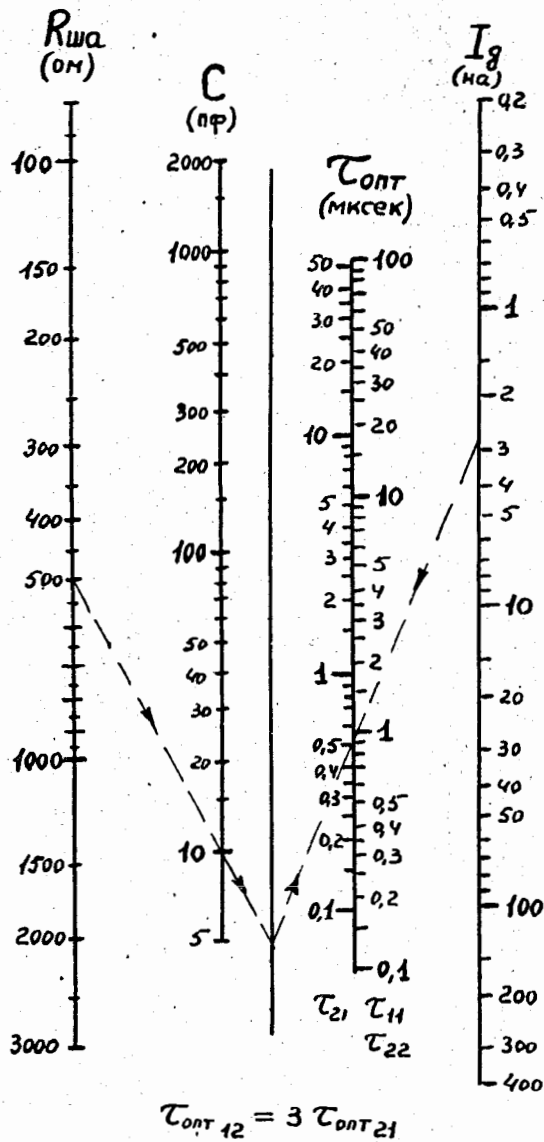


Рис. 2. Номограмма 1. Определение оптимальной постоянной времени формирования.

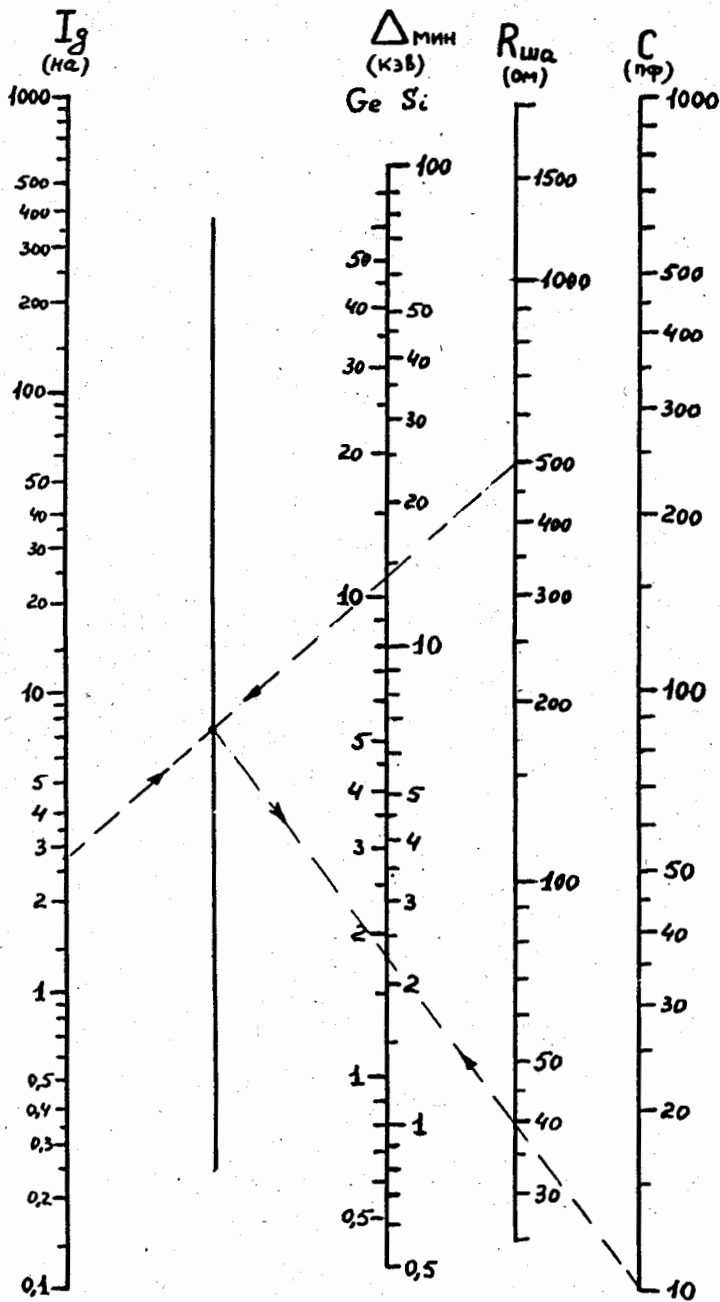


Рис. 3. Номограмма 2. Определение минимальной ширины линии шума системы детектор - усилитель.

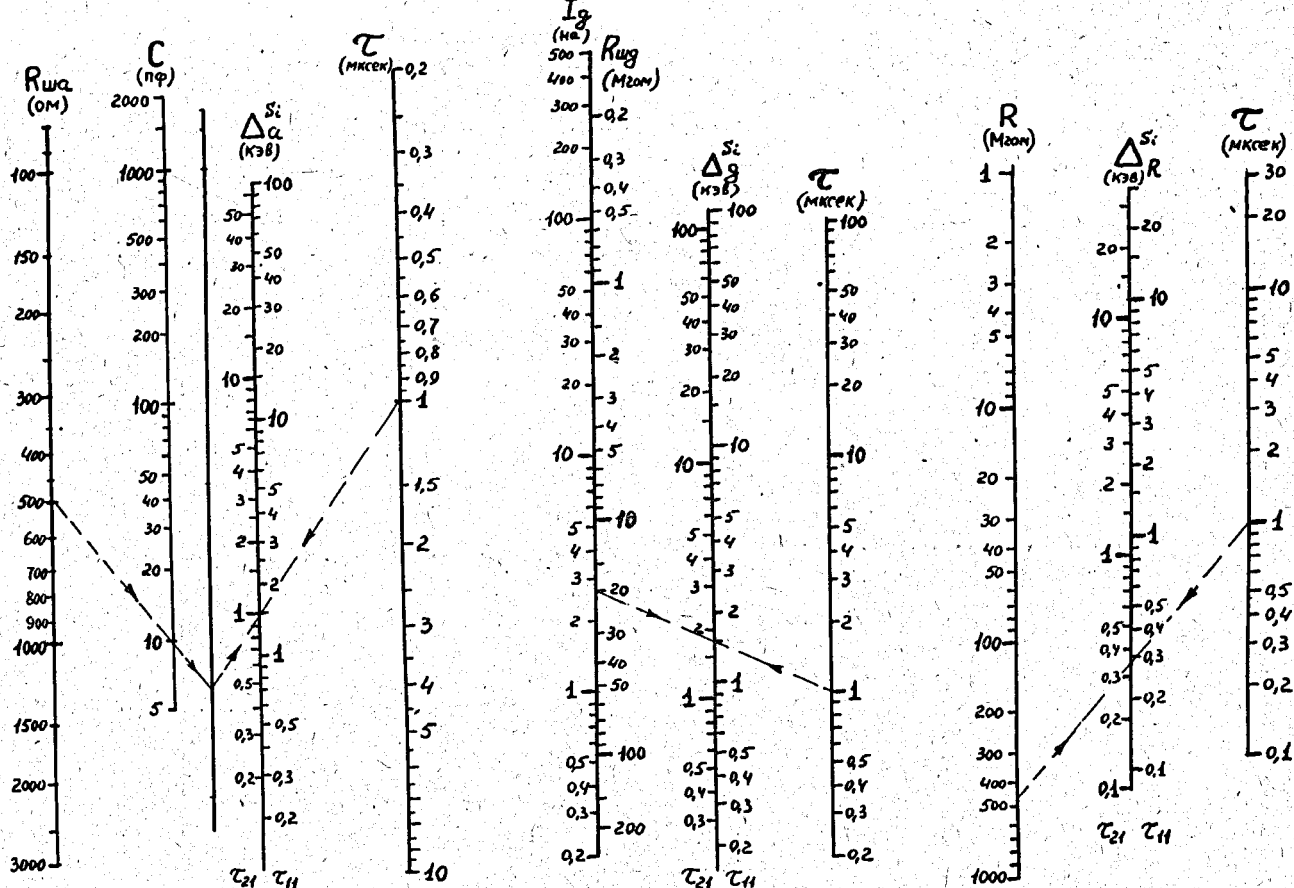


Рис. 4. Номограмма 3. Определение ширины линии шума от основных источников шума (формирование τ_{11} и τ_{21}).

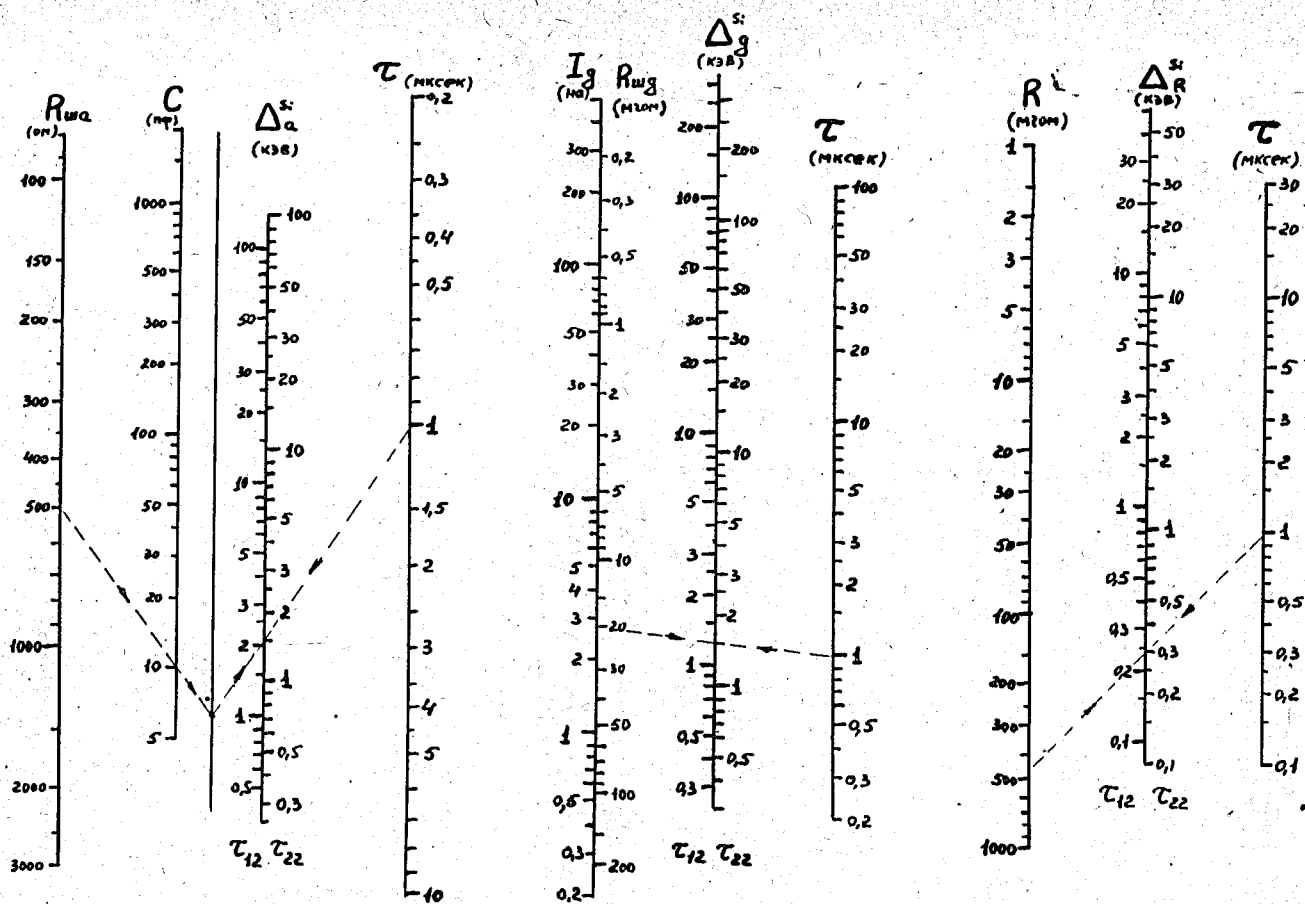


Рис. 5. Номограмма 4. Определение ширины линии шума от основных источников шума (формирование r_{12} и r_{22}).