

4503

Экз. чит. зал

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 4503



В.Г.Субботин

РАСЧЕТ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ВКЛАДА ШУМОВ
ЭЛЕМЕНТОВ, СЛЕДУЮЩИХ ЗА ПОЛЕВЫМ
ТРАНЗИСТОРОМ, В ШУМЫ КАСКОДНОГО
ПРЕДУСИЛИТЕЛЯ С ПОЛЕВЫМ ТРАНЗИСТОРОМ
НА ВХОДЕ

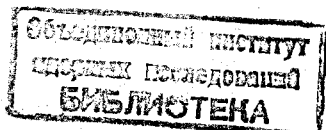
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

1969

13 - 4503

В.Г.Субботин

РАСЧЕТ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ВКЛАДА ШУМОВ
ЭЛЕМЕНТОВ, СЛЕДУЮЩИХ ЗА ПОЛЕВЫМ
ТРАНЗИСТОРОМ, В ШУМЫ КАСКОДНОГО
ПРЕДУСИЛИТЕЛЯ С ПОЛЕВЫМ ТРАНЗИСТОРОМ
НА ВХОДЕ



Применение полевых транзисторов в малошумящих предусилителях дает возможность получить амплитудное разрешение лучшее, чем разрешение, получаемое с предусилителями, выполненными на лампах. При построении транзисторного предусилителя по каскодной схеме с полевым транзистором на входе необходимо оценить вклад шумов биполярных транзисторов и элементов, следующих за полевым транзистором в полный шум предусилителя. В работе приводится расчет, который позволяет сравнить шумы основных источников шумов, следующих за полевым транзистором, с тепловым шумом проводящего канала полевого транзистора.

Шумы биполярного транзистора

Четыре некоррелированных источника шума биполярного транзистора с достаточной точностью описывают его шумовые свойства, если коэффициент усиления по току транзистора $\beta_0 = \frac{I_K}{I_B} \gg 1$ и обратные токи малы по сравнению с действующими (I_{K0} и $I_{Э0}$). Эквивалентная схема транзистора с источниками шума показана на рис. 1 [1,2], на котором r_b - объемное сопротивление базы, $r_{b'э} = \frac{r_{э}}{1 - \alpha_0}$, $C_{b'э} = C_{эд} + C_{эз}$ - диффузионная + зарядовая емкость эмиттера, $C_{b'к}$, $r_{b'к}$ - емкость и сопротивление коллекторного перехода, $r_{кэ} = \frac{r_{э}}{\mu_{эк}}$, где $\mu_{эк}$ - коэффициент обратной связи по напряжению между коллекторным и эмиттерным переходами, $S_T \approx \frac{\alpha_0}{r_{э}}$ - крутизна транзистора,

Г б'к эквивалентную схему транзистора можно упростить. Упрощенная эквивалентная схема с источниками шумов приведена на рис. 2. На этом рисунке дробовый шум коллекторного тока приведен к базе тран-

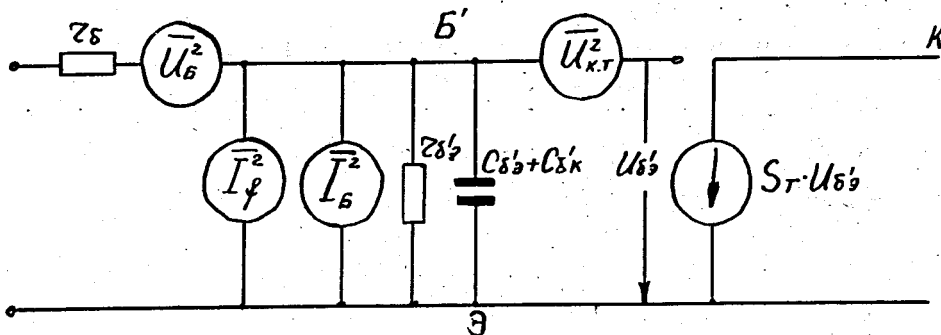


Рис. 2. Упрощенная эквивалентная схема транзистора с источниками шумов. Шум коллекторного тока представлен в виде эквивалентного шумового источника напряжения, включенного последовательно с напряжением $u_{б'э}$.

зистора и представлен в виде эквивалентного шумового источника напряжения, включенного последовательно с напряжением $u_{б'э}$. Эквивалентное шумовое сопротивление этого источника напряжения можно определить из следующих соотношений $\frac{\bar{u}_{к.т.}^2}{\Delta f} = 4kT R_{экт} = \left(\frac{\bar{I}_к^2}{\Delta f}\right) / S_T^2$. Учитывая, что

$$S_T = \frac{e}{kT} I_k, \text{ получим, что } R_{экт} = 0,5 \frac{1}{S_T}. \quad (5)$$

Относительный вклад шумов биполярного транзистора

Для определения относительного вклада в шумы предусилителя дробового шума коллекторного тока биполярного транзистора, который вместе с входным полевым транзистором составляет каскодную пару (рис.3), делается расчет, подобный расчету, который проделан для ламповой каскодной пары в /3/.

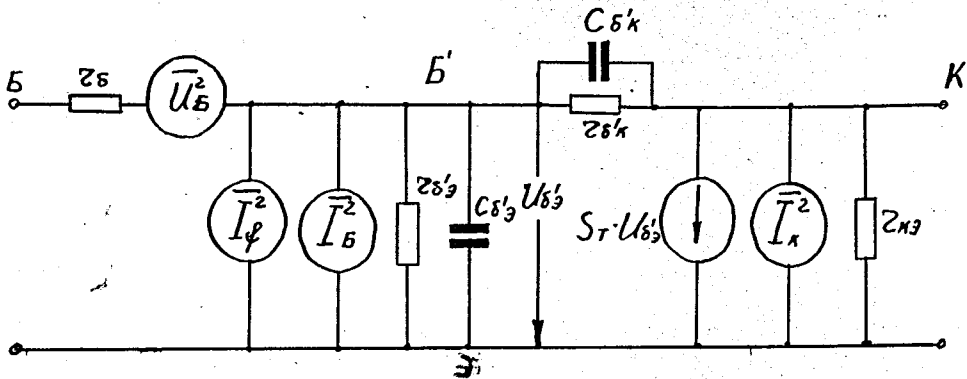


Рис. 1. Эквивалентная Π -образная схема биполярного транзистора с источниками шумов.

и $U_{B'}$ - напряжение на эмиттерном переходе (на входе идеального транзистора).

Спектральные плотности шума шумовых источников; приведенных на эквивалентной схеме, выражаются следующим образом:

$$\frac{\overline{I_B^2}}{\Delta f} = 2eI_B - \text{спектральная плотность шумов тока базы,} \quad (1)$$

$$\frac{\overline{I_K^2}}{\Delta f} = 2eI_K - \text{спектральная плотность шумов коллекторного тока} \quad (2),$$

$$\frac{\overline{U_B^2}}{\Delta f} = 4kT r_B - \text{спектральная плотность тепловых шумов объемного сопротивления базы.} \quad (3)$$

Для низкочастотных шумов (поверхностные шумы) экспериментальная зависимость спектральной плотности шумов дается в виде:

$$\frac{\overline{I_f^2}}{\Delta f} = k I_B^\gamma f^{-\alpha} \quad (\gamma \approx 1, \alpha \approx 1): \quad (4)$$

При достаточно малом сопротивлении нагрузки R - нагрузки $\ll r_{KЭ}$,

Приращение тока через полевой транзистор, вызванное приложением к затвору напряжения u_z , равно:

$$i_{нТ} = \left(u_z - \frac{u_c C_{зс}}{\Sigma C} \right) S_{пт} - \frac{u_c}{R_{нт}} \quad (6)$$

где u_c - напряжение стока, $C_{зс}$ - емкость затвор-сток полевого транзистора, $C_{зи}$ - емкость затвор-исток полевого транзистора

$$\Sigma C = C_{зс} + C_{зи} + C_{внешняя}$$

В то же время

$$u_c = i_{нт} R_{вх.т.} \quad (7)$$

где $R_{вх.т.} = r_z + (1 - \alpha_0) r_b$ - входное сопротивление транзистора, включенного по схеме с общей базой. Из (6) и (7) следует, что

$$i_{нт} = \frac{u_z S_{пт}}{1 + \frac{R_{вх.т.} C_{зс}}{\Sigma C} S_{пт} + \frac{R_{вх.т.}}{R_{нт}}}$$

Изменение тока коллектора биполярного транзистора, вызванное тепловым шумом канала полевого транзистора, приведенным к его затвору, равно:

$$\bar{i}_{к.п.т.к.} = \frac{\alpha \bar{u}_{пт.к.} S_{пт}}{1 + \frac{R_{вх.т.} C_{зс}}{\Sigma C} S_{пт} + \frac{R_{вх.т.}}{R_{нт}}} \quad (8)$$

где $\bar{u}_{пт.к.}$ - среднее квадратичное значение напряжения шума канала полевого транзистора. (Шум приведен к затвору). Соответственно, изменение напряжения в коллекторе

$$\bar{u}_{к.п.т.к.} = \frac{\alpha \bar{u}_{пт.к.} S_{пт.} R'_k}{1 + \frac{R_{вх.т.} C_{зс}}{\Sigma C} S_{пт} + \frac{R_{вх.т.}}{R_{нт}}} \approx \frac{\alpha \bar{u}_{пт.к.} S_{пт} R'_k}{1 + \frac{R_{вх.т.} C_{зс}}{\Sigma C} S_{пт}} \quad (9)$$

Найдем выражение для приращения напряжения в коллекторе транзистора, вызванное дробовым шумом коллекторного тока, Определим коэффициент усиления по напряжению от базы к коллектору для транзистора, включенного по схеме на рис. 3. Сопротивление $z_{\text{э}}$ в эмиттере транзистора равно параллельному включению $R_{\text{пт}}$ и $\frac{\Sigma C}{C_{\text{эс}} S_{\text{пт}}}$

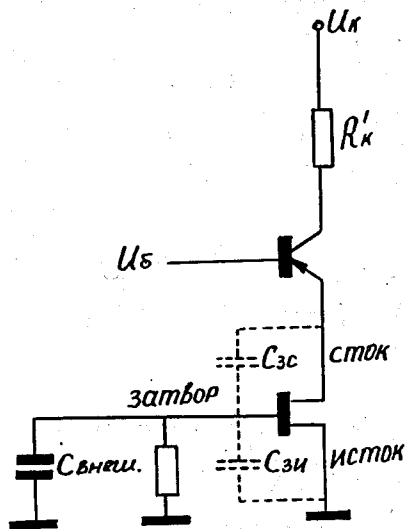


Рис. 3. Входной каскод предусилителя.

$$z_{\text{э}} = \frac{R_{\text{пт}} \Sigma C}{\Sigma C + \mu_{\text{пт}} C_{\text{эс}}} \quad (10)$$

Коэффициент усиления по напряжению транзистора равен:

$$K_u = - \frac{\alpha R'_k}{r_{\text{б}} (1 - \alpha + (r_{\text{э}} + z_{\text{э}}))} \approx - \frac{\alpha R'_k}{r_{\text{э}} + \frac{R_{\text{пт}} \Sigma C}{\Sigma C + \mu_{\text{пт}} C_{\text{эс}}}}$$

Изменение напряжения в коллекторе транзистора, вызванное дробовым шумом коллекторного тока, есть:

$$\bar{u}_{\text{к.к.т.}} = \frac{a \bar{u}_{\text{к.т.}} R'_k}{r + \frac{R_{\text{инт}} \Sigma C}{\Sigma C + \mu_{\text{пт}} C_{\text{зс}}}} \quad (11)$$

где $\bar{u}_{\text{к.т.}}$ — среднее квадратичное значение напряжения шума коллекторного тока транзистора (шум приведен к базе транзистора). Величина отношения $\frac{\bar{u}_{\text{к.пт.к.}}}{\bar{u}_{\text{к.к.т.}}}$ показывает, во сколько раз канальный шум полевого транзистора превосходит дробовый шум коллекторного тока биполярного транзистора

$$\frac{\bar{u}_{\text{к.пт.к.}}}{\bar{u}_{\text{к.к.т.}}} = \frac{r_{\text{э}} + R_{\text{инт}} \frac{\Sigma C}{\Sigma C + \mu_{\text{пт}} C_{\text{зс}}}}{1/S_{\text{пт}} + [r_{\text{э}} + (1-a)r_{\text{б}}] \frac{C_{\text{зс}}}{\Sigma C}} \cdot \frac{\bar{u}_{\text{пт.к.}}}{\bar{u}_{\text{к.т.}}} \quad (12)$$

Отношение $\frac{C_{\text{зс}}}{\Sigma C}$ обычно не превышает 1/3. Если ток эмиттера транзистора не менее 0,5 ма ($r_{\text{э}} = 50$ ом), то в знаменателе членом $[r_{\text{э}} + (1-a)r_{\text{б}}] \frac{C_{\text{зс}}}{\Sigma C}$ можно пренебречь по сравнению с $1/S_{\text{пт}}$ даже для $S_{\text{пт}}$ порядка 4–5 ма/вольт ($1/S_{\text{пт}} = 250\text{--}200$ ом). В числителе членом $r_{\text{э}}$ можно пренебречь, если $I_{\text{э}} \geq 0,5$ ма ($r_{\text{э}} \leq 50$ ом). Окончательно имеем

$$\frac{\bar{u}_{\text{к.пт.к.}}}{\bar{u}_{\text{к.к.т.}}} \approx \frac{1}{\frac{1}{\mu_{\text{пт}}} + \frac{C_{\text{зс}}}{\Sigma C}} \cdot \frac{\bar{u}_{\text{пт.к.}}}{\bar{u}_{\text{к.т.}}} \quad (13)$$

Если $\mu_{\text{пт}} \approx 40\text{--}50$, то для C внешнего = 2–3 ($C_{\text{зс}} + C_{\text{зи}}$)

$$\frac{\bar{u}_{\text{к.пт.к.}}}{\bar{u}_{\text{к.к.т.}}} \approx \frac{\bar{u}_{\text{пт.к.}}}{\bar{u}_{\text{к.т.}}} \cdot \frac{\Sigma C}{C_{\text{зс}}} \quad (14)$$

Так как

$$\frac{\bar{u}_{\text{ПТ.К.}}^2}{\Delta f} = 4 k T R_{\text{Э.ПТ.К.}}, \quad (15)$$

а

$$\frac{\bar{u}_{\text{К.Т.}}^2}{\Delta f} = 4 k T R_{\text{Э.К.Т.}}, \quad (16)$$

то

$$\frac{\bar{u}_{\text{К.ПТ.К.}}}{\bar{u}_{\text{К.К.Т.}}} = \sqrt{\frac{R_{\text{Э.ПТ.К.}}}{R_{\text{Э.К.Т.}}}} \cdot \frac{\Sigma C}{C_{\text{Эс}}}, \quad (17)$$

где

$$R_{\text{Э.ПТ.К.}} \approx 0,7 / S_{\text{ПТ}}^{1/4}, \quad (18)$$

а

$$R_{\text{Э.К.Т.}} = 0,5 / S_{\text{Т}}. \quad (19)$$

Если расчёт, подобный вышеприведенному, провести с учётом тепловых шумов распределенного сопротивления базы $r_{\text{б}}$, то

$$\frac{\bar{u}_{\text{К.ПТ.К.}}}{\bar{u}_{\text{К.К.Т.}}} \approx \sqrt{\frac{R_{\text{Э.ПТ.К.}}}{R_{\text{Э.К.Т.}} + r_{\text{б}}}} \cdot \frac{\Sigma C}{C_{\text{Эс}}}. \quad (20)$$

Например, если $R_{\text{Э.ПТ.К.}} = 230 \text{ ом}$ ($S_{\text{ПТ}} = 3 \text{ ма} \cdot \text{вольт}^{-1}$), эмиттерный

ток транзистора $I_{\text{э}} = 1$ ма ($R_{\text{э.к.т.}} = 13$ ом), распределенное сопротивление базы равно 100 ом, а $\frac{\Sigma C}{C_{\text{эс}}} = 3$, то

$$\frac{\bar{u}_{\text{к.пт.к.}}}{u_{\text{к.к.т.}}} \approx 4,3$$

Следовательно, шум коллекторного тока и шум распределенного сопротивления базы транзистора составляют незначительную добавку к канальному шуму полевого транзистора, параметры которого близки к параметрам полевых транзисторов, обычно применяемых в предусилителях. Следует также отметить, что шум распределенного сопротивления базы дает значительно больший вклад в добавочный шум, чем шум коллекторного тока транзистора. Так как база биполярного транзистора каскодной пары заземлена по переменному току, а входное сопротивление транзистора значительно больше сопротивления $r_{\text{б}}$, то шумовой источник тока базы можно представить в виде источника шумового напряжения, включенного между базой и землей, для которого

$$\frac{\bar{u}_{\text{Б.т.Б.}}}{\Delta f} = 2e I_{\text{Б}} r_{\text{б}}^2 \quad (21)$$

Эквивалентное шумовое сопротивление этого источника шумов можно найти из соотношения

$$\frac{\bar{u}_{\text{Б.т.Б.}}^2}{\Delta f} = 4kT R_{\text{э.т.б.}} = 2e I_{\text{Б}} r_{\text{б}}^2,$$

откуда следует, что

$$R_{\text{э.т.б.}} [\text{ом}] = 2 \cdot 10^{-5} I_{\text{Б}} [\text{мка}] r_{\text{б}}^2 [\text{ом}]. \quad (22)$$

Если предположить, что $I_{\text{Б}} = 10$ мка и $r_{\text{б}} = 100$ ом, то $R_{\text{э.т.б.}} = 2$ ом. Этим типом шумов можно пренебречь в отличие от дробового шума коллекторного тока и шума сопротивления базы транзистора.

Все вышеприведенные расчёты сделаны для среднего диапазона частот и их можно считать справедливыми, если биполярный транзистор имеет

$\tau_{\beta} \leq \tau_{\phi}$, где τ_{ϕ} — постоянная времени цепей формирования в основном усилителе.

Биполярный транзистор должен быть достаточно высокочастотным, потому что принятое выражение для шумов тока базы (шумы токораспределения) справедливо для частот $f < \frac{f_a}{\sqrt{\beta_0}}$, где β_0 — коэффициент усиления транзистора по току. Нужно отметить, что при выборе транзистора необходимо считаться и с низкочастотным шумом, так как для высокочастотных транзисторов низкочастотный шум распространяется до значительных частот. Например, П416 имеет белый спектр, начиная практически только с 0,5 МГц^{1/5}.

Относительный вклад шумов сопротивления нагрузки каскода и тока базы транзистора, следующего за каскодом

Изменение напряжения в коллекторе биполярного транзистора, вызванное тепловым шумом канала, приведенным к затвору полевого транзистора (9),

$$\overline{u_{\text{к.пт.к.}}^2} = a^2 \overline{U_{\text{пт.к.}}^2} S_{\text{пт}}^2 R_{\text{н}}^2 \Delta f.$$

Шум сопротивления нагрузки в коллекторе транзистора

$$\overline{u_{\text{Rн}}^2} = 4kT R_{\text{н}} \Delta f.$$

Отношение шумовых напряжений, приведенных к коллектору биполярного транзистора

$$\frac{\overline{u_{\text{к.пт.к.}}^2}}{\overline{u_{\text{Rн}}^2}} = a^2 S_{\text{пт}}^2 R_{\text{э.пт.к.}} R_{\text{н}}, \quad (23)$$

или с учётом (18)

$$\frac{\overline{u_{\text{к.пт.к.}}^2}}{\overline{u_{\text{Rн}}^2}} \approx 0,7 S_{\text{пт}} R_{\text{н}}. \quad (24)$$

Такой же критерий для выбора R_H приводится в работе [6]. Имея (24), можно выбрать R_H , если задаться отношением $\frac{u_{к.пт.к.}^2}{u_{RH}^2}$. Если довольствоваться отношением $\frac{u_{к.пт.к.}^2}{u_{RH}^2} = 10$, то $R_H > \frac{14}{S_{пт}}$. Например, для полевого транзистора с крутизной $5 \text{ ма} \cdot \text{вольт}^{-1}$ $R_H \geq 3 \text{ ком}$.

Шум тока базы транзистора, следующего за биполярным транзистором каскода, можно представить в виде источника шумового тока, который действует между базой этого транзистора и землей. Квадрат среднего квадратичного значения напряжения, которое создает этот источник тока в коллекторе транзистора каскода.

$$u_{к.т.Б'}^2 = 2e I_B R_H^2 \Delta f.$$

Следовательно, отношение

$$\frac{u_{к.пт.к.}^2}{u_{к.т.Б'}^2} \approx \frac{\alpha^2 u_{пт.к.}^2 S_{пт}^2 R_H^2 \Delta f}{2e I_B R_H^2 \Delta f}.$$

Учитывая (15) и (18), получаем:

$$\frac{u_{к.пт.к.}^2}{u_{к.т.Б'}^2} \approx 36 \frac{S_{пт} [\text{ма/вольт}]}{I_B [\mu\text{а}]} \quad (25)$$

Например, для $S_{пт} = 2,5 \text{ ма} \cdot \text{вольт}^{-1}$ и тока базы транзистора, следующего за каскодом $I_B = 5 \text{ мка}$, отношение $\frac{u_{к.пт.к.}^2}{u_{к.т.Б'}^2} = 18$. Ухудшение разрешения при увеличении входной емкости, которое имеет место в предусилителях, определяется всеми источниками шума, которые включены не параллельно входной емкости предусилителя. Основным источником шума такого типа в полевом транзисторе является тепловой шум канала. Дополнительный вклад в шумы, который вносится элементами схемы предусилителя, следующими за полевым транзистором, приводит к более резкому ухудшению разрешения при увеличении входной емкости. Измеряя зависимость разрешения предусилителя от входной емкости, сравнивая ее с теоретической зависимостью, которую имел бы преду-

силитель, если бы единственным источником шума, включенным не параллельно с входной емкостью, был каналный шум полевого транзистора (при условии, что низкочастотным шумом этого полевого транзистора можно пренебречь), можно оценить вклад элементов, следующих за полевым транзистором, в полный шум предусилителя.

Был собран предусилитель по каскодной схеме с полевым транзистором на входе. Полевой транзистор имел крутизну $2,5 \text{ ма} \cdot \text{вольт}^{-1}$. Вторым транзистором каскодной пары служил П416. Разрешение этого предусилителя при однократном интегрировании и однократном дифференцировании с $\tau = 10^{-6}$ сек ухудшалось с коэффициентом $0,12 \text{ кэв/пф}$. Теоретическая величина коэффициента, характеризующего ухудшение разрешения при увеличении входной емкости при учёте только теплового шума канала полевого транзистора с крутизной $2,5 \text{ ма} \cdot \text{вольт}^{-1}$, равна $0,107 \text{ кэв} \cdot \text{пф}^{-1}$. Следовательно, дополнительный шум, вносимый элементами схемы, следующими за полевым транзистором, не превышал в нашем случае 12% теплового шума канала полевого транзистора.

Л и т е р а т у р а

1. H.R. Bilger. Nucl. Instr. Meth. 40 (1966), N1, p. 54.
2. Я.Ф. Федотов. Основы физики полупроводниковых приборов ст. 324, 1964.
3. А.Б. Джиллесли. Сигнал, шум и разрешающая способность усилителей. 1964 г.
4. Б.В. Фефилов. Полевые транзисторы. Принцип работы, теория и применение в спектрометрических усилителях (Обзор по опубликованным материалам). Препринт ОИЯИ 1897, Дубна 1964.
5. В.Ф. Фокина. Полупроводниковые приборы и их применение. Сборник статей под редакцией Я.А. Федотова. Выпуск 10, 1963, ст. 299.
6. В. Радека. Полевые транзисторы в зарядочувствительных усилителях. Институт Раджера Босковича. Загреб, Югославия. Препринт Брукхавенской национальной лаборатории. БНЛ 6953, Нью-Йорк, 1963 г.

Рукопись поступила в издательский отдел

23 мая 1969 года.