

В. Н. МАСЛЕННИКОВ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТРАНЗИСТОРНЫХ И ЛАМПОВЫХ ВИДЕОУСИЛИТЕЛЕЙ

Рассматриваются шумовые характеристики ламп и транзисторов в видеоусилителях, работающих от электровакуумной передающей телевизионной трубки (источника тока). Получены соотношения, позволяющие выбрать активный элемент, наиболее подходящий по шумовым характеристикам для видеоусилителя.

Ключевые слова: чувствительность, шумы, видеоусилитель, активный элемент, телевизионный датчик.

В телевизионных датчиках в качестве преобразователей свет—сигнал чаще всего в настоящее время используются твердотельные матрицы, а видеоусилители выполняются на транзисторах. Однако существуют специфические области применения телевизионных устройств и систем (например, в радиационной среде), где приходится использовать электровакуумные приборы, в том числе электронные лампы и передающие трубки.

Чувствительность ТВ-датчиков в значительной степени определяется шумами предварительного видеоусилителя. Особенностью таких усилителей является то, что они работают от источника тока, зашунтированного выходной паразитной емкостью.

В настоящей статье сравниваются шумы видеоусилителей, выполненных на электронных лампах и транзисторах.

В видеоусилителях, используемых в ТВ-датчиках, основными являются дробовые, тепловые и фликкер-шумы. На рис. 1 и 2 соответственно представлены шумовые эквивалентные схемы электронной лампы [1] и биполярного транзистора [2], где приняты следующие обозначения:

— для электронной лампы: $C_{вх}$, $C_{пр}$ и $C_{вых}$ — соответственно входная, проходная и выходная паразитные емкости активного элемента; S — крутизна статической входной характеристики; R_i — внутреннее сопротивление;

— для биполярного транзистора: $C_{вх}$ и $C_{пр}$ — соответственно емкости эмиттерного и коллекторного переходов, включающие барьерные и диффузионные составляющие; S — крутизна транзистора; r — низкочастотное сопротивление эмиттерного перехода в схеме с общим эмиттером; r_B — сопротивление базы.

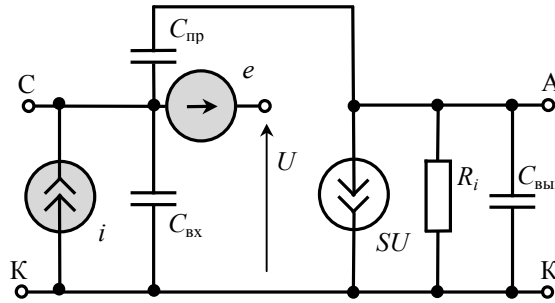


Рис. 1

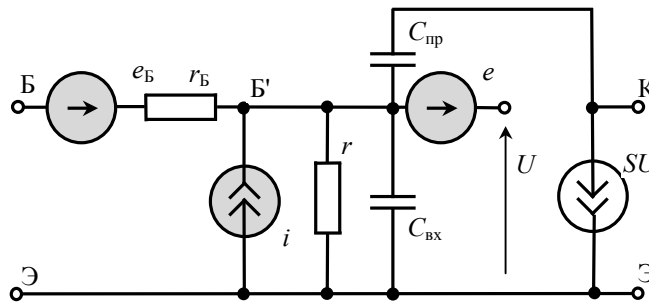


Рис. 2

На рис. 1: e — источник дробовых шумов лампы или, соответственно, тепловых шумов канала полевого транзистора, в том числе и фликкер-шумов; i — источник шумов токов утечки сетки или затвора. Параметры источников шума определяются следующими соотношениями:

$$\overline{de^2} = 4kTr_{ш}df + \frac{\Phi}{f}df; \quad \overline{di^2} = 2qI_{ут. экв}df,$$

где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; $r_{ш}$ — эквивалентное сопротивление шумов; Φ — эмпирическая константа фликкер-шумов (например, для транзистора КП307А $\Phi \leq 2 \cdot 10^{-14} \text{ В}^{-2}$); f — частота; q — заряд электрона; $I_{ут. экв}$ — эквивалентный ток утечки; для ламп и полевых транзисторов с p — n -переходом этот ток равен сумме всех составляющих тока утечки, а для транзисторов с изолированным затвором

$$I_{ут. экв} = 2\phi_T g_{ут},$$

где $\phi_T = kT/q$ — температурный потенциал, $g_{ут}$ — проводимость тока утечки затвора.

На рис. 2 источники характеризуют: e — дробовые шумы тока коллектора, i — дробовые шумы тока базы, $e_б$ — тепловые шумы сопротивления базы:

$$\overline{de^2} = 4kTr_{ш}df; \quad \overline{di^2} = 2q[I_{Э}(1-\alpha) + I_{к0}]df + \frac{\Phi' I_{Э}}{f}df; \quad \overline{de_б^2} = 4kTr_бdf,$$

где $I_{Э}$ — постоянная составляющая тока эмиттера; $I_{к0}$ — обратный ток коллекторного перехода; α — статический коэффициент передачи тока в схеме с общей базой; Φ' — константа, составляющая для некоторых транзисторов $(3,5 \dots 18) \cdot 10^{-17} \text{ А}$ [3].

Здесь рассматриваются усилители, выполненные на лампах и транзисторах, включенных по основной схеме (с общим катодом, эмиттером или истоком). При сравнении учитываются только основные шумы усилителя — шумы первого каскада.

На рис. 3 приведена эквивалентная схема первого каскада на лампе или полевом транзисторе: здесь показаны источник сигнала (передающая трубка) с током I_c и выходной емкостью C ; R и i_R — сопротивление нагрузки источника сигнала и его тепловые шумы, $di_R^2 = 4kTdf/R$; Z_n — эквивалентная нагрузка каскада.

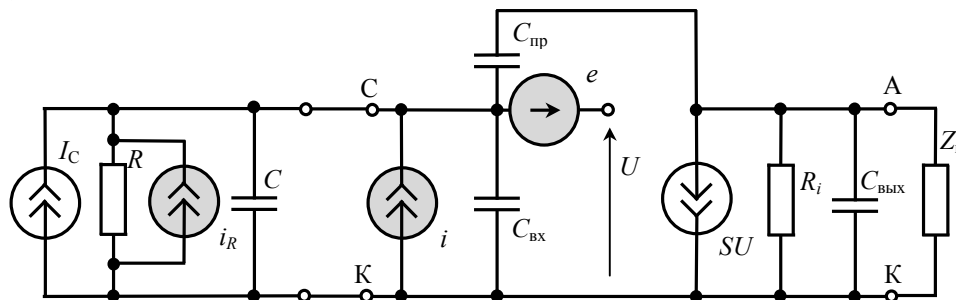


Рис. 3

Шумы таких видеоусилителей целесообразно характеризовать отношением сигнал/шум или приведенным ко входу усилителя (к полюсам сигнала) эквивалентным шумовым током, что практически равноценно. Приведенный ток шума лампы или полевого транзистора (обозначенных индексами „л“ и „пт“), усредненный в полосе Δf , символически может быть представлен выражением

$$i_{\text{вх. л,пт}} = \int_{\Delta f} d \left\{ i_R + i + ek \left| 1/R + j\omega C_{\Sigma} \right| \right\}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$, $\kappa = 1/|1 - j\omega C_{\text{пр}}/S|$, $C_{\Sigma} = C + C_0$, $C_0 = C_{\text{вх}} + C_{\text{пр}}$.

Приведенный шум усилителя, выполненного на биполярном транзисторе (индекс „бт“), определяется как

$$i_{\text{вх. бт}} = \int_{\Delta f} d \left\{ i_R + i \left| \frac{Z + r_{\text{Б}}}{Z} \right| + ek \left| \frac{Z + r_{\text{Б}} + Z_0}{ZZ_0} \right| + \frac{e_{\text{Б}}}{|Z|} \right\}, \quad (2)$$

где $Z_0 = r/(1 + j\omega C_0 r)$, $Z = R/(1 + j\omega CR)$.

Коэффициент κ в приведенных выражениях практически близок к единице и в дальнейшем не учитывается.

При сравнении активных элементов по шумовым характеристикам выделить какую-либо составляющую как главную нельзя, что обусловлено зависимостью от области усиливаемых частот. Поэтому целесообразно сравнить активные элементы по аналогичным составляющим шума с помощью выражений (1) и (2).

Сравним шумовые характеристики лампы и полевого транзистора. Так как выражение (1) является для них общим, то сравнение сведется к анализу параметров $r_{\text{ш}}$, C_0 , $I_{\text{ут. экв}}$ и Φ .

Дробовые шумы ламп и тепловые шумы канала полевых транзисторов в среднем одного порядка, так как одного порядка величины $\sqrt{r_{\text{ш}}} \cdot C_{\Sigma}$ [4]. При этом шумы транзисторов меньше, чем шумы ламп: так, полевые транзисторы (например, КП307, КП302) лучше таких „малозумящих“ ламп, как 6С3П, 6С15П, 6Ж11П (в триодном режиме). Следует заметить, что в настоящее время транзисторы КП303, КП307, КП341 являются одними из лучших отечественных полевых транзисторов ($C_{\text{вх}} \approx 5$ пФ, $C_{\text{пр}} \approx 2$ пФ, $S \approx 5$ мА/В, малые фликкер-шумы).

И лампы, и полевые транзисторы имеют большой разброс как по уровню шумов тока утечки, так и по самим токам утечки. Ток затвора различных полевых транзисторов составляет $10^{-8} \dots 10^{-17}$ А [5], а сеточный ток ламп — $10^{-7} \dots 10^{-15}$ А [6]. При этом эквивалентный ток утечки, а значит, и шумы полевых транзисторов с p — n -переходом меньше, чем приемно-усилительных, а транзисторов с изолированным затвором — меньше, чем электрометрических ламп.

По уровню фликкер-шумов, которые иногда называют непрогнозируемыми, лампы и полевые транзисторы также имеют большой разброс, однако некоторые (лучшие) типы ламп и полевых транзисторов с p — n -переходом имеют практически одинаковую ЭДС фликкер-шумов. Так, спектральная составляющая шумов нувистора 6С51Н на частоте 20 Гц, согласно работе [7], составляет примерно $15 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$, а полевого транзистора КП303А (по паспорту) — не более $30 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$.

Таким образом, по всем составляющим полевые транзисторы либо сравнимы с лампами, либо лучше их.

При сравнении биполярного транзистора с рассмотренными активными элементами предполагается, что $r_B \ll Z$ и коэффициент β не зависит от тока эмиттера.

Сравнив шумы обратного тока коллекторного перехода с шумами тока утечки, получим соотношение

$$A_{\text{ут}}^2 = I_{\text{к0}} / I_{\text{ут. экв}},$$

где $A_{\text{ут}}^2 = \overline{i_{\text{вх. бт}}^2} / \overline{i_{\text{вх. л, пт}}^2}$; обратный ток коллектора, особенно германиевых транзисторов, обычно больше токов утечки ламп и полевых транзисторов.

При сравнении активных элементов по уровню фликкер-шумов следует учитывать, что в биполярном транзисторе они сложным образом и по-разному, в зависимости от технологии, зависят от тока эмиттера. Для некоторых транзисторов зависимость мощности фликкер-шумов от тока эмиттера можно аппроксимировать первой степенью [3]. В этом случае при оптимальном токе эмиттера

$$I_{\text{Э. опт}} = \Phi_T \omega_B C_{\Sigma} \sqrt{\frac{1/3 + 1/\omega_B^2 C_{\Sigma}^2 R^2}{1 - \alpha + \frac{\Phi' \ln(f_B / f_H)}{2q \Delta f}}} \quad (3)$$

соотношение фликкер-шумов активных элементов будет следующим:

$$A_{\text{фл}}^2 = \frac{\overline{i_{\text{ш. фл. бт}}^2}}{\overline{i_{\text{ш. фл. л, пт}}^2}} = \frac{\Phi' I_{\text{Э. опт}}}{\Phi} \frac{R^2}{1 + \omega_B^2 C_{\Sigma}^2 \text{бт} R^2 / [2 \ln(f_B / f_H)]}, \quad (4)$$

где индексы „в“ и „н“ соответствуют верхней и нижней граничным частотам полосы пропускания.

Из выражения (4) нетрудно найти значение критической полосы пропускания усилителя:

$$\Delta f_{\text{кр}} = \frac{1}{2\pi R C_{\Sigma}} \sqrt{2 \ln(f_B / f_H) \left[\frac{\Phi' I_{\text{Э. опт}} R^2}{\Phi} - 1 \right]}.$$

Отсюда следует, что при $R \geq 100$ кОм лампы и полевые транзисторы с p — n -переходом по уровню фликкер-шумов лучше биполярных транзисторов в усилителях с полосой пропускания до десятков мегагерц. Уровень фликкер-шумов транзисторов с изолированным затвором при современной технологии изготовления очень велик.

Дробовые шумы биполярного транзистора зависят от режима работы по постоянному току. Приведенный ток дробовых шумов определяется из выражения (2) при оптимальном токе эмиттера (3): без учета фликкер-шумов получим

$$\overline{i_{др}^2} = 2 \cdot 2qI_{Э. опт} (1 - \alpha) \Delta f. \quad (5)$$

Используя выражения (1), (2) и (5), можно сравнить дробовые шумы биполярного транзистора с соответствующими шумами лампы и полевого транзистора:

$$A_{др}^2 = \frac{I_{Э. опт} (1 - \alpha)}{\Phi_T r_{ш} \left(1/R^2 + \omega_B^2 C_{\Sigma}^2 / 3 \right)_{л, пт}}.$$

Отсюда при $\omega_B^2 C_{\Sigma}^2 \gg 3/R$ можно найти значение критической полосы пропускания усилителя, при которой приведенные токи сравниваемых шумов равны. Пренебрегая влиянием фликкер-шумов, что оказалось допустимым, получаем

$$\Delta f_{кр} = C_{\Sigma \text{ бт}} \sqrt{3(1 - \alpha)} / 2\pi \left(r_{ш} C_{\Sigma}^2 \right)_{л, пт}. \quad (6)$$

Чем меньше полоса пропускания усилителя по сравнению с $\Delta f_{кр}$, тем значительно биполярный транзистор уступает остальным активным элементам по уровню дробовых шумов.

Как видно из формулы (6), критическая полоса пропускания тем шире, чем меньше емкость источника сигнала и коэффициент передачи биполярного транзистора. Например, сравнение полевого (КП307) и биполярного (ГТ311) транзисторов показывает, что в усилителе для сигнала видеоконата при $C_{\Sigma} \approx 15$ пФ выгоднее применять полевой транзистор, работающий на частотах до 15—20 МГц.

С увеличением емкости источника сигнала, как следует из выражения (6), использование биполярного транзистора предпочтительнее. Так, в диапазоне вещательного телевизионного стандарта шумовые свойства транзисторов КП307 и ГТ311 одинаковы при $C_{\Sigma} = 40—60$ пФ. Однако такая большая емкость не характерна для передающих трубок.

Шумы, вызванные сопротивлением базы, ухудшают позиции биполярных транзисторов, особенно в области высоких частот. Эти шумы грубо можно учесть совместно с дробовыми, увеличив $r_{ш}$ на величину $r_B C^2 / C_{\Sigma}^2$.

Для учета всех рассмотренных шумов выражения (1) и (2) можно преобразовать в соответствии с принятыми допущениями следующим образом:

$$\overline{i_{ш.л, пт}^2} = 4kT \Delta f \left(\frac{I_{ут. экв}}{2\Phi_T} + \frac{1}{R} + \frac{r_{ш}}{R^2} + \frac{\omega_B^2 C_{\Sigma}^2 r_{ш}}{3} \right) + \Phi \left(\frac{\ln(f_B / f_H)}{R^2} + \frac{\omega_B^2 C_{\Sigma}^2}{2} \right);$$

$$\overline{i_{ш.бт}^2} = 4kT \Delta f \left\{ \frac{I_{к0}}{2\Phi_T} + \frac{1}{R} + (r_B + r_{Э. опт}) \left(\frac{1}{R^2} + \frac{\omega_B^2 C_{\Sigma}^2}{3} \right) \right\},$$

где $r_{Э. опт} = \Phi_T / I_{Э. опт}$ (см. (3)).

Сложная противозумовая коррекция улучшает отношение сигнал/шум по сравнению с простой на 30—70 %, что практически не меняет соотношения шумовых свойств рассмотренных активных элементов.

Итак, полученные оригинальные соотношения (для критических значений полос пропускания) позволяют сравнить шумовые характеристики активных элементов при выборе наиболее подходящего для видеоусилителя. Показано, что в малошумящих видеоусилителях, используемых в телевизионных датчиках, биполярный транзистор — самый неподходящий активный элемент для первого каскада (по сравнению с лампой и полевым транзистором).

Лампы и полевые транзисторы по шумовым свойствам в среднем одинаковы, но лучшие типы полевых транзисторов превосходят лампы.

В заключение стоит отметить, что исходные шумовые эквивалентные схемы и расчеты с их использованием довольно широко применялись в теоретических и экспериментальных исследованиях, в том числе при разработке малошумящего видеоусилителя для телевизионного канала аппаратуры оптико-электронного комплекса „Окно“ [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустынский И. Н., Масленников В. Н. Видеоусилители на полевых транзисторах: Учеб. пособие. Томск: В-Спектр, 2007. 64 с.
2. Масленников В. Н. Представление шумов биполярного транзистора. М., 1973. Деп. в ЦНИИ „Электроника“. № 1867/73.
3. Пустынский И. Н. Транзисторные видеоусилители. М.: Сов. радио, 1973. 176 с.
4. Масленников В. Н. Чувствительность камерного видеоусилителя с несколькими активными элементами на входе // Тез. докл. науч.-техн. семинара молодых ученых по приемно-усилительной технике. М.: НТОРЭиС им. А. С. Попова, 1972. С. 30—33.
5. Полевые транзисторы. Физика, технология и применение / Пер. с англ.; Под ред. С. А. Майорова. М.: Сов. радио, 1971. 376 с.
6. Электровакуумные приборы. Приемно-усилительные лампы: Справочник. М., 1967. Т. II—V.
7. Александров В. С., Прянишников В. А. Приборы для измерения малых напряжений и токов. М.: Энергия, 1971. 184 с.
8. Верешкин А. Е. Телевизионная аппаратура оптико-электронного комплекса „Окно“ // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2006. Вып. 1. С. 93—102.

Сведения об авторе

Виктор Николаевич Масленников — канд. техн. наук, доцент; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, кафедра телевидения и управления; E-mail: vnmas@main.tusur.ru

Рекомендована кафедрой
телевидения и управления

Поступила в редакцию
14.04.10 г.