

УДК 621.373.5

ТЕХНИЧЕСКИЕ ФЛУКТУАЦИИ В ГЕНЕРАТОРЕ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ТРИОДЕ

А. В. Якимов

Рассматривается влияние технических флуктуаций коллекторной емкости и коэффициента усиления полупроводникового триода (ППТ) на спектры флуктуаций амплитуды и частоты автогенератора на ППТ.

Во всяком реальном полупроводниковом триоде (ППТ) существуют медленные флуктуации параметров, носящие в большинстве случаев фликкерный характер. Они могут быть первичными, возникающими внутри самого триода, или вторичными, вызванными наличием флуктуаций внешних факторов: питающих напряжений, температуры прибора и т. п.

Известно, что флуктуации параметров ППТ являются основной причиной ухудшения стабильности реальных транзисторных генераторов. Тем не менее, в литературе отсутствуют какие-либо теоретические рассмотрения технических флуктуаций в генераторах на ППТ.

В настоящей статье изучается влияние флуктуаций коэффициента усиления и емкости коллекторного перехода триода на флуктуации амплитуды и частоты колебаний в транзисторном генераторе.

1. ФЛУКТУАЦИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассмотрим простейший генератор на ППТ, схема которого изображена на рис. 1, и обозначим через ω_1 и Q собственную частоту и добротность контура. Смысл остальных обозначений понятен из рисунка.

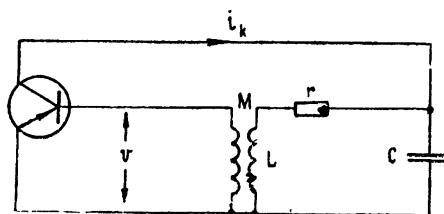


Рис. 1.

Будем предполагать, что рассматриваемый генератор является почти томсоновским [1], а период возможных автоколебаний в нем много больше времени пролета носителей через ППТ. В этом случае (при выполнении условия самовозбуждения [1]) в генераторе имеет место режим устойчивых гармонических колебаний

$$v = R \cos \psi, \quad \dot{v} = -\omega_1 R \sin \psi, \quad \psi = \omega_1 t + \vartheta.$$

Предположим, что коэффициент усиления ППТ и полная емкость колебательного контура испытывают медленные (по сравнению с $\cos \psi$) флуктуации

$$\alpha = \alpha_0 [1 + \delta\alpha(t)], \quad C = C_0 [1 + \delta C(t)],$$

достаточно малые, чтобы не вызвать качественного изменения режима работы генератора. Естественно также предположить, что флуктуации $\delta\alpha(t)$ и $\delta C(t)$ обладают нормальным вероятностным распределением.

Наличие флуктуаций параметров схемы приведет к появлению флуктуаций амплитуды $\varepsilon(t)$ и фазы $\varphi(t)$. Таким образом, имеем

$$R = R(t) = R_0 [1 + \varepsilon(t)], \quad \vartheta = \vartheta(t) = \vartheta_0 + \varphi(t).$$

Используя метод, развитый в [2], получаем флуктуационные уравнения

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= -p\varepsilon + \frac{\omega_1}{2Q} [s(R_0)\delta\alpha - \delta C], \\ \dot{\nu} = \dot{\varphi} &= -\frac{\omega_1}{2}\delta C + \frac{1}{2Q}s(R_0)\delta\alpha, \end{aligned} \quad (1)$$

где p — прочность предельного цикла, $\nu = \nu(t)$ — флуктуации частоты, $s(R)$ — безразмерная крутизна по флуктуационной компоненте коллекторного тока.

Смысл величины $s(R)$ можно понять, записав выражение для амплитуды первой гармоники коллекторного тока (в случае медленных флуктуаций $\alpha(t) = \alpha_0[1 + \delta\alpha(t)]$) в виде

$$i_{k1}(R, t) = RS_1(R) [1 + s(R)\delta\alpha(t)].$$

Здесь $S_1(R)$ — средняя крутизна ППТ по коллекторному току;

$$s(R) = \frac{\alpha_0 S_1(0)}{S_1(R)} I_1\left(\frac{R}{v_T}\right), \quad v_T = \frac{kT}{q_e},$$

где k , T и q_e — постоянная Больцмана, абсолютная температура и заряд электрона; $I_1(x)$ — модифицированная функция Бесселя первого порядка*.

Таким образом, $s(R_0)$ характеризует «восприимчивость» амплитуды автоколебания к флуктуациям $\delta\alpha$. Заметим, что обычно $s(R_0) > 1$ при $R_0 > 1,5 v_T$.

2. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОКОЛЕБАНИЯ

Будем считать спектральные плотности относительных флуктуаций коэффициента усиления и емкости $S_{\delta\alpha}(\Omega)$, $S_{\delta C}(\Omega)$, $S_{\delta\alpha\delta C}^0(\Omega)$ заданными (здесь ноль и единица указывают на четную и нечетную компоненты). Из (1) найдем спектральные плотности флуктуаций амплитуды и частоты автоколебания:

$$\begin{aligned} S_\varepsilon(\Omega) &= \frac{1}{p^2 + \Omega^2} \frac{\omega_1^2}{4Q^2} [s^2(R_0)S_{\delta\alpha}(\Omega) + S_{\delta C}(\Omega) - 2s(R_0)S_{\delta\alpha\delta C}^0(\Omega)], \\ S_\nu(\Omega) &= \frac{\omega_1^2}{4} \left[S_{\delta C}(\Omega) + \frac{\Omega^2}{\omega_1^2} \frac{s^2(R_0)}{Q^2} S_{\delta\alpha}(\Omega) + 2\frac{\Omega}{\omega_1} \frac{s(R_0)}{Q} S_{\delta\alpha\delta C}^0(\Omega) \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

* Выражение для $s(R)$ получено при описании вольтамперных характеристик ППТ уравнениями Молла [1]. Применимость этих уравнений ограничивается требованием низкого уровня инжекций. Можно показать, что в нашем случае это требование выполняется при $R_0 \leq 12 v_T$.

Теперь легко видеть, что по отношению к флуктуациям контурной емкости транзисторный генератор ничем не отличается от лампового (см., например, [2]).

Флуктуации коэффициента усиления ППТ в отличие от флуктуаций крутизны в ламповом генераторе довольно сильно влияют на частоту автоколебаний. В том случае, если флуктуации α носят фликкерный характер и их спектральная плотность равна

$$S_{\delta\alpha}(\Omega) = A_\alpha \Omega^{-\gamma}, \quad (3)$$

то при $\gamma > 1$ флуктуации коэффициента усиления приведут к уширению спектральной линии колебания (см. [2], § 6.6). Ширина спектральной линии в этом случае равна

$$\Delta\Omega = \frac{\pi(\gamma - 1)}{\Gamma[(\gamma - 1)^{-1}]} \left\{ \frac{s^2(R_0)}{Q^2} \frac{\pi A_\alpha}{4\Gamma(\gamma) \sin[\pi(\gamma - 1)/2]} \right\}^{(\gamma - 1)^{-1}},$$

где $\Gamma(x)$ — гамма-функция.

Выберем определенные значения спектральных плотностей $S_{i\alpha}(\Omega)$ и $S_{\delta C}(\Omega)$. В отношении спектра флуктуаций α можно воспользоваться результатами работы [3], где приведены данные измерения низкочастотных флуктуаций коэффициента усиления ППТ. Показано, что эти флуктуации носят фликкерный характер, их спектральная плотность подчиняется закону (3), где $A_\alpha \sim 10^{-14}$, $\gamma \simeq 1$.

Предположим, что флуктуации полной емкости контура C вызваны флуктуациями емкости коллекторной емкости триода C_k , входящей в величину C . В настоящее время, к сожалению, нет никаких экспериментальных данных о флуктуациях коллекторной емкости ППТ. Будем считать, что и фликкерные флуктуации коэффициента усиления $\delta\alpha$ и фликкерные флуктуации коллекторной емкости δC_k связаны с флуктуациями числа носителей в ППТ.

Для определенности рассмотрим транзистор $p-n-p$ типа. Можно показать [4], что коэффициент усиления α и емкость коллекторного перехода C_k сильно зависят от плотности основных носителей в базе n_b и почти не зависят от плотностей в коллекторной и эмиттерной областях p_k и p_e (так как $n_b \ll p_e, p_k$). С другой стороны, ввиду малости n_b относительные флуктуации плотности числа носителей в базовой области $\delta n_b(t)$ могут быть много больше $\delta p_e(t)$ и $\delta p_k(t)$ [5].

Таким образом, можно предположить, что для фликкерных флуктуаций выполняются соотношения

$$\delta\alpha(t) = \frac{1}{2\beta_0} \delta n_b(t), \quad \delta C_k(t) = \frac{1}{2} \delta n_b(t), \quad \beta_0 = \frac{\sigma_0}{1 - \alpha_0}$$

или

$$\delta C_k(t) = \beta_0 \delta\alpha(t).$$

В этом случае система (2) примет вид

$$S_e(\Omega) = \frac{1}{p^2 + \Omega^2} \frac{\omega_1^2}{4Q^2} \left[s(R_0) - \frac{C_k}{C_0} \beta_0 \right]^2 S_{i\alpha}(\Omega), \quad (4)$$

$$S_v(\Omega) = \frac{\omega_1^2}{4} \left[\left(\frac{C_k}{C_0} \beta_0 \right)^2 + \frac{\Omega^2}{\omega_1^2} \frac{s^2(R_0)}{Q^2} \right] S_{i\alpha}(\Omega).$$

Отсюда видно, что мощность относительных амплитудных флуктуаций сильно зависит от R_0 и достигает минимума при $s(R_0) = \beta_0 C_k / C_0$, т. е. при $R_0 = (3 \div 6) v_T$.

Спектр флуктуаций частоты изображен на рис. 2. Здесь $\Omega_0 = \omega_1 (\beta_0 C_k / C_0) [Q/s(R_0)] \sqrt{\gamma(2-\gamma)}$. На низких частотах, много меньших Ω_0 , $S_v(\Omega)$ имеет фликкерный характер, как и в случае лампового генератора. При $\Omega > \Omega_0$ $S_v(\Omega)$ начинает расти (при $\gamma < 2$) как Ω^2 .

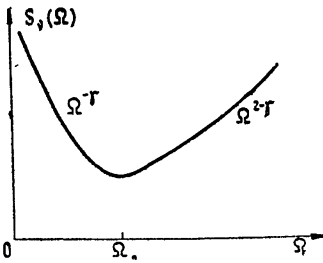


Рис. 2.

Низкочастотная часть $S_v(\Omega)$ определяет форму и ширину пика спектральной линии генератора, а высокочастотная дает вклад в шумовой пьедестал вокруг пика. Отметим, что наличие в $S_v(\Omega)$ компоненты $\Omega^{2-\gamma}$ обнаружено экспериментально [6, 7] при работе генератора в режиме сильной регенерации.

Поскольку обычно $\gamma \approx 1$,

$$S_{\delta\alpha}(\Omega) = \frac{A_\alpha \Omega_n}{\Omega(\Omega + \Omega_n)}$$

(здесь Ω_n — частота перегиба).

Из (4) можно найти дисперсию амплитудных флуктуаций $\langle \varepsilon^2 \rangle$ и ширину спектральной линии $\Delta\Omega$, которые зависят от времени τ , прошедшего с момента «привязки» генератора (при $t_0 \leq \tau \leq t_1$):

$$\langle \varepsilon^2 \rangle_\tau = \frac{\omega_1^2}{4} \left[\frac{s(R_0) - \beta_0 C_k / C_0}{pQ} \right]^2 A_\alpha \ln \Omega_n \tau,$$

$$\delta f(\tau) = \frac{\Delta\Omega(\tau)}{\omega_1} = \beta_0 \frac{C_k}{C_0} \sqrt{2\pi A_\alpha \ln \Omega_n \tau}.$$

Здесь t_0 является временем формирования доплеровского пика и определяется из неравенства $\ln \Omega_n t_0 \gg 1$. Наличие верхнего предела t_1 обусловлено нестационарностью флуктуаций амплитуды. Как известно, применяемый выше метод справедлив лишь при условии малости амплитудных флуктуаций, т. е. при $\langle \varepsilon^2 \rangle_\tau \ll 1$. Тем самым, под t_1 понимается время, в течение которого дисперсия амплитудных флуктуаций все еще остается много меньшей единицы.

Форма спектральной линии колебания имеет вид

$$W(\tau, \Omega) = \frac{R_0^2}{2} \left\{ \frac{\exp[-\pi\Omega^2/\Delta\Omega(\tau)]}{\Delta\Omega(\tau)} + \frac{[\omega_1 s(R_0)/2Q]^2 A_\alpha \Omega_n}{(p^2 + \Omega^2)(\Omega + \Omega_n)\Omega} \right\}$$

и представляет пик гауссовой формы (шириной $\Delta\Omega(\tau)$) и симметричный пьедестал.

Проведем численные оценки дисперсии амплитудных флуктуаций и ширины спектральной линии, взяв конкретный генератор с параметрами $R_0 = 0,2$ в; $S_0 = 0,1$ а · с⁻¹; $\omega_1/2\pi = 10^4$ гц; $p/2\pi = 10$ гц; $\beta_0 = 10^2$; $Q = 10^2$; $C_0 = \beta_0 C_k$; $\gamma = 1$; $A_\alpha = 10^{-14}$; $\Omega_n/2\pi = 10^3$ гц [8]. В этом случае $s(R_0) \approx 10^3$, $\Omega_0/2\pi = 10^3$ гц, $t_0 \approx 10$ сек, а $\langle \varepsilon^2 \rangle_\tau$ и $\delta f(\tau)$, как и в случае лампового генератора, являются очень медленными функциями τ и по порядку величины равны $\langle \varepsilon^2 \rangle \approx 10^{-5}$; $\delta f \approx 3 \cdot 10^{-6}$ при 10 сек $< \tau < 30$ лет.

Из всего вышесказанного следует, что основная разница между транзисторными и ламповыми генераторами заключается не в виде флуктуационных уравнений (1), а в значении параметра $s(R)$. Для лампы $s(R_0) \equiv 1$, а для транзисторного генератора $s(R)$ может принимать значения порядка 10^3 . Заметим также, что для лампового генератора $\Omega_0 > \omega_1$, таким образом, о компоненте $\Omega^{2-\gamma}$ в $S_v(\Omega)$ говорить не

имеет смысла в силу ее малости. В транзисторном же генераторе частота Ω_0 может оказаться достаточно близкой к нулю (поскольку $\Omega_0 \sim s^{-1}(R_0)$). В этом случае компонентой $\Omega^{2-\gamma}$ в спектре $S_s(\Omega)$ пренебрегать нельзя.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность А. Н. Малахову, И. М. Клибановой и М. Е. Герценштейну за проявленный интерес к настоящей работе и ценные замечания, сделанные при просмотре рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Малахов, А. В. Якимов, Радиотехника и электроника, 13, № 8, 1460 (1968)
2. А. Н. Малахов, Флуктуации в автоколебательных системах, изд. Наука, М., 1968, гл. 4, 6
3. Е. А. Здорнова, А. Н. Малахов, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, 8, № 4, 828 (1965).
4. Р. Нанавати, Введение в полупроводниковую электронику, изд. Связь, М., 1965, гл. 3, 7.
5. Шумы в электронных приборах, изд. Энергия, М., 1964, гл. 6, 7
6. В. Е. Ямный, Исследование флуктуаций частоты и амплитуды высокостабильных кварцевых автогенераторов на транзисторах, Диссертация, ЛПИ, Ленинград, 1967.
7. W. R. Attkinson, L. Fey, J. Newman, PIEEE, 51, № 2, 379 (1963).
8. L. Bess, L. S. Kisner, J. Appl. Phys., 37, № 9, 3458 (1966).

Горьковский государственный
университет

Поступила в редакцию
22 апреля 1968 г.

TECHNICAL FLUCTUATIONS IN TRANSISTOR GENERATOR

A. V. Yakimov

The author considers the effect of the collector capacity fluctuations and that of the current amplification factor on the spectra of amplitude and frequency fluctuations of the transistor auto-oscillator.
