

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 3 — 1973

УДК 621.375.93

А. А. БЕЛОВ, А. И. ГОРКОВЕНКО

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ И ШУМОВЫХ СВОЙСТВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВИДЕОУСИЛИТЕЛЯ С БИГАРМОНИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ

В работе теоретически и экспериментально исследуются стабильность и шумовые характеристики параметрического видеоусилителя с бигармонической накачкой. Показано, что он отличается существенно лучшей стабильностью, чем усилитель, использующий для повышения усиления нелинейный резонанс, и может обладать хорошими шумовыми характеристиками.

Положительным качеством параметрических видеоусилителей, использующих явление слабого резонанса, считается то, что у них сочетаются такие важные для практики качества, как высокое входное сопротивление и большой коэффициент усиления [1, 2]. Увеличение коэффициента усиления в этих усилителях достигается за счет использования двух напряжений накачки — первой и второй гармоник. Исследование частотных характеристик и входного сопротивления таких усилителей приведено в работах [1, 2]. В настоящей работе проведено исследование стабильности таких усилителей и их шумовых характеристик.

### Исследование стабильности усилителя

Выражения для коэффициента усиления по напряжению  $K(\Omega)$  и вносимого усилителем сдвига фаз  $\varphi(\Omega)$ , полученные в работе [1], имеют вид

$$K(\Omega) = k_g \frac{m_1 \sqrt{\Omega^2 + \left(\vartheta - \frac{m_2}{2} \sin \psi\right)^2}}{\sqrt{\left(\vartheta^2 - \Omega^2 + \xi^2 - \frac{m_2^2}{4}\right)^2 + 4\Omega^2\vartheta^2}}, \quad (1)$$

$$\varphi(\Omega) = \arctg \frac{\Omega}{\vartheta + \frac{m_2}{2} \sin \psi} - \arctg \frac{2\Omega\vartheta}{\vartheta^2 - \Omega^2 - \frac{m_2^2}{4} + \xi^2}. \quad (2)$$

Здесь  $K_g$  — коэффициент передачи фазового демодулятора (будем считать его постоянным и равным единице),  $\Omega$  — частота сигнала, относенная к частоте накачки;  $m_1$  и  $m_2$  — коэффициенты модуляции емко-

сти колебательного контура усилителя с частотами первой и второй гармоник накачки;  $\vartheta$  — величина, определяющая добротность  $Q$  колебательного контура усилителя  $2\vartheta = \frac{G}{\omega_H c_0} = \frac{1}{Q}$ ;  $G$  — проводимость потерь колебательного контура,  $c_0$  — емкость колебательного контура, определяемая в основном емкостью параметрических диодов;  $\omega_H$  — частота первой гармоники накачки,  $\omega_H \approx \omega_0$ ,  $\omega_0$  — собственная частота колебательного контура;  $\xi$  — расстройка;  $\xi = \frac{\omega_H - \omega_0}{\omega_0}$ ;  $\psi$  — сдвиг фаз между первой и второй гармониками накачки в спектре нелинейной емкости параметрического диода.

Чувствительность какого-либо параметра усилителя  $P$  по отношению к изменению какой-либо величины  $\lambda$  (это может быть частота накачки, напряжение смещения и так далее) удобно характеризовать величиной

$$S_p^\lambda = \frac{\Delta P}{\Delta \lambda} \frac{\lambda}{P}. \quad (3)$$

В нашем случае величины  $\Delta k(\Omega)$  и  $\Delta \varphi(\Omega)$  можно определить по общей формуле

$$\Delta P = \left( \frac{\partial p}{\partial m_1} \frac{\partial m_1}{\partial \lambda} + \frac{\partial p}{\partial m_2} \frac{\partial m_2}{\partial \lambda} + \frac{\partial p}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial \lambda} + \frac{\partial p}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial \lambda} + \frac{\partial p}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial \lambda} \right) \Delta \lambda. \quad (4)$$

Входящие в это выражение величины  $\frac{\partial m}{\partial \lambda}$ ;  $\frac{\partial \vartheta}{\partial \lambda}$ ;  $\frac{\partial \xi}{\partial \lambda}$  хорошо известны. Они определены в работах, анализирующих стабильность других типов параметрических усилителей [3, 4]. Специфика рассматриваемого усилителя заключается в использовании двух напряжений накачки, в связи с чем в (4) имеется дополнительный член  $\frac{\partial p}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial \lambda}$ . При идеальной настройке усилителя [1, 2]:

$$\xi = 0; \quad \psi = -\frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Поэтому из (1) и (2) следует, что

$$\left. \frac{\partial k(\Omega)}{\partial \psi} \right|_{\psi = -\frac{\pi}{2}} = 0; \quad \left. \frac{\partial \varphi(\Omega)}{\partial \psi} \right|_{\psi = -\frac{\pi}{2}} = 0,$$

т. е. коэффициент усиления и вносимый усилителем сдвиг фаз не чувствительны к малым изменениям сдвига фаз между гармониками накачки. Таким образом, для расчета нестабильности характеристик усилителя нужно определить остающиеся производные в (4). Для них с помощью (1) и (2) получим

$$\frac{\partial k(\Omega)}{\partial m_1} = \frac{k(\Omega)}{m_1},$$

$$\frac{\partial k(\Omega)}{\partial m_2} = \frac{k(\Omega)}{2 \left[ \Omega^2 + \left( \vartheta + \frac{m_2}{2} \right)^2 \right]} \left[ \vartheta + \frac{m_2}{2} + \frac{m_2}{m_1^2} k^2(\Omega) \left( \vartheta^2 - \Omega^2 - \frac{m_2^2}{4} \right) \right],$$

$$\frac{\partial k(\Omega)}{\partial \vartheta} = \frac{k(\Omega)}{\Omega^2 + \left(\vartheta + \frac{m_2}{2}\right)^2} \left[ \vartheta + \frac{m_2}{2} + \frac{2\vartheta}{m_1^2} k^2(\Omega) \left( \vartheta^2 - \frac{m_2^2}{4} + \Omega^2 \right) \right], \quad (6)$$

$$\frac{\partial k(\Omega)}{\partial \xi} = 0,$$

$$\frac{\partial \varphi(\Omega)}{\partial m_1} = 0; \quad \frac{\partial \varphi(\Omega)}{\partial m_2} = \frac{\Omega}{2m_1^2} k^2(\Omega),$$

$$\frac{\partial \varphi(\Omega)}{\partial \vartheta} = -\frac{\Omega}{m_1^2} k^2(\Omega); \quad \frac{\partial \varphi(\Omega)}{\partial \xi} = 0.$$

Из этих соотношений видно, что характерной и ценной для практики особенностью рассматриваемого усилителя является отсутствие зависимости коэффициента усиления и вносимого фазового сдвига от расстройки колебательного контура, а следовательно, и от частоты генератора накачки при небольших изменениях этих величин от оптимальных значений (5). Это связано с тем, что в данном случае колебательный контур усилителя настроен в резонанс на частоту накачки и небольшие изменения расстройки в первом приближении не изменяют амплитуду накачки. Заметим, что в параметрических видеоусилителях, используемых для увеличения усиления нелинейный резонанс, чувствительность коэффициента усиления и вносимого фазового сдвига к частоте накачки проявляется сильнее всего и на порядок превышает чувствительность по отношению к другим дестабилизирующим факторам [4].

Соотношения (3), (4), (6) совместно с известными величинами  $\frac{\partial m}{\partial \lambda}$ ;  $\frac{\partial \vartheta}{\partial \lambda}$ ;  $\frac{\partial \xi}{\partial \lambda}$  позволяют рассчитывать нестабильность частотных характеристик рассматриваемого усилителя. Однако в общем случае при произвольных частотах сигнала и амплитудах накачки расчеты приводят к громоздким выкладкам. В тех случаях, когда амплитуды напряжений накачки не слишком велики и частота сигнала близка к нулю (коэффициент усиления максимален), для чувствительности коэффициента усиления к изменению основных дестабилизирующих факторов из (3) и (6) можно получить

$$S_k^{\omega_H} = 0; \quad S_k^{A_1} = 1; \quad S_k^{A_2} = \frac{k(\Omega)}{k_0}; \quad S_k^{U_0} = 1 + \frac{3k(\Omega)}{2k_0}. \quad (7)$$

Здесь  $A_1$  — амплитуда первой гармоники накачки;  $A_2$  — амплитуда второй гармоники накачки;  $K_0 = 2Qm_1$  — значение коэффициента усиления при отсутствии напряжения второй гармоники накачки (т. е. без дополнительной регенерации);  $U_0$  — напряжение смещения.

Из полученных соотношений видно, что величина коэффициента усиления наиболее чувствительна к изменениям напряжения смещения и амплитуды второй гармоники накачки, причем нестабильность по этим параметрам растет прямо пропорционально выигрышу в коэффициенте усиления за счет регенерации.

В первой графе таблицы приведены значения чувствительностей коэффициента усиления, рассчитанные по (6) при условии, что регенерация за счет второй гармоники накачки увеличивает коэффициент усиления в 10 раз, т. е.  $K(\Omega)/K_0 = 10$ . Во второй графе таблицы приведены значения тех же чувствительностей, измеренные экспериментально при  $K_0 = 7$ ,  $K(\Omega) = 70$ . В третьей графе таблицы приведены значения чувствительностей коэффициента усиления параметрического видеоусилителя

ля, в котором для повышения коэффициента усиления используется нелинейный резонанс. Эти результаты приведены в [4], они получены при  $K(\Omega) = 7$ .

И источник	$S_k^A$	$S_k^{\omega}$	$S_k^{A_1}$	$S_k^{A_2}$	$S_k^{U_0}$
Расчет		0	1	10	16
Эксперимент		<0,5	1,7	14	20
Работа [4]		280	15	—	30

Из данных таблицы следует, что теоретические расчеты неустойчивости рассматриваемого усилителя хорошо согласуются с экспериментом. Кроме того, рассматриваемый усилитель по сравнению с усилителем, использующим нелинейный резонанс, обладает значительно лучшей стабильностью даже в том случае, когда его усиление на порядок выше.

### Исследование коэффициента шума

Расчет дифференциального коэффициента шума по стандартной методике [3] с использованием результатов работы [2] дает

$$F_{\partial} = 1 + \frac{g_d + g_n}{g_i} + \frac{(g_c^2 + b_c^2)(1 + m_2^2 Q^2 + 4Q^2 \Omega^2) + 2\Omega^2 m_1^4 G^2 Q^4}{g_i G [4Q^2 \Omega^2 + (1 - m_2 Q)^2] m_1^2 Q^2}. \quad (8)$$

Здесь  $g_d$  — активная проводимость параметрических диодов;  $g_i$  — активная составляющая выходной проводимости генератора сигнала;  $g_n$  — паразитная активная проводимость входных цепей усилителя;  $g_c$  — полная активная проводимость на частоте сигнала на входе усилителя  $g_c = g_d + g_i + g_n$ ,  $b_c$  — реактивная составляющая проводимости на входе усилителя на частоте сигнала. Выражение (8) получено в предположении, что единственным источником шумов являются активные сопротивления, причем все элементы усилителя и выходное сопротивление генератора сигнала имеют одинаковую температуру.

Из выражения (8) видно, что для того, чтобы коэффициент шума был существенно меньше 3 дБ, должно выполняться равенство

$$\frac{g_d + g_n}{g_i} \ll 1, \quad (9)$$

т. е. выходная проводимость генератора сигнала должна быть много больше, чем активная составляющая проводимости на входе усилителя. Наиболее перспективным представляется применение параметрических видеоусилителей для усиления инфранизких и близких к ним частот [5]. Для частот сигнала  $\Omega \rightarrow 0$  из (8) с учетом (9), предполагая, что за счет регенерации усиление повышается примерно на порядок, получим:

$$F_{\partial} = 1 + 2 \frac{g_i^2 + b_c^2}{g_i G m_1^2 Q^2 (1 - m_2 Q)^2}. \quad (10)$$

Это выражение показывает, что, как и следовало ожидать, регенерация в усилителе ухудшает коэффициент шума. Для того чтобы ослабить влияние регенерации на коэффициент шума, нужно увеличивать добротность контура усилителя и глубину модуляции емкости усилителя с частотой первой гармоники накачки. Выражение (10) показывает также, что на величине коэффициента шума существенно сказывается и величина реактивной проводимости на входе усилителя, определяемая емкостями параметрических диодов и цепей частотных развязок. Для уменьшения коэффициента шума нужно использовать параметрические диоды с малой емкостью, а следовательно, и более высокочастотную накачку. Оценка коэффициента шума по формуле (10) при емкости параметрического диода  $c_0 = 20 \text{ пф}$ ,  $m_1 Q = 3$ ;  $m_2 Q = 0,9$ ; для частоты сигнала  $20 \text{ кГц}$ , при  $g_i \approx b_c \approx 10^{-2} \text{ Г}$ , дает  $F_{\partial} \approx 1,2$ . Измерение интегрального коэффициента шума в полосе частот  $40\text{--}100 \text{ кГц}$  при указанных величинах параметров схемы дало величину  $F_n \approx 1,7$ . Расхождение теоретического и экспериментального результатов, по-видимому, в значительной мере объясняется тем, что в расчете не учитывались шумы генератора накачки и отчасти различием величин интегрального и дифференциального коэффициентов шума.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белов А. А. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астроном., № 2, 31—37, 1969.
2. Белов А. А. «Радиотехника и электроника», 14, № 2, 294—298, 1969.
3. Эткин В. С., Гершензон Е. М. Параметрические системы СВЧ на полупроводниковых диодах. М., «Советское радио», 1964.
4. Шарков Е. А. «Радиотехника и электроника», 13, № 10, 1891—1893, 1968.
5. Госткин Б. К., Паленскис В. П. «Литовский физический сборник», 9, № 3, 555—564, 1969.

Поступила в редакцию  
15.6 1971 г.

Кафедра  
физики колебаний