

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1971

УДК 621.375.7

А. А. БЕЛОВ

СВЕРХРЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ВИДЕОУСИЛИТЕЛЬ

В работе рассмотрен сверхрегенеративный режим работы мостовой схемы параметрического видеоусилителя, использующего одно гармоническое напряжение накачки. Теоретически рассчитан коэффициент усиления и приведены результаты эксперимента.

Введение

Использование сверхрегенерации в усилителях высокой частоты, в том числе и в параметрических усилителях, позволяет эффективно преодолеть один из основных недостатков регенеративных усилителей — низкую стабильность. Представляется целесообразным использовать сверхрегенерацию и в параметрических усилителях видеосигналов типа «модулятор — демодулятор». Сверхрегенеративный режим работы такого усилителя может быть осуществлен различными способами. Можно, например, подавать в параметрический видеоусилитель специальное напряжение второй гармоники накачки, амплитуда которого модулируется с частотой суперизации, а фаза подбирается такой, чтобы комбинационные колебания сигнала и накачки с частотами $\omega_H \pm \omega_c$ (ω_H — частота накачки, ω_c — частота сигнала), получающиеся в реактивном модуляторе усилителя, эффективно усиливались за счет накачки на второй гармонике как в обычном синхронном сверхрегенеративном параметрическом усилителе [1]. Недостатком такого усилителя является конструктивная сложность, связанная с необходимостью иметь два напряжения накачки (первую и вторую гармоники), между которыми необходимо поддерживать определенные фазовые соотношения.

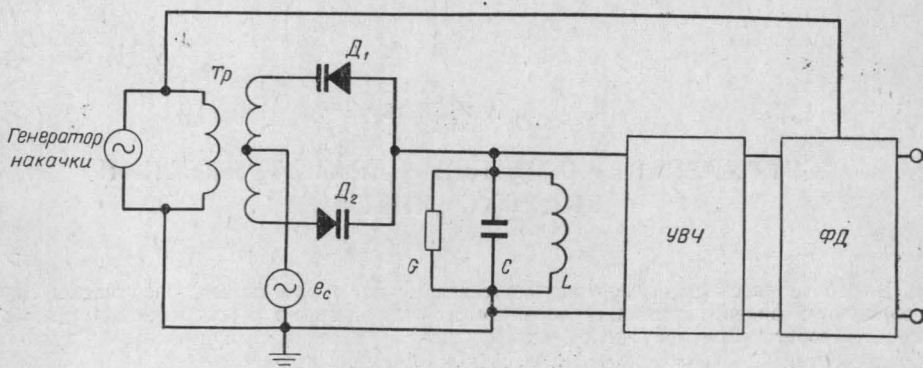
Можно реализовать сверхрегенеративный режим усиления видеосигналов на основе использования свойств нелинейного резонанса. В таком усилителе не требуется специальное напряжение второй гармоники накачки. Дополнительное усиление комбинационных колебаний $\omega_H \pm \omega_c$ в этом случае осуществляется за счет второй гармоники накачки в спектре пульсаций емкости параметрического диода. Этот усилитель конструктивно проще, но имеет другой недостаток, связанный с трудностями осуществления автоматической стабилизации режима работы усилителя по постоянному току, так как на выходе амплитудного

демодулятора такого усилителя имеется постоянное напряжение даже тогда, когда сигнал на входе усилителя отсутствует.

В данной работе дается анализ сверхрегенеративного режима в другой конструкции параметрического усилителя, позволяющей устранить перечисленные выше недостатки.

Схема усилителя

Анализируемый усилитель (см. рис.) представляет собой мост переменного тока на частоте накачки, образованный двумя половинами



вторичной обмотки высокочастотного трансформатора Tp и двумя параметрическими диодами D_1 и D_2 . Для упрощения чертежа на нем не показаны цепи смещения параметрических диодов. Напряжение накачки поступает на первичную обмотку трансформатора и через него попадает на одну диагональ моста (концы вторичной обмотки трансформатора). В другую диагональ моста включены источник напряжения усиливаемого видеосигнала e_c и колебательный контур G, L, C , настроенный на частоту, близкую к частоте накачки. В отсутствие сигнала мост сбалансирован. Параметрические диоды включены последовательно, поэтому напряжение сигнала изменяет их емкости в противоположные стороны. При этом изменяется величина разбаланса моста и на колебательном контуре появляется напряжение комбинационных колебаний. Это напряжение через усилитель высокой частоты (УВЧ) поступает на фазовый детектор (ФД). Опорным напряжением для фазового детектора служит напряжение накачки, сдвинутое по фазе на соответствующий угол. На выходе фазового детектора появляется усиленное напряжение видеосигнала.

Если мост сбалансирован, то постоянное напряжение на выходе фазового детектора в отсутствие сигнала на входе усилителя равно нулю. При наличии разбаланса моста на выходе фазового детектора появляется постоянное напряжение, полярность и величина которого определяются знаком и величиной разбаланса моста. Это напряжение можно использовать для автоматической стабилизации баланса моста.

Напряжение комбинационных колебаний с частотами $\omega_H \pm \omega_c$, появляющееся на колебательном контуре, может дополнительно регенеративно усиливаться в параметрическом усилителе за счет энергообмена с присутствующей в спектре емкости параметрического диода составляющей с частотой второй гармоники накачки. Величина этого дополнительного усиления зависит от величины коэффициента модуляции емкости параметрических диодов с частотой второй гармоники

накачки, который в свою очередь определяется амплитудой напряжения накачки. При достаточно высоком уровне напряжения накачки коэффициент модуляции емкости параметрического диода с частотой второй гармоники накачки может превысить порог параметрического возбуждения колебаний в контуре. Если амплитуду напряжения накачки изменять с частотой суперизации, например, по прямоугольному закону таким образом, чтобы при максимальном значении амплитуды порог возбуждения субгармоники был существенно перекрыт, а при минимальном значении амплитуды накачки возбужденные колебания успевали затухнуть, то комбинационные колебания будут усиливаться как в обычном одноконтурном сверхрегенеративном параметрическом усилителе.

Расчет коэффициента усиления

Расчет коэффициента усиления описанной схемы проведем методом медленно меняющихся амплитуд. Пусть напряжение накачки e_n на каждой из половины вторичной обмотки трансформатора Tr равно

$$e_n = \varepsilon \cos \omega_n t,$$

а высокочастотное напряжение на колебательном контуре равно u . Будем считать, что в отсутствие сигнала мост сбалансирован, а напряжение сигнала e_c достаточно мало, так что $u \ll \varepsilon$. Тогда можно считать, что емкость параметрических диодов изменяется только под действием напряжения накачки. Представим емкость параметрических диодов рядом:

$$C_g^i = C_0^i + 2C_1^i \cos \omega_n t + 2C_2^i \cos 2\omega_n t + \dots,$$

где индексы $i=1, 2$ соответствуют диодам D_1 и D_2 . Дифференциальное уравнение для напряжения u на колебательном контуре имеет вид

$$\frac{d^2}{dt^2} [(C + C_g^1 + C_g^2)(u + e_c)] + G \frac{du}{dt} + \frac{u}{L} = \frac{d}{dt} [(C_g^1 - C_g^2)] \frac{de_n}{dt}. \quad (1)$$

Здесь C и L — паразитная статическая емкость и индуктивность колебательного контура, а G — его проводимость потерь. Напряжение u будем искать в виде

$$u = a \sin \omega_n t + b \cos \omega_n t,$$

где a и b — медленно меняющиеся функции времени. Переходя к безразмерному времени $\tau = \omega_n t$ и вводя обозначения

$$\vartheta = \frac{G}{2\omega_n (c + c_0^1 + c_0^2)}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L(c + c_0^1 + c_0^2)}}; \quad \chi = \frac{c_3^1 - c_3^2}{c + c_0^1 + c_0^2};$$

$$c_3^i = c_0^i - c_2^i; \quad \xi = \frac{\omega_n - \omega_0}{\omega_n}; \quad m_1 = \frac{c_1^1 + c_1^2}{c + c_0^1 + c_0^2}; \quad m_2 = \frac{c_2^1 + c_2^2}{c + c_0^1 + c_0^2},$$

обычным путем получим укороченные уравнения:

$$\dot{a} = -\vartheta a + \xi b + \frac{m_2}{2} b - m_1 e_c,$$

$$b = -\vartheta b - \xi a + \frac{m_2}{2} a. \quad (2)$$

При наличии суперизации величины коэффициентов m_1 и m_2 периодически изменяются. Будем для простоты считать, что изменение этих коэффициентов происходит по прямоугольному закону с периодом, равным τ_0 , и скважностью, равной двум, причем минимальное значение коэффициента m_2 равно нулю. Будем считать так же, что скачкообразное изменение коэффициента m_2 от 0 до m_{20} происходит в момент времени $\tau=0$. Тогда процессы в колебательном контуре до и после скачка будут описываться уравнениями (1), (2) с условиями

$$m_1 = m_{1\min}; \quad m_2 = 0 \quad \text{для} \quad -\frac{\tau_0}{2} \leq \tau \leq 0,$$

$$m_1 = m_{1\max}; \quad m_2 = m_{20} \quad \text{для} \quad 0 \leq \tau \leq \frac{\tau_0}{2},$$

причем в момент скачка должно выполняться условие непрерывности решений и их первых производных по времени. Решение уравнений (1), (2) как до, так и после скачка коэффициентов m_1 и m_2 состоит из двух составляющих: собственных колебаний, возникающих в момент скачка, и вынужденных колебаний. Будем считать, что затухание колебательного контура и период суперизации достаточно велики, так что при $m_2=0$ собственные колебания успевают затухнуть к моменту времени $\tau=0$ и наложения всплеск возбуждающихся колебаний не происходит (некогерентный режим сверхрегенератора [2]). Тогда в общем решении уравнений (1), (2) при $m_2=0$ имеет смысл удерживать только ту составляющую, которая описывает вынужденные колебания. Амплитуду этой составляющей можно найти из (2). В результате, считая, что $\xi=0$ (контур настроен в резонанс на частоту накачки), получим

$$u = -\frac{e_c m_{1\min}}{\vartheta} \sin \tau \quad \text{для} \quad -\frac{\tau_0}{2} \leq \tau \leq 0. \quad (3)$$

Для $0 \leq \tau \leq \frac{\tau_0}{2}$ аналогично запишем

$$u = A_0 e^{\left(\frac{m_{20}}{2} - \vartheta\right) \tau} (\cos \tau + \sin \tau) + B_0 e^{\left(\frac{m_{20}}{2} + \vartheta\right) \tau} (\cos \tau - \sin \tau) + \frac{e_c m_{1\max}}{2\left(\vartheta^2 - \frac{m_{20}^2}{4}\right)} (-m_{20} \cos \tau - 2\vartheta \sin \tau). \quad (4)$$

Коэффициенты A_0 и B_0 определяются из условия непрерывности решений (3) и (4) и их первых производных при $\tau=0$. Они равны

$$A_0 = \frac{e_c}{2} \left(\frac{m_{1\max}}{\vartheta - \frac{m_{20}}{2}} - \frac{m_{1\min}}{\vartheta} \right), \quad (5)$$

$$B_0 = \frac{e_c}{2} \left(\frac{m_{1\min}}{\vartheta} - \frac{m_{1\max}}{\vartheta + \frac{m_{20}}{2}} \right).$$

Допустим, что величина коэффициента m_{20} достаточна для значительного перекрытия порога параметрического возбуждения колебаний. Будем считать также, что амплитуда колебаний во время всплески не дорастает до потолка, определяемого нелинейностями схемы. Тогда

в решении (4) можно отбросить все составляющие, кроме основного экспоненциально нарастающего члена, который и определяет усиление схемы. С учетом (5) этот член равен

$$u = \frac{e_c}{2} \left(\frac{m_{1\max}}{\vartheta - \frac{m_{20}}{2}} - \frac{m_{1\min}}{\vartheta} \right) e^{\left(\frac{m_{20}}{2} - \vartheta \right) \tau} (\cos \tau + \sin \tau). \quad (6)$$

Результат линейной демодуляции таких вспышек колебаний пропорционален среднему значению U амплитуды вспышки за период суперизации. Определяя коэффициент усиления по напряжению K соотношением

$$K = k_g \frac{U}{e_c},$$

где k_g — коэффициент передачи фазового демодулятора, с помощью соотношения (6) получим

$$K = k_g \frac{m_{20}}{2\sqrt{2} \tau_0 \vartheta \left(\frac{m_{20}}{2} - \vartheta \right)} \left(\frac{m_{1\max}}{\frac{m_{20}}{2} - \vartheta} + \frac{m_{1\min}}{\vartheta} \right) e^{\left(\frac{m_{20}}{2} - \vartheta \right) \frac{\tau_0}{2}}. \quad (7)$$

Расчет величины коэффициента усиления по формуле (7) при условии, что $k_g \approx 1$, $\frac{m_{1\max}}{\frac{m_{20}}{2} - \vartheta} \approx 3$, $\frac{m_{20}}{2\vartheta} \approx 1,5$, $m_{1\max} \gg m_{1\min}$, а $\left(\frac{m_{20}}{2} - \vartheta \right) \times \frac{\tau_0}{2} \approx 10$, дает $K \approx 1600$.

Экспериментальное исследование сверхрегенеративного режима описанного усилителя проводилось на макете усилителя с накачкой в радиодиапазоне $f_H \approx 1$ мГц. Амплитуда накачки изменялась по прямоугольному закону с частотой суперизации $f \approx 1$ кГц. На выходе усилителя после фазового демодулятора включался фильтр низких частот, не пропускающий частоту суперизации и все более высокие частоты. Экспериментально было получено стабильное значение коэффициента усиления по напряжению $K \approx 1000$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов А. А. «Радиотехника и электроника», № 10, 1816—1821, 1971.
2. Гуткин Л. С. «Радиотехника», 1, 40—62, 1946.

Поступила в редакцию
2.9 1970 г.

Кафедра
физики колебаний