

УДК 621.375.7

А. А. БЕЛОВ, Ю. И. ЧЕРНЯТИН

## СВЕРХРЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ВИДЕОУСИЛИТЕЛЬ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ НЕЛИНЕЙНЫЙ РЕЗОНАНС

В работе рассмотрен сверхрегенеративный режим работы параметрического видеоусилителя, использующего нелинейный резонанс. Рассчитан коэффициент усиления сверхрегенеративного видеоусилителя и приведены результаты эксперимента.

В «резонаторных» параметрических видеоусилителях типа «модулятор — демодулятор» [1, 2] усиление видеосигналов происходит в результате модуляции амплитуды вынужденных колебаний накачки в резонансном контуре, настроенном на частоту, близкую к частоте накачки, при действии напряжения сигнала на емкость параметрических диодов, включенных в колебательный контур. Последующая демодуляция напряжения, снимаемого с колебательного контура, позволяет получить на выходе усилителя сигнал с той же частотой, что и на входе. Для того чтобы усиление при использовании амплитудной модуляции было наибольшим, частоту накачки выбирают так, чтобы она соответствовала наиболее крутому участку резонансной кривой. Вследствие нелинейности емкости параметрических диодов резонансная кривая колебательного контура несимметрична, она имеет наклон в область частот накачки меньших резонансной частоты колебательного контура. Поэтому крутизна левого склона резонансной кривой повышается, причем это повышение крутизны, а вместе с ним и повышение коэффициента усиления тем заметнее, чем больше амплитуда накачки. Это объясняется тем, что при повышении амплитуды накачки растет величина второй гармоники накачки в спектре емкости параметрических диодов, что приводит к дополнительной параметрической регенерации комбинационных колебаний сигнала и накачки. Однако чрезмерное увеличение амплитуды накачки приводит к тому, что у резонансной кривой появляется неоднозначный участок (см. рис. 1). При этом, с одной стороны, появляется возможность получения сколь угодно большого усиления, так как у неоднозначной резонансной кривой имеются участки с бесконечной крутизной, с другой стороны, как и в любых регенеративных усилителях, получение больших коэффициентов усиления чрезвычайно затруднено из-за усиливающегося влияния различного рода нестабильностей. Существенное повышение коэффициента усиления при сохранении высокой

стабильности можно получить, используя сверхрегенеративный режим усиления видеосигналов.

В данной работе дается анализ сверхрегенеративного режима в параметрических видеосуилителях, использующих нелинейный резонанс.

### Сверхрегенеративный режим работы видеосуилителя

Как известно, средняя ветвь неоднозначного участка резонансной кривой (рис. 1) неустойчива. Так, если состояние системы в какой-то момент времени соответствует точке 1 на рис. 1, то система не может долго находиться в этом состоянии и при наличии флуктуаций неизбежно перейдет либо в состояние 0, либо в состояние 2 (см. рис. 1). Если систему принудительно периодически переводить в состояние 1, а затем давать ей возможность самостоятельно переходить под действием флуктуаций в состояние 0 или 2, то в среднем за большой промежуток времени система одинаковое число раз будет переходить как в состояние 0, так и в состояние 2. Поэтому среднее значение амплитуды колебаний в контуре, определяемое за достаточно большой промежуток времени, будет постоянным и примерно равным амплитуде в состоянии 1. Но если принудительный перевод системы в состояние 1 будет совершаться с некоторой ошибкой, в результате которой к моменту предоставления системе самостоятельности амплитуда в контуре будет на небольшую величину  $\Delta A$  отличаться от значения амплитуды, определяемого неустойчивой частью резонансной кривой при той же расстройке, то дальнейшее поведение системы будет уже однозначно определено знаком  $\Delta A$ . При  $\Delta A > 0$  система перейдет в состояние 2, при  $\Delta A < 0$  система окажется в состоянии 0. Если ошибка  $\Delta A$  в свою очередь будет определяться напряжением сигнала  $u_c$ , т. е.

$$\Delta A = p \cdot u_c, \quad (1)$$

где  $p$  — некоторый коэффициент пропорциональности, то новое состояние (0 или 2), в которое переходит система из состояния 1, будет определяться знаком сигнала. При этом длительность переходного процесса изменения амплитуды при переходе из состояния 1 в новое состояние 0 или 2, т. е. время пребывания системы в новом состоянии до следующего принудительного перевода в состояние 1, будет определяться величиной сигнала, по-

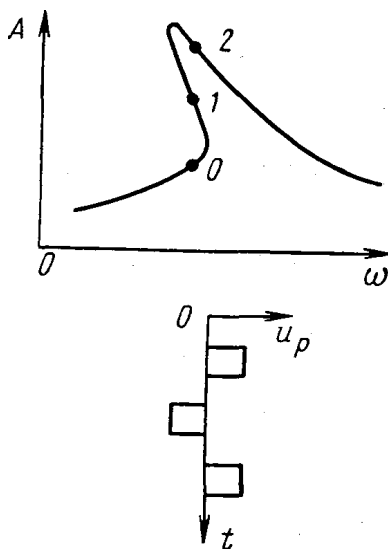


Рис. 1

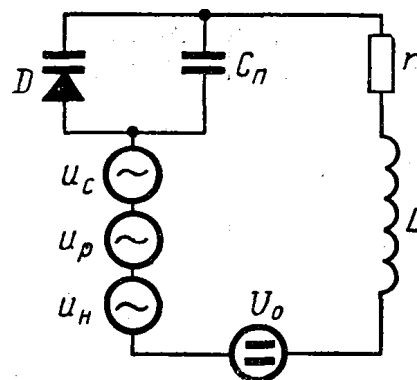


Рис. 2

скольку от величины ошибки  $\Delta A$  сильно зависит скорость переходного процесса в его начальной стадии. Поэтому при наличии сигнала и действии соотношения (1) среднее значение амплитуды напряжения на ко-

лебательном контуре будет изменяться в соответствии с сигналом. Это позволяет использовать описанные процессы для сверхгенеративного усиления видеосигналов.

Принудительное периодическое возвращение системы в состояние  $I$  можно осуществить путем соответствующей импульсной модуляции либо амплитуды накачки, либо напряжения смещения. В данном случае была выбрана последняя возможность. С этой целью в цепь смещения параметрического диода наряду с напряжением сигнала подавалось напряжение суперизации  $u_p$ , форма которого показана на рис. 1 внизу. Амплитуда импульсов напряжения суперизации выбиралась достаточно большой для того, чтобы вызвать переход системы с верхней устойчивой ветви резонансной кривой на нижнюю и наоборот. Однако длительность импульсов напряжения суперизации подбиралась такой, чтобы к моменту окончания импульса амплитуда колебаний в системе соответствовала состоянию  $I$ . Это с необходимой точностью осуществляется регулировкой амплитуды накачки и величины напряжения смещения. Если это требование выполнено в отсутствие сигнала, то малое напряжение сигнала, вызывая небольшую расстройку колебательного контура, будет приводить к небольшой ошибке  $\Delta A$  при выводе системы в состояние  $I$ ; причем при малом напряжении сигнала соотношение между  $\Delta A$  и  $u_c$  должно быть линейным.

### Расчет коэффициента усиления

Расчет коэффициента усиления проведем для схемы рис. 2. Здесь  $L$  и  $r$  — индуктивность и сопротивление потерь колебательного контура, емкость которого состоит из емкости параметрического диода  $D$  и паразитной статической емкости  $c_n$ . В колебательном контуре действуют источники напряжения накачки

$$u_n = U_n \cos \omega t,$$

напряжения сигнала  $u_c$ , напряжения суперизации  $u_p$  и напряжения смещения  $U_0$ . Будем предполагать, что напряжение суперизации имеет форму, показанную на рис. 1. Дифференциальное уравнение для напряжения  $u$  на емкости колебательного контура имеет вид

$$L \left[ C_n \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{d}{dt} \left( C_g \frac{du}{dt} \right) \right] + r (C_n + C_g) \frac{du}{dt} + u = U_n \cos \omega t. \quad (2)$$

Здесь  $C_g$  — дифференциальная емкость параметрического диода. Она периодически изменяется под действием напряжения накачки и, кроме того, зависит от напряжения сигнала и суперизации. Представим ее рядом

$$C_g = C_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos n(\omega t + \varphi).$$

Коэффициенты  $C_0$ ,  $C_n$  зависят от амплитуды накачки, а также от напряжений сигнала и суперизации. Кроме того, будем считать, что коэффициенты  $C_0$  и  $C_n$  удовлетворяют соотношению  $C_n \ll C_0$ . Предполагая, что добротность  $Q$  колебательного контура достаточно высока, будем искать решение уравнения (2) методом медленно меняющихся амплитуд в виде

$$u = A \cos(\omega t + \varphi). \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получим «укороченные» уравнения

$$\dot{a} = -\frac{1}{2Q} a - \frac{U_H}{2U_0} \sin \varphi, \quad (4)$$

$$\dot{\varphi} = -\frac{\xi}{2} - \frac{U_{H_1}}{2U_0 a} \cos \varphi,$$

где

$$a = \frac{A}{U_0}; \quad \xi = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0^2}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L(c_3 + c_{II})}}; \quad C_3 = C_0 - C_2.$$

Для исследования поведения системы после небольших отклонений амплитуды и фазы от их стационарных значений, определяемых резонансной кривой, необходимо перейти от «укороченных» уравнений (4) к линейным уравнениям для вариаций амплитуды  $\eta$  и фазы  $\beta$ . При этом нужно учитывать зависимость расстройки  $\xi$  от амплитуды напряжения накачки. Прodelывая необходимые выкладки с учетом результатов, полученных в [3], получим уравнения для вариаций

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= -\frac{1}{2Q} \eta + \frac{\xi}{2} \beta, \\ \dot{\beta} &= -\frac{1}{2Q} \beta - \eta \left( m_2 + \frac{\xi}{2} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $m_2 = \frac{c_2}{c_3 + c_{II}}$ . Из (5) находим закон изменения во времени небольших отклонений амплитуды от ее стационарного значения

$$\eta = b_1 e^{q_1 t} + b_2 e^{q_2 t}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} q_1 &= -\frac{1}{2Q} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{Q^2} - \left( \xi^2 + 2\xi m_2 + \frac{1}{Q^2} \right)}, \\ q_2 &= -\frac{1}{2Q} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{Q^2} - \left( \xi^2 + 2\xi m_2 + \frac{1}{Q^2} \right)}. \end{aligned}$$

Анализ выражений для  $q_1$  и  $q_2$  показывает, что на неустойчивой ветви резонансной кривой  $q_1 > 0$ ;  $q_2 < 0$ . Поэтому основной интерес в выражении (6) для нас представляет первое нарастающее слагаемое. Коэффициент  $b_1$  при этом слагаемом определяется из начальных значений вариации амплитуды  $\eta_0$  и ее скорости  $\dot{\eta}_0$ :

$$b_1 = \frac{\eta_0 - \dot{\eta}_0 q_2}{q_1 - q_2}. \quad (7)$$

Для того чтобы после окончания импульса суперирующего напряжения поведение системы определялось лишь теми ошибками выведения системы в состояние  $I$ , которые вызваны сигналом, необходимо, чтобы в отсутствие сигнала коэффициент  $b_1$  обращался в нуль в момент окончания импульса суперирующего напряжения. Из (7) следует, что для этого необходимо выполнение равенства

$$\eta_0 = \dot{\eta}_0 q_2. \quad (8)$$

Поскольку к моменту окончания импульса суперирующего напряжения, выводящего систему в состояние 1  $\eta_0 \neq 0$ , то из (8) следует, что в это время должно быть  $\eta_0 \neq 0$ , т. е. при конечной скорости переходного процесса изменения амплитуды колебаний состояние 1, в которое должна переводиться система, не лежит точно на резонансной кривой. Будем считать, что с помощью соответствующей настройки системы в отсутствие сигнала и шумов соотношение (8) удовлетворено. Тогда напряжения сигнала и шумов с изменением емкости параметрического диода и перестраиванием колебательного контура будут приводить к некоторому нарушению соотношения (8), в результате чего коэффициент  $b_1$  в выражении (6) будет отличен от нуля и пропорционален дополнительной расстройке колебательного контура, вызванной напряжениями сигнала и шума и пропорциональной этим напряжениям. В результате  $b_1 = p(u_c + u_{ш})$ , где  $u_{ш}$  — напряжение шума.

Используя полученные соотношения, можно определить коэффициент усиления по напряжению  $K$  такого усилителя, пользуясь методикой, изложенной в [4]. Считая, что пауза между импульсами напряжения суперизации имеет длительность, достаточную для того, чтобы амплитуда колебаний в системе успела достигнуть своего стационарного значения (нелинейный режим сверхрегенератора [4]), после несложных вычислений получим

$$K = k_d \frac{\Delta U_n}{T u_c q_1} \ln \frac{u_c + u_{ш}}{u_{ш}}, \quad (9)$$

где  $k_d$  — коэффициент передачи амплитудного демодулятора,  $\Delta U_n = A_2 - A_1 \approx A_1 - A_0$  — разность амплитуд напряжения накачки в состояниях 2 и 1 или 1 и 0,  $T$  — период напряжения суперизации. Как и следовало ожидать, полученное для коэффициента усиления соотношение по форме подобно аналогичным выражениям, получаемым при анализе сверхрегенеративных усилителей высокой частоты [4, 5]. При использовании нелинейного режима сверхрегенеративного усилителя его амплитудная характеристика оказывается логарифмической. Коэффициент усиления, как видно из (9), зависит от периода суперизации  $T$ . Минимальное значение  $T$  можно оценить с помощью соотношения (6), исходя из требования, чтобы и в отсутствие сигнала при наличии только шумов амплитуда колебаний в системе при переходе из состояния 1 в состояние 0 или 2, успевала достигнуть своего стационарного значения за время, равное полупериоду суперирующего напряжения. Отсюда для периода суперизации найдем

$$T \approx \frac{2}{q_1} \ln \frac{\Delta U_n}{u_{ш}}.$$

Подставляя это выражение в (9), получим окончательное соотношение для оценки коэффициента усиления в логарифмическом режиме

$$K = k_d \frac{\Delta U_n}{2U_c} \frac{\ln \frac{u_c + u_{ш}}{u_{ш}}}{\ln \frac{\Delta U_n}{U_{ш}}}. \quad (10)$$

Оценка коэффициента усиления по этой формуле при  $\frac{u_c}{u_{ш}} = 5$ ,  $u_c = 10^{-6}$  в и  $\Delta U_n = 1$  в дает  $K \approx 6 \cdot 10^4$ . Поскольку амплитудная характеристика усилителя в рассмотренном режиме логарифмическая, коэффициент усиления падает с ростом амплитуды сигнала, т. е. усилитель осуществляет автоматическую регулировку усиления.

## Эксперимент

Экспериментальный макет сверхрегенеративного видеоусилителя был собран в соответствии со схемой рис. 2. Напряжение суперизации формировалось из гармонического напряжения с помощью двух включенных последовательно и встречно стабилитронов типа Д-813. Такая цепочка диодов как бы вырезает среднюю часть синусоиды, пропуская только те ее части, которые расположены у вершин. При этом импульсы суперизирующего напряжения не имеют прямоугольной формы, но эта разница не имеет существенного значения. Частота накачки составляла 1 Мгц. Напряжение суперизации имело частоту порядка 1 кгц. На выходе усилителя после демодулятора стоял фильтр низких частот, не пропускающий частоту суперизации и все более высокие частоты. Использование сверхрегенерации позволяло существенно повысить коэффициент усиления. Так, при добротности контура  $Q \approx 50$ , напряжении шумов 300 мкв и напряжении сигнала 90 мкв был получен коэффициент усиления  $K = 400$ , что на порядок превышало коэффициент усиления, получаемый в этой схеме без использования сверхрегенерации. Кроме того, сверхрегенерация значительно повысила стабильность работы усилителя. Снижение уровня шумов позволяло повысить коэффициент усиления в соответствии с соотношением (9). Полученное экспериментально значение коэффициента усиления находится в удовлетворительном согласии с расчетом по формуле (10). Рассчитанное значение коэффициента усиления при указанных параметрах равно  $k = 600$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Eckhardt W., Sterzer F. Proc IRE, 50, No. 2, 148—162, 1962.
2. Viard J. R. PIEEE, 51, No. 2, 1963.
3. Korpel A., Ramaswamy V. PIEEE, 51, No. 7, 1044—1045, 1963.
4. Сифоров В. И. Радиоприемные устройства. М., Воениздат, 1954.
5. Гуткин Л. С. «Радиотехника», 1, № 9, 40—62, 1946.

Поступила в редакцию  
3.7 1969 г.

Кафедра  
физики колебаний