

УДК 621.375.933

А. А. БЕЛОВ, Л. АЛЕМ

О ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ В ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВИДЕОУСИЛИТЕЛЯХ

В работе исследуются переходные процессы в амплитудных реактивных модуляторах на нелинейной емкости $p-n$ -перехода, используемых в параметрических видеоусилителях типа «модулятор—демодулятор». Получено аналитическое выражение для переходной характеристики модулятора и приведены результаты эксперимента.

Параметрический видеоусилитель [1, 2] представляет собой в простейшем случае резонансный контур, частью емкости которого является емкость параметрического диода. Генератор накачки имеет частоту, близкую к резонансной частоте колебательного контура. Напряжение сигнала воздействует на емкость параметрического диода и, перестраивая резонансный контур усилителя, модулирует вынужденные колебания накачки в этом контуре. Модулированные колебания накачки затем поступают на демодулятор, выходное напряжение которого имеет ту же частоту, что и сигнал на входе усилителя. В общем случае сигнал модулирует колебания накачки как по амплитуде, так и по фазовому углу, однако в зависимости от расстройки резонансного контура усилителя относительно частоты накачки преобладающее значение может иметь либо угловая, либо амплитудная модуляция. В последнем случае в демодуляторе можно использовать обычный амплитудный детектор [1, 2]. В настоящее время достаточно подробно исследованы усилительные и шумовые свойства параметрических видеоусилителей и их входное сопротивление. Большое значение для ряда практических приложений имеют также особенности переходных процессов в таких усилителях.

Параметрический видеоусилитель типа «модулятор — демодулятор» можно расчленить на входные цепи, реактивный модулятор и демодулятор. Входные цепи обычно линейны, и их анализ не представляет трудностей. Достаточно подробно изучены и демодуляторы. Наибольший интерес представляют переходные процессы в реактивном модуляторе.

В данной работе исследуются переходные процессы изменения амплитуды в реактивном амплитудном модуляторе параметрического видеоусилителя.

Расчет переходной характеристики реактивного амплитудного модулятора

Расчет переходной характеристики реактивного модулятора проведем на примере схемы рис. 1. Здесь резонансный контур модулятора образован индуктивностью L , паразитной статической емкостью C_{Π} и емкостью $C_{\text{д}}$ параметрического диода. Проводимость G отражает все источники потерь схемы для колебаний накачки. Напряжение смещения подается на параметрический диод от источника с напряжением u_0 , а напряжение сигнала поступает в схему от генератора u_c . Генератор накачки подает в колебательный контур ток накачки $i_{\text{н}}$. Если такой модулятор используется в параметрическом видеоусилителе, то модулированное напряжение накачки, развивающееся на колебательном контуре, подается на амплитудный демодулятор, за которым следует фильтр низких частот, отфильтровывающий накачку. Выражение для комплексного коэффициента передачи K такого усилителя получено в работах [2, 3]. Оно имеет вид

$$K = -k_g \frac{4Q^2 m_1 \xi_0}{(1 + 2jQ\xi)^2 + 4Q^2 (\xi_0^2 + \xi_0 m_2)} \quad (1)$$

Здесь использованы следующие обозначения: k_g — коэффициент передачи амплитудного демодулятора; $Q = \frac{1}{\omega_0 LG}$, ω_0 — резонансная частота колебательного контура, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L(C_0 - C_2 + C_{\Pi})}}$; C_0 — постоянная составляющая дифференциальной емкости параметрического диода; C_2 — коэффициент, определяющий амплитуду второй гармоники накачки в спектре емкости параметрического диода; $m_1 = \frac{C_1}{C_0 - C_2 + C_{\Pi}}$, где C_1 — коэффициент, определяющий амплитуду первой гармоники накачки в спектре емкости параметрического диода; $m_2 = \frac{C_2}{C_0 - C_2 + C_{\Pi}}$; $\xi_0 = \frac{\omega_{\text{н}} - \omega_0}{\omega_{\text{н}}}$, где $\omega_{\text{н}}$ — частота накачки; $\xi = \frac{\Omega}{\omega_{\text{н}}}$, где Ω — частота сигнала. Соотношение (1) при условии $k_g = 1$ определяет коэффициент передачи $K(j\Omega)$ амплитудного реактивного модулятора;

$$K(j\Omega) = \frac{4Q^2 m_1 \xi_0}{\left(1 + 2jQ \frac{\Omega}{\omega_{\text{н}}}\right)^2 + \kappa Q^2} \quad (2)$$

где

$$\kappa = 4\xi_0^2 + 4\xi_0 m_2 \quad (3)$$

$K(j\Omega)$ есть отношение амплитуды огибающей модулированного напряжения накачки на колебательном контуре к амплитуде гармонического напряжения сигнала на входе модулятора. Связь между переходной характеристикой модулятора $h(t)$ и комплексным коэффициентом передачи $K(j\Omega)$ определяется соотношением [4]

$$h(t) \text{ l } (t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{K(j\Omega)}{j\Omega} e^{j\Omega t} d\Omega \quad (4)$$

Заметим, что это соотношение получено для линейных систем. Модулятор же в общем случае — нелинейное устройство. Однако реактивные

модуляторы параметрических усилителей, работающие при больших уровнях накачки и малых сигналах, линейны для сигналов [5]. Поэтому применение соотношения (4) для анализа реактивного модулятора, работающего с малыми сигналами, законно.

Подставляя в выражение (4) соотношение (2) для $K(j\Omega)$ и вычисляя интеграл с помощью теории вычетов, найдем переходную характеристику амплитудного реактивного модулятора

$$h(t) = \frac{4Q^2 m_1 \xi_0}{1 + \kappa Q^2} \left[1 - \frac{e^{-\frac{\omega_H t}{2Q}}}{\sqrt{-\kappa Q^2}} \left(\operatorname{sh} \frac{\sqrt{-\kappa} \omega_H t}{2} + \sqrt{-\kappa Q^2} \operatorname{ch} \frac{\sqrt{-\kappa} \omega_H t}{2} \right) \right]. \quad (5)$$

Множитель, стоящий перед квадратной скобкой в этом выражении, представляет собой коэффициент передачи $k(0)$ модулятора для постоянного тока:

$$k(0) = \frac{4Q^2 m_1 \xi_0}{1 + \kappa Q^2}.$$

В этом нетрудно убедиться с помощью выражения (2). Параметр κ , определенный соотношением (3), в зависимости от величины и знака расстройки ξ_0 может быть как отрицательным, так и положительным. В соответствии с этим в выражение (5) для переходной характеристики

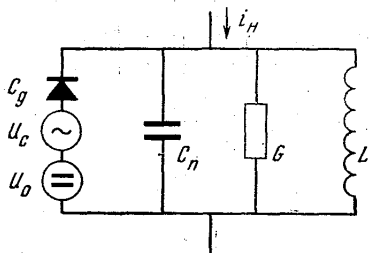


Рис. 1

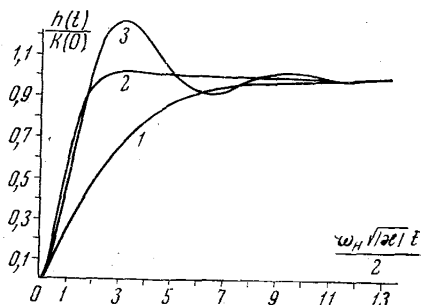


Рис. 2

будут входить либо гиперболические (при $\kappa < 0$), либо тригонометрические (когда $\kappa > 0$) функции. В первом случае переходная характеристика будет монотонной функцией времени, во втором случае нарастающие функции может сопровождаться осцилляциями. Частота осцилляций ν_0 в первом приближении определяется аргументом тригонометрических функций в выражении [5]

$$\nu_0 = \frac{\sqrt{-\kappa} \omega_H}{2}.$$

При увеличении расстройки ξ_0 (т. е. при увеличении параметра κ) частота осцилляций растет. Амплитуда осцилляций убывает во времени из-за экспоненциального множителя перед круглой скобкой в выражении (5) для $h(t)$. На рис. 2 приведены переходные характеристики амплитудного модулятора при различных значениях κ и Q . Кривая 1 на этом рисунке получена при $\kappa Q^2 = -0,5$, 2 — при $\kappa Q^2 = (0,75)^2$, 3 — при $\kappa Q^2 = (2,41)^2$. При расчетах длительности переходного процесса с помощью этих характеристик необходимо иметь в виду, что масштаб по оси абсцисс на этих графиках зависит от величины параметра κ . Анализ этих

характеристик показывает, что длительность переходного процесса при прочих равных условиях тем меньше, чем больше величина параметра κ , т. е. расстройка ξ_0 . Однако необходимо заметить, что увеличение расстройки помимо сокращения длительности переходного процесса уменьшает коэффициент усиления, поэтому на практике приходится выбирать некоторое компромиссное решение.

Эксперимент

Экспериментальное исследование переходных процессов в амплитудном реактивном модуляторе осуществлялось на макете модулятора с накачкой в области радиодиапазона. Частота накачки была равна 1,5 мГц. В качестве параметрического диода использовался диод типа Д215-А. Колебательный контур имел добротность $Q \approx 22$. При $\kappa Q^2 > (2,41)^2$ коэффициент передачи модулятора в соответствии с выражением (2) имеет спад в области низких частот сигнала, превышающий 3 дБ, что в ряде случаев нежелательно. Поэтому на практике в большинстве случаев $\kappa Q^2 \leq (2,41)^2$. Расчет длительности переходных процессов τ_M в модуляторе по графикам (рис. 2) показывает, что при $\kappa Q^2 \leq (2,41)^2$ $\tau_M \geq 5$ мсек. Для того чтобы переходные процессы во входных цепях модулятора не искажали его переходную характеристику, постоянная времени $\tau_{вх}$ входных цепей модулятора была сделана много меньше, чем длительность переходных процессов τ_M в самом модуляторе. Для визуального наблюдения переходных процессов в модуляторе напряжение с его колебательного контура поступало на амплитудный демодулятор, а затем через фильтр нижних частот на осциллограф. Частота среза фильтра нижних частот в три раза превышала максимальную частоту полосы пропускания модулятора. Благодаря этому влиянием выходных цепей модулятора на результаты эксперимента можно было пренебречь. На вход модулятора подавались прямоугольные импульсы, длительность которых была больше длительности переходных процессов в модуляторе. Форма импульсов на выходе модулятора давала представление о его переходной характеристике. Импульсы напряжения на входе модулятора и соответствующие им осциллограммы выходного напряжения показаны на рис. 3, а ($\kappa Q^2 \approx (2,41)^2$) и рис. 3, б ($\kappa Q^2 \approx (0,7)^2$). Одна метка времени на рис. 3 соответствует 10 мсек. Эти осциллограммы были получены при постоянном уровне накачки, но при различных расстройках ξ_0 . Расчет длительности переходного процесса по осциллограммам и по переходным характеристикам рис. 2 свидетельствует об удовлетворительном совпадении результатов теории и эксперимента.

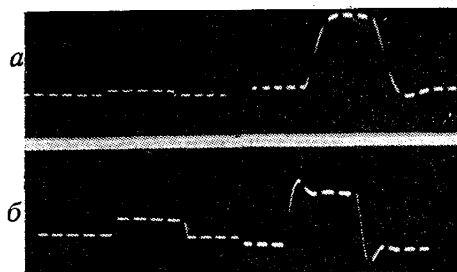


Рис. 3

В заключение нужно сделать некоторые выводы. Получено аналитическое выражение для переходной характеристики амплитудного реактивного модулятора. Показано, что в зависимости от расстройки и глубины модуляции емкости модулятора переходные процессы в нем могут либо описываться монотонной функцией времени, либо сопровождаться затухающими

В заключение нужно сделать некоторые выводы.

Получено аналитическое выражение для переходной характеристики амплитудного реактивного модулятора.

Показано, что в зависимости от расстройки и глубины модуляции емкости модулятора переходные процессы в нем могут либо описываться монотонной функцией времени, либо сопровождаться затухающими

осцилляциями. Длительность переходных процессов тем меньше, чем больше расстройка резонансного контура относительно частоты накачки.

Проведено экспериментальное исследование переходных процессов в амплитудном реактивном модуляторе. Результаты эксперимента подтверждают выводы теории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Engskardt, Sterzer. PJRE, 50, 148—162, 1962.
2. Белов А. А., Карасев М. Д. «Вопросы радиоэлектроники», техника телевидения, вып. 3, 3—13, 1966.
3. Белов А. А. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 2, 69—75, 1968.
4. Ицхоки Я. С. Импульсные устройства. М., «Советское радио», 1959.
5. Rowe H. E. PJRE, 46, 850, 1958.

Поступила в редакцию
24.6.1968 г.

Кафедра
физики колебаний