

УДК 621.375.121:375.93

К. Е. АКИМОВА, Е. А. ШАРКОВ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ ВИДЕОСИГНАЛОВ С МОДУЛЯТОРОМ RC

Экспериментально показано, что активная часть входного сопротивления синфазного модулятора RC при определенных условиях имеет отрицательный знак в широком диапазоне частот входного сигнала вплоть до постоянного тока. Представлены частотные характеристики коэффициента усиления параметрического усилителя видеосигналов с синфазным модулятором RC.

Несмотря на обширную теоретическую литературу, посвященную анализу параметрических систем с переменным комплексным параметром (например, [1, 2, 3]), почти полностью отсутствуют публикации экспериментальных работ. В настоящей статье представлены экспериментальные результаты исследования модуляционного усилителя с резонансным модулятором, в котором используются пульсирующие с частотой накачки синфазно сопротивление  $R$  и емкость  $C$ .

Физически интересное свойство рассматриваемой параметрической системы заключается в том, что активная часть входного сопротивления системы при определенных режимах работы модулятора имеет отрицательный знак в широком диапазоне частот входного сигнала вплоть до постоянного тока, несмотря на то, что мгновенные значения  $R$  существенно положительные [4]. Активная часть входной проводимости равна

$$G_{\text{вх}} = -g \frac{2(M_1 + 2Q^2\xi_0 m_1) \{M_1 [1 + 2M_2 + 4Q^2(\xi_0^2 + \xi_0 m_2 - \xi^2)] + 4Q^2\xi^2 m_1 M_0\} + [1 + 2M_2 + 4Q^2(\xi_0^2 + \xi_0 m_2 - \xi^2)]^2 + (4Q\xi)^2 M_0^2}{+ M_1 4Q^2\xi^2 \{4M_1 M_2 - m_1 [1 + 2M_2 + 4Q^2(\xi_0^2 + m_2 \xi_0 - \xi^2)]\}} \quad (1)$$

и на постоянном токе ( $\xi = 0$ )

$$G_{\text{вх}}(\xi = 0) = -2gM_1 \frac{M_1 + 2Q^2 m_1 \xi_0}{1 + 2M_2 + 4Q^2(\xi_0^2 + \xi_0 m_2)} + g_0. \quad (2)$$

Коэффициент усиления параметрического усилителя видеосигналов с модулятором RC равен

$$K = 2 \sqrt{\frac{(M_1 + 2Q^2 m_1 \xi_0)^2 + (2Q\xi)^2 M_1^2}{[1 + 2M_2 + 4Q^2(\xi_0^2 + m_2 \xi_0 - \xi^2)]^2 + (4Q\xi)^2 M_0^2}} \quad (3)$$

С этим выражением будет проводиться в дальнейшем сравнение экспериментальных данных.

Блок-схема экспериментальной установки с подробной схемой синфазного модулятора RC и входного фильтра низких частот показана на рис. 1.

Собственно резонансные контура, настроенные приблизительно на частоту накачки, состоят из катушек индуктивности  $L_1$  и  $L_2$  и нелинейных емкостей диодов  $D_1$  и  $D_2$  (были использованы силовые диоды типа D—215 А, у которых  $C_{до} = 600$  пф). Миллиамперметры постоянного тока ( $M_1$  и  $M_2$ ), зашунтированные блокировочными емкостями ( $C_1$  и  $C_2$ ), предназначены для измерения выпрямленного тока отдельно для каждого диода.

Сигнал поступал от генератора тока (звуковой генератор с последовательным сопротивлением  $R_1$ ) на вход фильтра низких частот ( $C_3, C_4, C_5, L_3, L_4$ ), который согласовывался с обоих концов ( $R_2, R_3$ ). Делитель сопротивлений ( $R_3, R_4$ ) с блокировочной емкостью  $C_6$  обеспечивал необходимое смещение на диодах.

После катодного повторителя, амплитудного детектора и фильтра НЧ усиленное напряжение сигнала измерялось и визуально просматривалось на осциллографе.

Модулятор RC с резонансной нагрузкой и амплитудным детектором представляет собой параметрический усилитель типа «модулятор—демодулятор» [5].

Система измерений позволяла одновременно регистрировать все необходимые величины.

Изменением смещения на диодах добивались либо равенства нулю выпрямленного тока (тогда модулятор становится чисто реактивным), либо наличия тока (синфазный модулятор RC). Для обеспечения заметной величины пульсаций проводимости, синфазной с пульсациями емкости, полупроводниковые диоды ставятся в режим работы с выпрямленными токами (порядка десятков и сотен мка). Коэффициенты модуляции проводимости ( $M_0, M_1$  и  $M_2$ ) рассчитывались по измеренным значениям амплитуды накачки в контуре (или выпрямленного тока) и по экспериментально снятым вольтамперным характеристикам диодов.

Известно, что форма резонансной кривой колебательного контура, содержащего полупроводниковый диод в качестве нелинейной емкости, сильно меняется в зависимости от режима работы диода и подаваемой на него мощности накачки.

При этом наблюдаются скачки (гистерезис) как на левом склоне резонансной кривой, так и на правом.

В первом случае гистерезис (скачки) резонансной кривой обусловлен нелинейностью емкостей диодов по отношению к амплитуде напряжения накачки, во втором — гистерезис связан с явлением автосмещения рабочей точки при изменении амплитуды накачки [6].

Резонансная кривая с двумя гистерезисами как справа, так и слева (рис. 2) получается лишь при достаточной мощности накачки, чтобы можно было сильно «раскачать» диод при больших потерях за счет токов проводимости.

Кстати, П-образная резонансная кривая последнего типа открывает интересную перспективу использования подобных нелинейных контуров в качестве полосовых фильтров.

Гистерезисность резонансной кривой заставляет отказаться от традиционного метода определения добротности по полосе пропускания резонатора. Величина добротности вычислялась по измеренному экви-

валентному сопротивлению контура на резонансной частоте и в случае, показанном на рис. 2, равна 10.

Нормированная величина входной проводимости модулятора определялась по отношению напряжений сигнала на выходе фильтра НЧ при включенной и выключенной накачке.

На рис. 3 представлены теоретические (вычисленные по формуле (1)) и экспериментальные частотные характеристики относительной величины активной части входной проводимости модулятора RC и чисто реактивного модулятора. Из рис. 3 видно хорошее качественное совпадение эксперимента и теории. Некоторые количественные расхождения

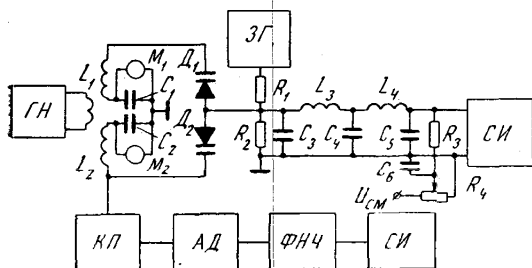


Рис. 1. Блок-схема измерений. ГН — генератор накачки, ЗГ — звуковой генератор, СИ — система измерения и визуального наблюдения, КП — катодный повторитель, АД — амплитудный детектор, ФНЧ — фильтр низких частот,  $M_1, M_2$  — миллиамперметры постоянного тока,  $D_1, D_2$  — полупроводниковые диоды типа Д-215 А.  $L_1 = L_2 = 98$  мкгн,  $R_1 = 1,0$  Мгом,  $R_2 = R_3 = 24$  ком,  $L_3 = L_4 = 50$  мгн,  $C_3 = C_5 = 50$  пф,  $C_4 = 100$  пф,  $R_4 = 10$  ком,  $C_1 = C_2 = 0,1$  мкф,  $C_6 = 30,0$  мкф

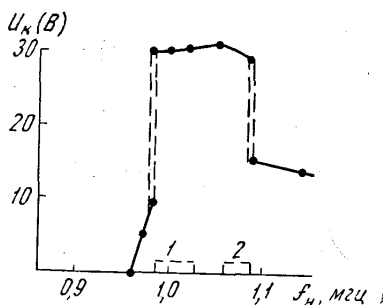


Рис. 2. Резонансная кривая контура с полупроводниковым диодом при большой мощности накачки и при следующих значениях параметров:  $u_{см} = 0$ ,  $I_{max} = 240$  мкА. 1 — область расстройек, где наблюдается релаксационное возбуждение (пила), 2 — область гармонического возбуждения

могут быть объяснены недостаточно корректным измерением добротности ( $Q$ ) и коэффициентов модуляции емкости ( $m_1$  и  $m_2$ ), величина которых весьма критична к ошибкам в измерениях смещения ( $u_{см}$ ) и амплитуды накачки [7].

В то время как характер входной проводимости реактивного модулятора сильно меняется за счет появления синфазных пульсаций проводимости, вид частотных характеристик и величина полосы пропускания параметрического усилителя видеосигналов с модулятором RC существенно не меняется, что можно видеть из теоретических и экспериментальных кривых рис. 4.

Отметим возможность получения разнообразных режимов работы параметрического усилителя с модулятором RC: как регенеративных (при положительных расстройках), так и с положительным входным сопротивлением (при отрицательных расстройках). И в том и другом случаях коэффициент усиления может принимать произвольно большие значения; в первом случае — за счет регенерации в широком диапазоне частот входного сигнала, а во втором — за счет гистерезиса резонансной кривой и на частотах сигнала вблизи постоянного тока [5].

Кроме того, наличие отрицательного сопротивления позволяет достаточно просто создать генератор гармонических колебаний, перестраиваемый в широком диапазоне частот вплоть до постоянного тока.

С увеличением коэффициента усиления резко возрастает нестабильность усиления.

Существует по крайней мере три источника нестабильностей. «Слева» от резонанса нестабильность определяется гистерезисом резонансной кривой, который при некоторых условиях (отрицательные расстройки, определенная величина постоянной времени цепочки смещения) приводит к возникновению релаксационных колебаний (обычно генерируется пила) [8]. Подобные релаксации в цепи смещения неоднократно наблюдались, в частности, при снятии вольтамперной характеристики параметрического диода в динамическом режиме (с подачей накачки) [9].

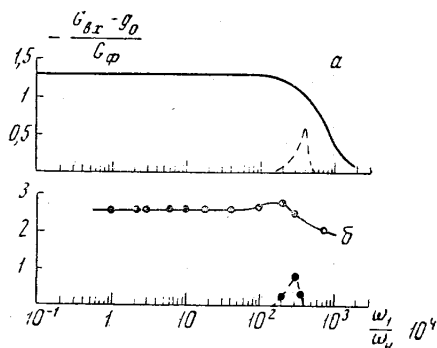


Рис. 3. Теоретические (а) и экспериментальные (б) частотные характеристики нормированной величины активной части входной проводимости реактивного модулятора (пунктир) при  $f_H = 990$  кГц,  $Q = 30$ ,  $2Q\xi_0 = 1,8$ ,  $m_1 = 0,15$ ,  $m_2 = 0,06$  и модулятора RC (сплошная линия) при  $f_H = 840$  кГц,  $Q = 10$ ,  $2Q\xi_0 = 0,5$ ,  $m_1 = 0,36$ ,  $m_2 = 0,21$ ,  $M_0 = 1,67$ ,  $M_1 = 1,35$ ,  $M_2 = 0,67$ ,

$$G_{\Phi} = \frac{1}{R_{\Phi}} = 0,04 \text{ ммо}$$

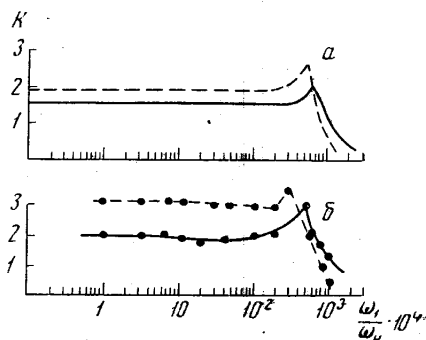


Рис. 4. Теоретические (а) и экспериментальные (б) частотные характеристики коэффициента усиления параметрического усилителя видеосигналов с реактивным модулятором (пунктир) и модулятором RC (сплошная линия). Обозначения параметров те же, что и на рис. 3

При положительных расстройках нестабильность может порождаться как гистерезисом резонансной кривой, так и широкополосным отрицательным входным сопротивлением. Причем, лишь последний механизм приводит к релаксациям или гармоническому возбуждению (в зависимости от частотной селективности цепи входного сигнала). Ранее подобные релаксации были замечены при исследовании умножителей частоты на полупроводниковых диодах в режиме автосмещения и качественно объяснены в работе [10].

На рис. 2 отмечены области расстроек, где возникает генерация пила (отрицательные расстройки, область 1) и гармоническое возбуждение (положительные расстройки, область 2). Одновременно оба вида возбуждения не наблюдаются.

Принципиальным с колебательной точки зрения в возникновении описанных выше эффектов является наличие резонансной системы с комбинацией нелинейности как активного, так и реактивного элемента. Такие явления могут происходить в колебательных системах с нелинейным реактивным элементом различной физической природы (например, в механических [11], акустических, оптических).

В ряде работ [12, 13], посвященных параметрическим генераторам субгармоник, получена интенсивная генерация при использовании полу-

проводникового диода как нелинейной емкости и нелинейной проводимости. Насколько можно судить по приводимым неполным экспериментальным данным, существенный вклад в образование субгармоник может вносить наличие отрицательного сопротивления в широком диапазоне частот, рассмотренное выше.

Экспериментально исследовано входное сопротивление синфазного модулятора РС. Показана возможность получения отрицательной величины активной части входной проводимости в широком диапазоне частот при положительных расстройках частоты накачки.

Вид частотных характеристик и полоса пропускания параметрического усилителя видеосигналов с модулятором РС существенно не меняется по сравнению с усилителем, использующим чисто реактивный модулятор.

Однако у параметрического усилителя с модулятором РС возможен режим работы как регенерационный в широкой полосе частот входного сигнала, так и с положительным входным сопротивлением.

Форма резонансной кривой колебательного контура, образованного нелинейной емкостью и нелинейной проводимостью полупроводникового диода, сильно изменяется в зависимости от режима работы диода.

Следует отметить возможность получения П-образной резонансной кривой при достаточной величине подаваемой мощности накачки в контур.

Гистерезис резонансной кривой при отрицательных расстройках и входное отрицательное сопротивление при положительных расстройках могут вызывать релаксационное возбуждение в цепи смещения и цепи входного сигнала.

В заключение авторы выражают благодарность М. Д. Карасеву и А. А. Белову за неизменное внимание в процессе выполнения работы и В. Н. Парыгину за ряд ценных замечаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Klarner J., Ghausi M. S. *PIEEE*, 1, 357, 1964.
2. Howson D. P. *PIEEE*, 111, 9, 1517, 1964.
3. Зубков В. И. «Радиотехника и электроника», 11, 1, 103, 1966.
4. Карасев М. Д., Шарков Е. А. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 4, 112, 1966.
5. Белов А. А., Карасев М. Д. «Вопросы радиоэлектроники», сер. техника телевидения, 3, 3, 1966.
6. Ильинова Т. М., Мигулин В. В. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 1, 55, 1962.
7. Белов А. А., Карасев М. Д. «Вопросы радиоэлектроники», сер. общетехническая, 7, 130, 1965.
8. Белов А. А. Дипломная работа, физический факультет МГУ, 1961.
9. Mc Dade I. C. *PIRE*, 49, 5, 957, 1961; *PIRE*, 50, 1, 91, 1962.
10. Рабинович-Визель А. А., Герценштейн М. Е. «Радиотехника и электроника», 8, 4, 725, 1963.
11. Брагинский В. Б., Минакова И. И. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 1, 83, 1964.
12. Каплан А. Е. «Радиотехника и электроника», 9, 9, 1719, 1964.
13. Макконелл. *ТИИРЭ*, 54, 4, 287, 1966.

Поступила в редакцию  
10. 4 1967 г.

Кафедра  
физики колебаний