

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1 — 1963

В. В. БОЙКО

ВЫРОЖДЕННЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ С СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ НАКАЧКИ

Рассматривается одноконтурный параметрический усилитель с неавтономным генератором накачки. За счет захватывания генератора накачки специально преобразованным выходным сигналом параметрического усилителя осуществляется синхронный режим. Исследование проведено методом медленно меняющихся амплитуд в предположении достаточной малости принимаемого сигнала.

Принцип параметрической регенерации, предложенный школой советских радиофизиков [1, 2], получил дальнейшее развитие с открытием соотношений Мэнли — Роу [3] и появлением новых реактивных элементов. Несмотря на быстрое развитие двухконтурных и многоконтурных параметрических усилителей [4—6], вырожденный режим усиления широко используется как в одноконтурном параметрическом усилителе, так и в различных типах усилителей с нелинейными линиями, с циклотронным механизмом усиления и т. п. [7, 8]. Наряду с хорошими шумовыми характеристиками такие усилители, в отличие от двухконтурных, не имеют принципиальных ограничений коэффициента усиления.

Одна из особенностей вырожденных усилителей — наличие бигармонического сигнала на выходе [2, 10—12] при частоте сигнала, отличающейся от половины частоты накачки (если используется первая область параметрической неустойчивости). Во многих случаях бигармонический режим неудобен: затруднен прием модулированных сигналов, в радиолокаторах из-за бигармоничности возможен пропуск импульсов и т. п. Все это вынуждает либо разносить частоты сигнала и накачки так, чтобы использовать только один гармонический компонент на выходе, либо, наоборот, совмещать частоту сигнала с половиной частоты накачки. Первое приводит к работе усилителя в неоптимальном режиме; при втором способе в случае полного синхронизма коэффициент усиления зависит от разности фаз между сигналом и напряжением накачки [1, 2, 10, 11]. Поскольку разность фаз меняется случайно, усиление в таком синхронном режиме неустойчиво.

Однако синхронный режим работы параметрического усилителя при оптимальных фазовых соотношениях имеет определенные достоинства. Во-первых, становится возможным неискаженный прием модулированных сигналов, имеющих несущую или пилот-сигнал. Во-вторых, синхронный одноконтурный усилитель обладает фазовой селектив-

ностью [11], и его нечувствительность к квадратурным сигналам в ряде устройств [9] может оказаться полезной. В-третьих, синхронный режим позволяет легко осуществить систему фазовой автоподстройки частоты.

Для осуществления эффективного синхронного режима оптимальные фазовые соотношения должны быть устойчивыми в определенном диапазоне расстроек по частоте. Один из простейших способов осуществления такого режима использует непосредственное захватывание генератора накачки второй гармоникой выходного сигнала параметрического усилителя. Структурная схема системы такого типа представлена на рис. 1, где обозначены: ПУ — параметрический усилитель, ГН — генератор накачки, КС — канал синхронизации.

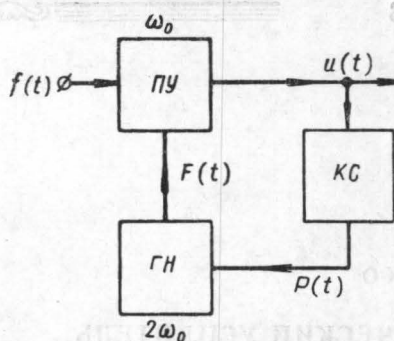


Рис. 1

Отметим, что хотя дальнейшее рассмотрение и ведется для одноконтурного параметрического усилителя, основные качественные закономерности остаются верными для вырожденных усилителей других типов [6—8].

1. Параметрический усилитель с модулируемой функцией $F(t)$ емкостью

$$C(t) = \frac{C_0}{1 + mF(t)}, \quad |mF(t)| < 1 \quad (1)$$

описывается [12] уравнением

$$\frac{d^2 U}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dU}{dt} + \omega_0^2 [1 + mF(t)] U = \omega_0^2 f(t). \quad (2)$$

Здесь $U = q/C_0$, q — заряд на емкости, $\omega_0^2 = 1/LC_0$ — собственная частота, $Q = \omega_0 L/R$ — добротность контура, $f(t)$ — внешнее воздействие.

Генератор накачки предполагаем работающим в мягком режиме, причем частота генерируемых колебаний полагается в точности равной удвоенной собственной частоте контура параметрического усилителя. Генератор описывается уравнением

$$\frac{d^2 V}{dt^2} - 2\omega_0 \delta_0 \left(1 - 4 \frac{V^2}{V_0^2}\right) \frac{dV}{dt} + 4\omega_0^2 V = 4\omega_0^2 P(t), \quad (3)$$

где V — напряжение на емкости, δ_0 — затухание ($\delta_0 > 0$), V_0 — стационарная амплитуда автоколебаний при $P(t) = 0$, $P(t)$ — внешнее воздействие.

2. Считая сигнал $f(t)$ гармоническим

$$f(t) \equiv \varepsilon \cos pt, \quad (4)$$

заметим, что и выходной сигнал параметрического усилителя будет содержать компоненту с частотой p . Применяя удвоение частоты и воздействуя этой удвоенной частотой на генератор накачки, можем при малых расстройках получить режим захватывания. Однако устойчивым такой режим будет лишь при определенных фазовых соотношениях, которые можно сделать оптимальными, выбирая специальную фазовую характеристику канала синхронизации. Легко показать, что синхронный режим в системе будет устойчив, если

$$P(t) \equiv K_0 \frac{d^2}{dt^2} (U^2), \quad (5)$$

где K_0 — имеющий соответствующую размерность коэффициент передачи цепи обратной связи.

Полагая

$$F(t) \equiv \frac{V}{V_0} \quad (6)$$

и вводя безразмерные переменные

$$x = \frac{U}{V_0} \quad \text{и} \quad y = \frac{V}{V_0}, \quad (7)$$

получим уравнения, описывающие систему:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dx}{dt} + \omega_0^2(1 + my)x = \omega_0^2 \frac{\varepsilon}{V_0} \cos pt, \quad (8)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} - 2\omega_0\delta_0(1 - 4y^2) \frac{dy}{dt} + 4\omega_0^2y = 4\omega_0^2K_0V_0 \frac{d^2}{dt^2}(x^2). \quad (9)$$

Здесь y порядка единицы; сигнал E предполагается достаточно малым, так что $x < 1$.

3. Для синхронного режима решение ищем в виде

$$\begin{aligned} x &= A \cos(pt + \vartheta), \\ y &= B \cos(2pt + \eta), \end{aligned} \quad (10)$$

где A , B , ϑ и η — медленные функции времени.

Вводя собственное время

$$\tau = pt, \quad (11)$$

обозначая $\delta = \frac{1}{Q}$, $k = 4\omega_0^2K_0V_0$, $\lambda = \frac{\varepsilon}{V_0}$ и предполагая расстройки ξ малыми

$$\frac{p^2 - \omega_0^2}{2p^2} = \xi \ll 1, \quad (12)$$

получим из (8) и (9) систему уравнений:

$$\ddot{x} + x = 2\xi x - \delta \dot{x} - mxy + \lambda \cos \tau, \quad (13)$$

$$\ddot{y} + 4y = 8\xi y + 2\delta_0(1 - 4y^2)\dot{y} + k(\dot{x}^2), \quad (14)$$

где $\ddot{x}$, $\ddot{y}$, $\dot{x}$ и $\dot{y}$ — производные по собственному времени.

Полагая все члены, входящие в правые части (13) и (14), малыми (ξ , δ , δ_0 , m , k и $\lambda \ll 1$), обычными методами получим эквивалентную (13) и (14) систему укороченных уравнений:

$$2 \frac{dA}{d\tau} = -\delta A + \frac{m}{2} AB \sin \Phi - \lambda \sin \vartheta, \quad (15)$$

$$2A \frac{d\vartheta}{d\tau} = -2\xi A + \frac{m}{2} AB \cos \Phi - \lambda \cos \vartheta.$$

$$\frac{dB}{d\tau} = \delta_0 B(1 - B^2) + kA^2 \sin \Phi, \quad (16)$$

$$B \frac{d\eta}{d\tau} = -4\xi B + kA^2 \cos \Phi.$$

Здесь $\Phi = 2\vartheta - \eta$.

4. В дальнейшем ограничимся рассмотрением стационарного режима. В отсутствие внешнего воздействия в генераторе накачки происходят автоколебания со стационарной амплитудой V_0 , при этом $B = 1$. В процессе захватывания амплитуда изменяется тем меньше, чем слабее внешнее воздействие на генератор. Ограничимся практически наиболее интересным случаем слабых сигналов [13], когда амплитуда генератора накачки мало отличается от стационарной:

$$B = 1 + \mu. \quad (17)$$

Величина μ максимальна при нулевых расстройках

$$\mu(0) = \mu_0 \geq \mu.$$

Удерживая в стационарных уравнениях (16) члены порядка μ , получим условие малости сигнала, захватывающего генератор накачки

$$\frac{kA^2}{2\delta_0} \ll \mu_0 \ll 1. \quad (18)$$

Ширина полосы захватывания при условии (18) будет порядка μ_0 , и можно ограничиться расстройками

$$\xi \ll \mu_0 \delta_0. \quad (19)$$

Использование условий (18) и (19) приводит к существенному упрощению уравнений (16):

$$\frac{dB}{d\tau} = -2\delta_0(B-1) + kA^2 \sin \Phi, \quad (19a)$$

$$B \frac{d\eta}{d\tau} = -4\xi + kA^2 \cos \Phi.$$

Таким образом, поведение системы в стационарном режиме при малом воздействии на генератор накачки описывается системой алгебраических уравнений:

$$\delta A - \frac{m}{2} AB \sin \Phi + \lambda \sin \vartheta = 0, \quad (20)$$

$$2\xi A - \frac{m}{2} AB \cos \Phi + \lambda \cos \vartheta = 0.$$

$$2\delta_0(B-1) - kA^2 \sin \Phi = 0, \quad (21)$$

$$4\xi - kA^2 \cos \Phi = 0.$$

Из (21) получим выражение для стационарной амплитуды колебаний генератора накачки

$$B = 1 + \frac{1}{2\delta_0} \sqrt{k^2 A^4 - 16\xi^2}. \quad (22)$$

Из (20), используя (19) и (22), получим уравнение для амплитуды усиленного сигнала:

$$A^2 \left(\delta^2 + \frac{m^2}{4} B^2 \right) - \lambda^2 = \frac{mB}{k} \left(8\xi^2 + \delta \sqrt{k^2 A^4 - 16\xi^2} \right). \quad (23)$$

5. Рассмотрим предварительно случай нулевых расстроек. Введем критический коэффициент модуляции параметра

$$m_0 = 2\delta \quad (24)$$

и коэффициент регенерации

$$\sigma = \frac{m}{m_0}, \quad (0 < \sigma < 1). \quad (25)$$

Обозначая (при $\delta \approx \delta_0$),

$$\kappa = \frac{2\delta_0}{\delta k} \approx \frac{2}{k}, \quad (26)$$

получим из (23) при $\xi = 0$ кубичное уравнение для $A(0) = A_0$

$$A_0^3 - \frac{\delta \kappa}{\sigma} (1 - \sigma) A_0 + \frac{\kappa}{\sigma} \lambda = 0. \quad (27)$$

Все решения уравнения (27) действительны при условии, что

$$\lambda^2 \leq \frac{4}{27} \frac{\delta^3 \kappa}{\sigma} (1 - \sigma)^3. \quad (28)$$

Неравенство (28) означает, что существует такое критическое значение λ , после превышения которого при $\sigma < 1$ система самовозбуждается. При этом самовозбуждение наступает несколько раньше в присутствии сигнала, чем без него, хотя значение коэффициента регенерации меньше единицы. Такой результат естествен, так как амплитуда напряжения накачки при захватывании зависит от величины внешнего воздействия. При некотором увеличении сигнала напряжение накачки также несколько увеличивается, и при m , близком к критическому, это может привести к неустойчивости системы с последующим переходом ее в режим автоколебаний. Если же условие (28) выполняется и опасность самовозбуждения отсутствует, то изменения напряжения накачки в пределах полосы синхронизма приводят к дополнительной неравномерности амплитудно-частотной характеристики системы, что является нежелательным. Поэтому следует принять меры по стабилизации амплитуды генератора накачки. Применяя известные схемы генераторов со стабильной амплитудой [14] или используя ограничители, можно добиться постоянства напряжения накачки. Считая указанные меры принятыми, можем в (23) пренебречь членами порядка μ .

Тогда при $\xi = 0$ из (23) получаем

$$A_0^2 = \frac{\lambda^2}{\delta^2 (1 - \sigma)^2}. \quad (29)$$

Исследуя обычными методами уравнения (15) на устойчивость, легко показать, что при $\vartheta = -\frac{\pi}{2}$ полученная амплитуда (29) будет устойчивой.

Введем нормированный коэффициент передачи, который показывает, насколько усиление регенерированной системы превышает усиление обычного контура с затуханием δ

$$N_0 \equiv \delta^2 \frac{A_0^2}{\lambda^2} = \frac{1}{(1 - \sigma)^2}. \quad (30)$$

Для того чтобы напряжение, захватывающее генератор накачки, удовлетворяло (18) и (29), предположим в дальнейшем сигнал настолько малым, что выполняется условие

$$\lambda^2 \leq \mu_0 \delta^3 \kappa (1 - \sigma)^2. \quad (31)$$

6. Рассмотрим уравнение (23) в общем случае отличных от нуля расстроек. Учитывая замечания о стабилизации амплитуды генератора накачки, пренебрегаем в (23) малыми членами. Решая полученное би-квадратное уравнение, получим выражение для стационарной амплитуды усиленного сигнала:

$$A^2 = \frac{1}{\delta^2 (1 - \sigma^2)^2} [(1 + \sigma^2)(\lambda^2 + 8\xi_0^2 \delta \sigma \chi) + 2\sigma \sqrt{(\lambda^2 + 8\xi_0^2 \delta \sigma \chi)^2 - 4\xi_0^2 \delta^4 \chi^2 (1 - \sigma^2)^2}]. \quad (32)$$

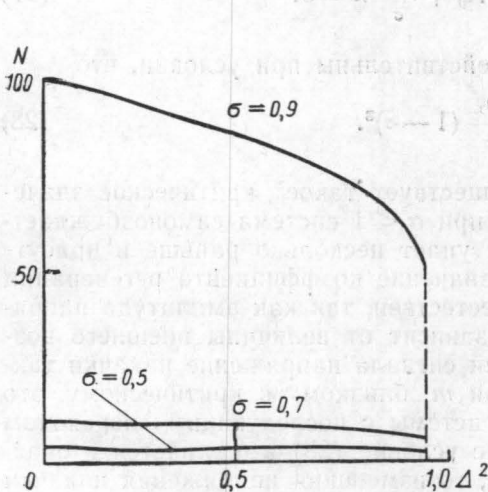


Рис. 2

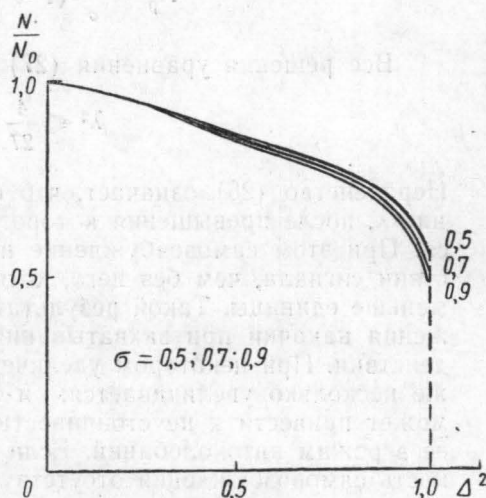


Рис. 3

Граница полосы синхронного режима определится при обращении подкоренного выражения в нуль. Решая уравнения

$$8\xi_0^2 \delta \sigma \chi \pm 2\xi_0 \delta^2 \chi (1 - \sigma^2) + \lambda^2 = 0 \quad (33)$$

и учитывая малость сигнала (31), получим для критической расстройки выражение

$$|\xi_0| = \frac{\lambda^2}{2\delta^2 \chi (1 - \sigma^2)} \leq \frac{\mu_0 \delta (1 - \sigma)}{2(1 + \sigma)}. \quad (34)$$

Учитывая (31) и (34), можем в (32) пренебречь членами второго порядка малости, после чего (32) примет вид

$$A^2 = \frac{(1 + \sigma^2)\lambda^2 + 2\sigma \sqrt{\lambda^4 - 4\xi_0^2 \delta^4 \chi^2 (1 - \sigma^2)^2}}{\delta^2 (1 - \sigma^2)^2}. \quad (35)$$

Вводя относительную расстройку

$$\Delta = \frac{\xi}{\xi_0}, \quad (-1 \leq \Delta \leq 1), \quad (36)$$

получим выражение для нормированного коэффициента передачи

$$N = \frac{1 + \sigma^2 + 2\sigma \sqrt{1 - \Delta^2}}{(1 - \sigma^2)^2}. \quad (37)$$

Графики N для трех значений σ представлены на рис. 2. Удобно ввести относительный коэффициент передачи

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1 + \sigma^2 + 2\sigma\sqrt{1 - \Delta^2}}{(1 + \sigma)^2}. \quad (38)$$

Из (38), представленного графиками рис. 3, видим, что неравномерность относительного коэффициента передачи в пределах полосы синхронизма не превышает 3 дб.

Эта неравномерность определяется не только амплитудно-частотной характеристикой регенерированного контура, но и специфическим характером фазовых соотношений в системе. Именно, при увеличении расстройки уход фазы от оптимальной определяется фазовыми характеристиками как самого контура, так и синхронного генератора накачки. В результате совместного действия указанных причин амплитуда сигнала на краях полосы синхронизма уменьшается, и система возвращается в бигармонический режим.

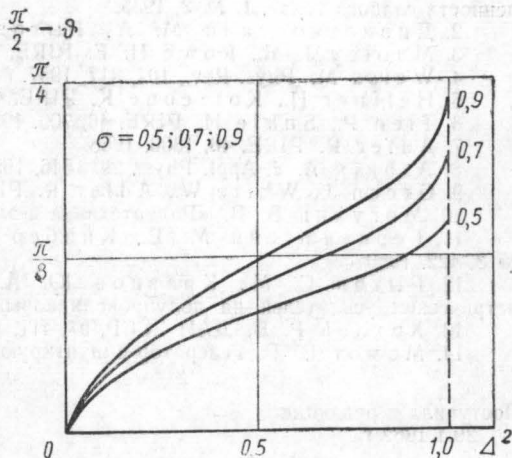


Рис. 4

Для вычисления фазовой характеристики используем второе уравнение из (20). Учитывая малость сигнала (31), пренебрегаем малыми членами и получаем выражение для фазы

$$\vartheta = \arccos \left(\frac{\Delta\sigma}{\sqrt{1 + \sigma^2 + 2\sigma\sqrt{1 - \Delta^2}}} \right). \quad (39)$$

Фазовая характеристика представляет собой нечетную относительно нулевой расстройки функцию и на рис. 4 представлены ее графики для трех значений коэффициента регенерации.

7. Экспериментальная проверка проводилась на параметрическом усилителе с полупроводниковыми диодами в качестве нелинейной реактивности. Все качественные особенности системы нашли свое подтверждение в эксперименте. Синхронный режим устойчив в полосе порядка 0,1% от резонансной частоты контура при сигналах около 1 микровольта и регенерации, близкой к критической. В пределах полосы синхронизма усиление мало зависит от расстройки в полном соответствии с рис. 3. Расстройка собственной частоты контура относительно половины частоты накачки приводит к частотной асимметрии резонансных характеристик системы. Подтверждена возможность самовозбуждения при увеличении сигнала, если не приняты меры по стабилизации амплитуды генератора накачки. АМ — сигнал с малыми индексом и частотой модуляции усиливается при синхронном режиме без заметных искажений. За пределами полосы синхронизма система переходит в режим биений, несколько отличный по форме огибающей от обычного. При больших расстройках имеет место обычный бигармонический режим.

Таким образом, теоретически и экспериментально показана возможность осуществления синхронного режима усиления в вырожденном

параметрическом усилителе путем использования обратной связи, предназначенной для синхронизации генератора накачки.

В заключение искренне благодарю профессора В. В. Мигулина за ценное обсуждение данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мандельштам Л. И., Папалекси Н. Д. «Известия электропромышленности слабого тока», 1, № 3, 1935.
2. Дивильковский М. А., Рытов С. М. ЖТФ, 6, № 3, 474, 1936.
3. Manley J. M., Rowe H. E. PIRE, 44, 904, 1956.
4. Weiss M. Phys. Rev., 107, 317, 1957.
5. Heffner H., Kotzebue K. PIRE, 46, 1301, 1958.
6. Tien P., Suhle H. PIRE, 46, 700, 1958.
7. Adler R. PIRE, 46, 1300, 1958.
8. Ashkin A. J. Appl. Phys., 29, 1646, 1958.
9. Green J., White W., Adler R. PIRE, 49, 805, 1961.
10. Мигулин В. В. «Радиотехника и электроника», № 6, 955, 1960.
11. Герценштейн М. Е., Кинбер Б. Е. «Радиотехника и электроника», № 3, 422, 1960.
12. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Горышник Л. Л. Теория параметрических усилителей на полупроводниковых диодах. Изд-во АН СССР, М., 1960.
13. Хохлов Р. В. ДАН СССР, 97, 411, 1954.
14. Момот Е. Г. Генератор с шунтирующим диодом, ГЭИ, 1959.

Поступила в редакцию
30.4 1962 г.

Кафедра
теории колебаний