

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 6 — 1966

УДК 621.374.4 : 621.372.45

М. И. ДИВЛЕКЕЕВ, О. И. МЕДНИКОВ

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ДЕЛИТЕЛИ ЧАСТОТЫ С МОДУЛИРОВАННОЙ НАКАЧКОЙ

Исследовано воздействие АМ и ЧМ сигналов на двухконтурные параметрические делители частоты. Показано, что происходит сильное подавление амплитудной модуляции. При делении ЧМ сигнала девиация уменьшается в n раз.

При использовании делителей частоты в системах связи, в схемах стандартов частоты подаваемый на делитель сигнал может быть модулирован по амплитуде или частоте (фазе). Бывает желательно максимально подавить амплитудную модуляцию выходного сигнала; важно выяснить связь между модуляцией на входе и выходе делителя.

В параметрических делителях [1, 2, 3], представляющих собой пассивные системы, входной сигнал (накачка) вызывает параметрическую генерацию — возбуждение колебаний, сумма частот которых равна входной частоте: $\omega_1 + \omega_{n-1} = \omega_n$. Взаимная синхронизация этих колебаний приводит к установлению кратного режима — режима деления частоты. Такие делители отличаются широкополосностью по входной частоте (до 30% при малых коэффициентах деления n). Поэтому их поведение под воздействием модулированной накачки обладает некоторыми особенностями.

Рассмотрим двухконтурный параметрический генератор, возбуждаемый амплитудно-модулированной накачкой:

$$u_n(t) = A_n(t) \cos \omega_n(t) = A_{n0}(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_n t.$$

Будем считать коэффициент модуляции $m \ll 1$ и частоту модуляции Ω малой по сравнению с частотами колебаний в системе. Тогда выходное напряжение частоты $\omega_1 \approx \frac{\omega_n}{n}$ нужно искать в виде

$$u_1(t) = A_1(t) \cos(\omega_1 t + \varphi_1) = A_{10}(1 + m' \cos \Omega t) \cos(\omega_1 t + \varphi_1).$$

В этом случае по формуле Тейлора с точностью до членов порядка m^2 записываем

$$A_1(t) = A_{10}(1 + m' \cos \Omega t) = A_{10} + \left. \frac{dA_1}{dA_n} \right|_{A_n=A_{n0}} \cdot mA_{n0} \cos \Omega t + \dots \quad (1)$$

Отсюда

$$\frac{m'}{m} = \frac{A_{n0}}{A_{10}} \cdot \left. \frac{dA_1}{dA_n} \right|_{A_n=A_{n0}} \quad (2)$$

Следовательно, глубина модуляции выходного сигнала существенно зависит от вида амплитудной характеристики параметрического генератора $A_1=f(A_n)$, которая определяется механизмом ограничения амплитуд [3]. Если эта характеристика монотонна, то значительного подавления модуляции быть не должно. Если же она имеет экстремум, то вблизи точки с $\frac{dA_1}{dA_n} = 0$ модуляция сильно подавляется. Экстремумы на амплитудных характеристиках имеются при ограничении амплитуд за счет нелинейной расстройки или нелинейного затухания.

Дополнительное влияние на амплитудную модуляцию выходного сигнала в режиме деления оказывает взаимная синхронизация колебаний в контурах. Известно, что при синхронизации генератора АМ сигналом на основной частоте или на гармонике (при делении частоты) модуляция сильно подавляется. Генератор работает как узкополосный фильтр с полосой, определяемой шириной области синхронизации $\Delta\omega_c$ [4, 5].

Уравнением, аналогичным описывающему синхронизацию генератора [6], определяется и поведение синхронной фазы $\Phi = (n-1)\varphi_1 - \varphi_{n-1}$ в параметрическом делителе частоты:

$$\dot{\Phi} = \Delta_k + \frac{(n-1)\delta_1 - \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \Delta + (k^2 - 1)\Delta_{н.л}(A_n, A_1) - B \cdot \gamma A_1^{n-2} \cos(\Phi + \Phi_0), \quad (3)$$

где

$$\Delta_k = (n-1)\omega_{10} - \omega_{20}, \quad \Delta = \omega_n - (\omega_{10} + \omega_{20}), \quad k = \frac{A_{(n-1)0}}{A_{10}}$$

ω_{10} и ω_{20} — собственные частоты контуров системы, δ_1 и δ_2 — их коэффициенты затухания, γ — $(n-1)$ -й коэффициент в разложении заряда на нелинейной емкости q_c по степеням напряжения u_c , обеспечивающий деление частоты в n раз.

Решение уравнений для параметрического делителя частоты [1, 2, 3] с помощью метода вторичного укорочения уравнений [6] позволяет найти малую добавку a_1 к амплитуде A_1 в режиме взаимной синхронизации. Оказывается, что $a_1 \sim \Delta\omega_c = 2B\gamma A_1^{n-2}$. Когда накачка модулирована по амплитуде, то $A_1(t) = A_{10}(1 + m' \cos \Omega t)$, где m' определяется из [2], и $a_1 \sim A_{10}^{n-2} [1 + (n-2)m' \cos \Omega t]$.

Полностью выражение для амплитуды $A_{1c}(t)$ в режиме деления запишется так:

$$\begin{aligned} A_{1c}(t) &= A_{10} + m' A_{10} \cos \Omega t + a_{10} [1 + (n-2)m' \cos \Omega t] = \\ &= (A_{10} + a_{10}) \left\{ 1 + \left[1 + \frac{(n-3)a_{10}}{A_{10}} \right] m' \cos \Omega t \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Отношение коэффициентов [модуляции выходного и входного сигналов] будет

$$\frac{m_1}{m} = \frac{m'}{m} \left[1 + \frac{(n-3)a_{10}}{A_{10}} \right] = \left[1 + \frac{(n-3)a_{10}}{A_{10}} \right] \frac{A_{n0}}{A_{10}} \cdot \left. \frac{dA_1}{dA_n} \right|_{A_n=A_{n0}} \quad (5)$$

Соотношение (5) показывает, что изменение глубины модуляции в результате взаимной синхронизации невелико.

Из сказанного видно, что параметрический делитель, несмотря на свою широкополосность по расстройке частоты накачки Δ (при $(n-1)\delta_1 \approx \delta_2$ [2]), обладает избирательными свойствами по отношению к боковым частотам в спектре входного сигнала. Эта избирательность связана с нелинейностью амплитудной характеристики $A_1=f(A_n)$, ко-

торая в большинстве случаев имеет плоскую вершину и вызывает ограничение амплитуды выходного напряжения.

Экспериментально исследовались делители частоты в 3—7 раз с нелинейной емкостью полупроводниковых диодов типа Д7. Выходная частота $\frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\omega_n}{2\pi}$ — порядка 400 кГц, частота модуляции — от 300 гц до 20 кГц, коэффициент модуляции накачки m — до 20—30%.

Для измерения глубины модуляции выходного сигнала была собрана схема, основанная на сравнении амплитуд несущей и огибающей (рис. 1). Сигнал с выхода делителя частоты поступает на 2 канала, с которых снимаются продетектированные напряжения, пропорциональные амплитудам несущей и огибающей. Разность выходных напряжений (на катодных нагрузках двух УПТ) измеряется стрелочным прибором, шкала которого позволяет определять коэффициенты АМ от 0 до 18%.

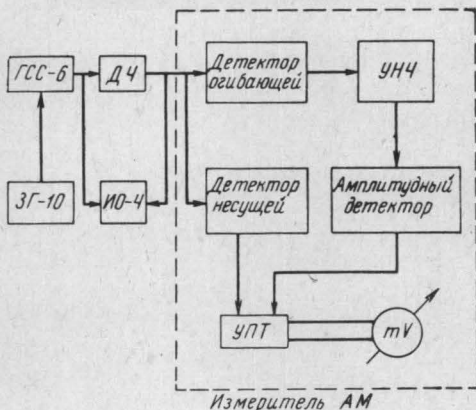


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования деления частоты АМ сигнала (ДЧ—исследуемый делитель).

На рис. 2 показаны области генерации и деления при $n=4$ в режиме принудительного смещения на диоде (а) и автосмещения (б). Полосы деления немодулированного сигнала $\Delta_{\text{дел}}$ достигают 30% от частоты накачки для $n=4$ (98% $\Delta_{\text{ген}}$), 28% для $n=5$ (97% $\Delta_{\text{ген}}$) и 21% для $n=7$ (85% $\Delta_{\text{ген}}$).

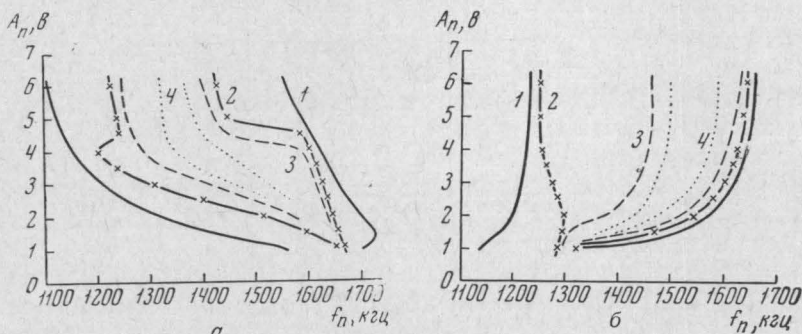


Рис. 2. Области генерации (1) и деления (2) для немодулированной накачки; область деления АМ сигнала (3); область максимального подавления АМ (4). а — режим принудительного смещения, б — режим автосмещения; $n=4$

При наличии АМ накачки полоса деления сужается примерно вдвое при $m=20\%$ (рис. 2, кривые 3). Около половины этой полосы составляет область, где модуляция подавлена более чем в 100 раз; m_1 меньше чувствительности измерителя АМ, равной 0,2% (рис. 2, кривые 4 и рис. 3).

В режиме принудительного смещения область наибольшего подавления АМ лежит вблизи максимума амплитудной характеристики $A_1=f(A_n)$ (рис. 4, кривая 1). Этот максимум довольно широкий, так что подавление АМ наблюдается в значительном интервале амплитуд.

При наблюдении огибающей выходного сигнала делителя на экране осциллографа в этой области слабо заметна лишь вторая гармоника частоты модуляции.

Когда диод работает в режиме автосмещения, то глубина модуляции выходного сигнала зависит от соотношения между периодом модуляции T_{Ω} и постоянной времени цепи автосмещения τ . Статическая амплитудная характеристика $A_1 = f(A_n)$ оказывается для этого режима монотонной (рис. 4, кривая 2). Эта монотонность связана с тем, что

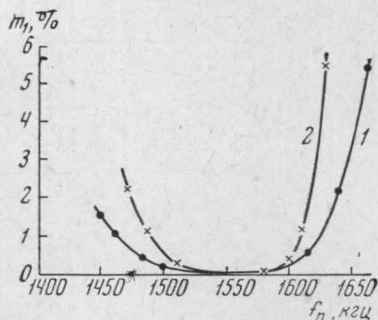


Рис. 3. Зависимость АМ выходного сигнала от частоты накачки в полосе деления для принудительного (1) и автоматического (2) смещения на диоде. $n=5$, $m=20\%$

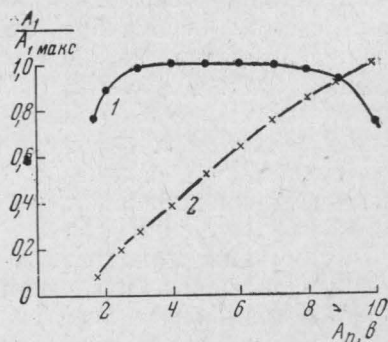


Рис. 4. Амплитудные характеристики делителя для принудительного (1) и автоматического (2) смещения на диоде

амплитуда A_1 сильно зависит от напряжения смещения $E_{см}$, а само смещение изменяется с ростом A_n . Но, несмотря на монотонность амплитудной характеристики, модуляция сильно подавляется и в режиме автосмещения, если $\tau \gg T_{\Omega}$ (рис. 3, кривая 2). В этом случае цепь смещения достаточно инерционна по отношению к модуляции амплитуды накачки. Напряжение смещения $E_{см}$ не успевает следовать за изменениями A_n . Делитель фактически работает с постоянным смещением, и модуляция сильно подавляется, как и в предыдущем случае. Если же $\tau < T_{\Omega}$, то $E_{см}$ успевает меняться с частотой модуляции, в результате чего выходное напряжение также оказывается модулированным по амплитуде. Поэтому при уменьшении τ глубина амплитудной модуляции выходного сигнала быстро растет.

С удалением от середины полосы деления к ее границам глубина амплитудной модуляции выходного сигнала увеличивается. У краев полосы деления наблюдаются режимы, при которых деление сохраняется не на всем протяжении периода модуляции T_{Ω} , а в течение некоторой части периода существует несинхронный режим генерации (биений). После установления взаимной синхронизации выходной сигнал делителя каждый раз может иметь любую из n возможных фаз [1, 3]. При наблюдении этих процессов на экране осциллографа использовались два делителя, один из которых работал с чередованием генерации и деления. Фигура Лиссажу на экране состояла из четырех слегка размазанных, но одинаково ярких эллипсов, что соответствовало равновероятному возбуждению всех возможных фаз (при делении в 4 раза).

Воздействие АМ сигнала на делитель частоты может вызвать фазовую модуляцию выходного напряжения [4]. Величина этой модуляции зависит от расстройки частоты входного сигнала и крутизны фазовой характеристики системы в полосе деления. У широкополосных парамет-

рических делителей частоты, как и у других делителей с двумя контурами [7], крутизна эта мала. Поэтому ожидаемая фазовая модуляция должна быть слабой. Проведенные измерения не обнаружили заметной ФМ в делителе с АМ накачкой: при $n=4$, $m=20\%$, $\frac{\Omega}{2\pi}=1000$ гц, максимальная глубина модуляции фазы выходного сигнала не превышала 0,02 периода, или 7° .

Для исследования работы параметрических делителей частоты с частотно-модулированной накачкой был собран измеритель девиации, представляющий собой супергетеродинный приемник ЧМ колебаний с вольтметром на выходе. Делители имели выходную частоту около 330 кгц при делении в 3, 4 и 5 раз. Девиация частоты накачки была до 10 кгц при частоте модуляции от 500 гц до 3 кгц. Модуляция частоты генератора накачки производилась синусоидальным напряжением.

Измерения показали, что выходной сигнал делителя модулирован по частоте. Частота модуляции на выходе такая же, как и на входе. Девиация выходного сигнала в n раз меньше, чем у входного, что и следовало ожидать, так как частота модуляции мала по сравнению с полосами пропускания контуров делителя [8, 9].

Прохождение ЧМ сигнала через параметрический делитель частоты не зависело от способа подачи смещения (принудительное или автоматическое) и от постоянной времени τ цепи смещения. С ростом девиации полоса деления сужалась, но не зависела от изменений частоты модуляции, потому что при больших индексах модуляции ширина спектра ЧМ сигнала определяется величиной девиации. На выходе делителя с ЧМ накачкой существенной амплитудной модуляции не наблюдалось.

Вблизи границ полосы деления наблюдались такие же явления, как и при делении АМ сигнала: чередование синхронного и несинхронного режимов, возбуждение любой из n фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахманов С. А., Рошаль А. С. «Изв. высш. учебн. зав.», радиоп физика, 5, № 5, 1017, 1962.
2. Медников О. И. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 5, 67, 1963.
3. Каплан А. Е., Кравцов Ю. А., Рылов В. А. Параметрические генераторы и делители частоты. «Советское радио», 1966.
4. Мартыненко Д. П., Хохлов Р. В. «Радиотехника и электроника», 2, № 8, 1001, 1957; Мартыненко Д. П. «Радиотехника и электроника», 3, № 2, 277, 1958.
5. Самойленко Ю. И. «Радиотехника и электроника», 4, № 1, 39, 1959.
6. Хохлов Р. В. ДАН СССР, 97, № 3, 411, 1954; «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ.-мат. и ест. наук, № 8, 51, 1954.
7. Андреев В. С., Леонтьев А. Г. «Электросвязь», № 10, 38, 1965.
8. Мартыненко Д. П. «Электросвязь», № 2, 8, 1959.
9. Быков В. Л. «Электросвязь», № 10, 18, 1965.

Поступила в редакцию
14. 6 1965 г.

Кафедра
физики колебаний