

В. В. КАРПОВ, И. И. МИНАКОВА, А. Г. ФЕДОСЕЕВ

УЧЕТ ПРОЛЕТНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ В ГЕНЕРАТОРЕ НА ЛАВИННО-ПРОЛЕТНОМ ДИОДЕ И В КЛИСТРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ

Рассмотрено влияние зависимости пролетного угла от приложенного напряжения на характеристики автономного и синхронного режимов автогенераторов с запаздыванием. Для генераторов на ЛПД и отражательном клистроне рассчитаны амплитудные кривые и условия устойчивости. Получены зависимости ширины полосы синхронизации и увеличения амплитуды в синхронном режиме от пролетного угла и глубины его самомодуляции при параметрическом воздействии.

Особенности параметрической синхронизации при наличии нелинейного контура и запаздывания в обратной связи были рассмотрены в [1]. Там же было оценено увеличение полосы синхронизации при пролетном угле $60-70^\circ$. В [2] произведена оценка максимального приращения амплитуды при параметрическом воздействии над амплитудой автономного режима и рассмотрены энергетические соотношения в автоколебательной системе с запаздыванием при слабом параметрическом воздействии, показывающее значительное увеличение мощности сигнала на выходе за счет более полного использования источника питания при больших углах пролета, что особенно существенно для лавинно-пролетных диодов (ЛПД), диодов Ганна и т. п. В этих работах, как и в большинстве работ по автогенераторам с запаздыванием, учитывался средний пролетный угол [3]. Для твердотельных генераторов при большой амплитуде переменного напряжения, близкой к постоянному смещению, может быть существенной зависимость ширины запертого слоя $p-n$ -перехода от приложенного напряжения, приводящая к изменению с напряжением пролетных углов носителей (пролетная нелинейность) и к модуляции емкости $p-n$ -перехода (параметрическая нелинейность).

Изменение с напряжением угла пролета носителей может вызываться также изменением их скорости дрейфа, поэтому пролетная нелинейность может играть заметную роль и в тех случаях, когда ширина запертого слоя $p-n$ -перехода практически не зависит от приложенного напряжения, как, например, в диодах, работающих в режиме прокола. Пролетная и параметрическая нелинейность представляют собой интегральный эффект, который мы будем в дальнейшем называть самомодуляцией пролетного угла. Следует отметить, что самомодуляция пролетного угла может проявляться и у отража-

тельного клистрона, в основном вследствие изменения с напряжением скорости дрейфа электронов. Учет зависимости пролетного угла от амплитуды переменного напряжения [4] позволил объяснить асимметрию областей генерации клистрона, в частности получить гистерезис на краю области. Расчет зависимости пролетного угла от амплитуды напряжения для плавного p - n -перехода проведен в [5].

В общем случае зависимость величины пролетного угла θ от переменного напряжения u может быть записана в виде

$$\theta = \sum_{k=0}^N \theta_k u^k. \quad (1)$$

Для автогенератора с линейным контуром или резонатором, имеющим коэффициент затухания δ при наличии запаздывания τ в обратной связи, уравнение движения при параметрическом воздействии на реактивный параметр двойной частотой может быть записано в виде

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + 2S(x_\tau)\dot{x}_\tau + \omega_0^2(1 + m \cos 2pt)x = 0. \quad (2)$$

Рассмотрим одночастотный режим квазилинейного квазиконсервативного автогенератора при малой глубине модуляции параметра m . В приближении малого сигнала ограничимся кубической аппроксимацией характеристики активного элемента, полагая

$$S(x_\tau) = -\delta_1 + \delta_2 x_\tau^2.$$

При указанных условиях в полосе параметрической синхронизации и при расстройках, мало превышающих расстройки, соответствующие границам полосы, движение в системе может быть представлено в виде

$$x = A \sin(pt - \varphi) \equiv A \sin \psi. \quad (3)$$

В первом приближении, ограничиваясь линейным членом в (1),

$$\theta = \theta_0 + \theta_1 x \quad (\theta = \theta_0 \text{ при } \tau = \text{const}) \quad (4)$$

получим

$$x_\tau = A \sin(\psi - \theta) = A \sin(\psi - \theta_0 - \theta_1 x). \quad (5)$$

При $\theta_1 A \ll \frac{\pi}{8}$ можно провести разложение (5) в ряд Тейлора и учесть только линейный по $\theta_1 x$ член:

$$\begin{aligned} x_\tau &= A \sin(\psi - \theta_0) - A \cos(\psi - \theta_0) \cdot \theta_1 x = \\ &= A \sin(\psi - \theta_0) - \frac{1}{2} \theta_1 A^2 [\sin \theta_0 + \sin(2\psi - \theta_0)]. \end{aligned} \quad (6)$$

В (3), (5) и (6) A и φ — зависящие от времени медленно меняющиеся величины.

Уравнения установления могут быть записаны в виде

$$\frac{dA}{dt} = -\delta A - \bar{S}_1(A) A \cos \theta_0 + \frac{m\omega_0^2}{4p} A \sin 2\varphi, \quad (7)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{p^2 - \omega_0^2}{2p} - \bar{S}_2(A) \sin \theta_0 + \frac{m\omega_0^2}{4p} \cos 2\varphi, \quad (8)$$

где

$$\bar{S}_1(A) = -\delta_1 + \frac{1}{4} \delta_2 A^2 + \frac{1}{8} \delta_2 \theta_1^2 A^4 (1 + 2 \sin^2 \theta_0), \quad (9)$$

$$\bar{S}_2(A) = -\delta_1 + \frac{1}{4} \delta_2 A^2 - \frac{1}{8} \delta_2 \theta_1^2 A^4 (1 - 2 \sin^2 \theta_0). \quad (10)$$

Как видно из (7) и (9), учет параметрической и пролетной нелинейности приводит к увеличению жесткости предельного цикла за счет последнего члена в (9) и (10). Из (8) и (10) следует, что при само-модуляции пролетного угла появляется добавка в реактивную составляющую тока, знак которой меняется при $\theta_0 = 45^\circ$.

В стационарном синхронном режиме из (7) и (8) можно получить уравнение амплитудной кривой:

$$\Delta = \pm \sqrt{\left(\frac{m\omega_0^2}{4\rho}\right)^2 - [\bar{S}_1(A) - \bar{S}_1(A_{0\tau})]^2 \cos^2 \theta_0 + \bar{S}_2(A) \sin \theta_0}, \quad (11)$$

где $\Delta \cong \rho - \omega_0$.

Амплитуда автономного режима:

$$A_{0\tau}^2 = \frac{\sqrt{1 + 8\theta_1^2 (1 + 2 \sin^2 \theta_0) (\delta_1 \cos \theta_0 - \delta) / (\delta_2 \cos^3 \theta_0) - 1}}{\theta_1^2 (1 + 2 \sin^2 \theta_0)} \quad (12)$$

При $\theta_1 = 0$ из (7) и (9):

$$A_{0\tau}^2 = 4(\delta_1 - \delta / \cos \theta_0) / \delta_2 \quad (12')$$

Частота автономного режима и скелетная линия определяется из (10) и (11):

$$\Delta_{0\tau} = -\left(\delta \operatorname{tg} \theta_0 + \frac{1}{4} \delta_2 \theta_1^2 A_{0\tau}^2 \sin \theta_0\right). \quad (13)$$

Как следует из (11) и (12), при наличии самомодуляции при оптимальных значениях θ_0 ($\theta_0 = 2\pi n$; $n = 0, 1, 2, \dots$) амплитуды $A_{0\tau}$ и A существенно зависят от θ_1 . При $\theta_1 \neq 0$ в автономном режиме есть внутреннее автопараметрическое воздействие на величину как активной, так и реактивной составляющей тока. Изменение реактивной составляющей тока (10) происходит как за счет изменения амплитуды автоколебаний, так и за счет появления дополнительной составляющей, пропорциональной θ_1^2 и меняющей знак при изменении θ_0 при $\theta_0 = 45^\circ$.

Запишем амплитудное условие устойчивости:

$$A_1^2 \geq \frac{-3 \pm \sqrt{9 + 40 \cdot \theta_1^2 (1 + 2 \sin^2 \theta_0) (\delta_1 \cos \theta_0 - \delta) / (\delta_2 \cos^3 \theta_0)}}{5\theta_1^2 (1 + 2 \sin^2 \theta_0)} \geq \frac{3}{5} A_{0\tau}^2 \quad (14)$$

и фазовое (условие вертикальных касательных):

$$\Delta \ll [\bar{S}_1(A) - \bar{S}_1(A_{0\tau})] \frac{1 + 2 \sin^2 \theta_0}{2 \sin^2 \theta_0 - 1} \operatorname{ctg} \theta_0 + \bar{S}_2(A) \sin \theta_0. \quad (15)$$

Граница области фазовой неустойчивости на плоскости Δ , A^2 проходит через точки вертикальных касательных амплитудной кривой (11) и через центр амплитудной кривой с координатами $\Delta_{0\tau}$, $A_{0\tau}^2$. В случае оптимального запаздывания (15) дает просто прямую линию $A^2 = A_{0\tau}^2$.

Максимальное приращение амплитуды, вызванное слабым параметрическим воздействием, можно оценить из (11). Для $A = A_{\max}$

$$[\bar{S}_1(A_{\max}) - \bar{S}_1(A_{0\tau})] \cos \theta_0 = \frac{m\omega_0}{4}. \quad (16)$$

Поскольку $S_1(A)$ при наличии самомодуляции пролетного угла более сильно изменяется при отклонении амплитуды автоколебаний от равновесного значения A_0^2 , чем в отсутствие самомодуляции, то

$$A_{\max} \Big|_{\theta_1=0} > A_{\max} \Big|_{\theta_1 \neq 0}. \quad (17)$$

Расчет стационарных амплитуд и частот автономного и неавтономного режимов по формулам (11), (12'), (12) и (13), а также условий устойчивости (14), (15) был проведен на ЭВМ для типичных параметров в отклонительного клистрона и ЛПД. Клистронный генератор представляет собой типичную систему с мягким предельным циклом [6].

Параметры клистрона [7] при расчете: $\delta/\omega_0=0,008$; $\delta_1/\omega_0=0,024$; $\delta_2/\omega_0=0,003$ $1/\rho^2$.

ЛПД имеет постоянный угол пролета $\theta_0=60 \div 85^\circ$, определяемый его конструктивными особенностями и материалами, из которых он изготовлен. Для сравнения с клистронным генератором при расчетах имелась в виду возможность моделирования системы с параметрами ЛПД и регулируемым углом пролета. ГЛПД в типичных режимах — система с жестким предельным циклом.

Параметры ЛПД [8] для расчета: $\delta/\omega_0=0,015$; $\delta_1/\omega_0=0,15$; $\delta_2/\omega_0=0,54$ $1/\rho^2$.

На рис. 1 приведены амплитудные и частотные кривые для автономных колебаний клистрона и системы с параметрами ГЛПД. Видно, что для обоих типов приборов самомодуляция пролетного угла вызывает уменьшение амплитуды колебаний и более резкое отклонение ω от ω_0 по мере увеличения θ_0 . Генератор на ЛПД, в отличие от клистронного генератора, является системой с жестким предельным циклом, поэтому самомодуляция пролетного угла мало сказывается на амплитуде и частоте при пролетных углах меньше $50-60^\circ$. Резкое ограничение A^2/A_0^2 наблюдается у ЛПД при углах $60-85^\circ$, соответствующих реальным рабочим режимам ГЛПД. На рис. 2 приведены амплитудные кривые в области параметрической синхронизации при $\theta_0=0$, т. е. при оптимальном пролетном угле. При одной и той же глубине модуляции параметра $m/4=0,02$ отклик клистрона на внешнее воздействие при $\theta_1=0$ существенно сильнее, чем у системы с параметрами ГЛПД. Свойство жесткости предельного цикла у ГЛПД наглядно иллюстрируется этими кривыми. При $\theta_1 \neq 0$ в обоих случаях происходит искажение формы эллипса за счет уплощения верхней устойчивой его части. Нижняя часть эллипса растягивается, но незначительно, в приведенном примере этим растяжением можно пренебречь. Наиболее сильно влияет наличие самомодуляции на амплитуду в системе с мягким предельным циклом — клистроне. Одновременно с искажением верхней части эллипса происходит снижение его большой оси по оси A^2 в соответствии с зависимостью A_{0r} от θ_1 (см. рис. 1). При $\theta_0 \neq 0$ происходит заметное изменение частоты гене-

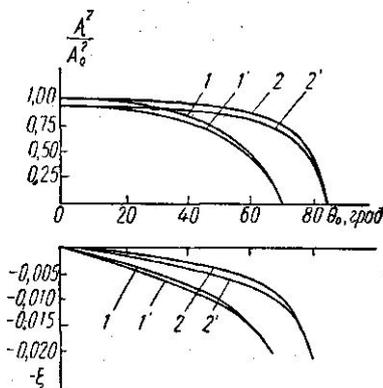


Рис. 1. Амплитуды и частоты автономных режимов: клистронный генератор $\xi = \Delta/\omega_0$ (вверху) и модель ГЛПД $\xi = 5 \Delta/\omega_0$ (внизу). 1 — $\theta_1=0, 1' - \theta_1=0,07$; 2 — $\theta_1=0, 2' - \theta_1=0,3$

ратора. На рис. 3 показаны две скелетные кривые для ГЛПД: одна для $\theta_0 > 45^\circ$, другая для $\theta_0 < 45^\circ$. Как видно из (10) и (13), скелетные кривые представляют собой отрезки парабол, отличие которых от прямых определяет нелинейная по A^2 добавка в реактивную составляющую тока, пропорциональная θ_1^2 , равная нулю при $\theta_0 = 45^\circ$ и имеющая разные знаки при $\theta_0 > 45^\circ$ и $\theta_0 < 45^\circ$.

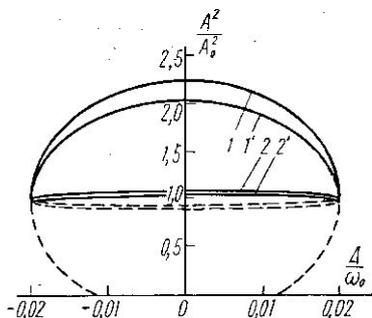


Рис. 2. Амплитудные кривые $m/4=0,02$; $\theta_0=0$. Клистрон: 1 — $\theta_1=0$, 1' — $\theta_1=0,07$. Модель ГЛПД: 2 — $\theta_1=0$, 2' — $\theta_1=0,3$ $\Delta_0=0,02 \omega_0$

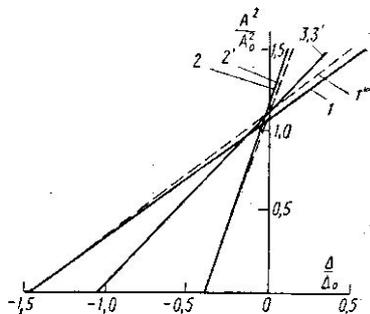


Рис. 3. Скелетные линии (модель ГЛПД): 1 — $\theta_0=75^\circ$, 2 — $\theta_0=15^\circ$, 3 — $\theta_0=45^\circ$, $\theta_1=0,3$; 1' — $\theta_0=75^\circ$, 2' — $\theta_0=15^\circ$, 3' — $\theta_0=45^\circ$, $\theta_1=0$. Δ_0 — ширина полосы синхронизации

Как показано в [2], при больших пролетных углах предельный цикл сильно смягчается, что приводит к усилению отклика системы на слабое параметрическое воздействие. Расчет, проведенный для $\theta_0=60^\circ$ и $\theta_0=75^\circ$, показывает, что самомодуляция пролетного угла при больших θ_0 заметно снижает максимальное значение амплитуды даже при малых $\theta_1 \neq 0$. Особенно сильное влияние наблюдается в системах с мягким предельным циклом. Однако, несмотря на ограничивающее действие эффекта самомодуляции, превышение амплитуды автоколебаний, вызванное сравнительно малым параметрическим воздействием ($\approx m/4=0,05$), над амплитудой автономного режима, может быть сравнимо с амплитудой автономного режима в системе без запаздывания в обратной связи (A_0) и тем более с амплитудой автономного режима в системе с запаздыванием ($A_{0\tau}$).

Очень важно также превышение амплитуды неавтономного режима при $\theta_0 \neq 0$ над амплитудой неавтономного режима при оптимальном запаздывании:

$$\beta = \frac{A_{\max}^2 \Big|_{\theta_0 \neq 0}}{A_{\max}^2 \Big|_{\theta_0 = 0}}$$

Не учитывая самомодуляцию пролетного угла ($\theta_1 = 0$), легко получить

$$\beta = 1 + \frac{m/4 - \delta}{m/4 + |\delta_0|} \left(\frac{1}{\cos \theta_0} - 1 \right), \quad (18)$$

где $\delta_0 = \delta - \delta_1$.

Отсюда видно, что при $m/4 > \delta$ с увеличением угла θ_0 растет отклик системы на параметрическое воздействие. При воздействии пере-

крываются потери в системе и при этом $\beta > 1$. При $m/4 < \delta$ отклик системы на параметрическое воздействие, увеличивающийся с увеличением θ_0 , лишь частично перекрывает потери в системе, и $\beta < 1$.

При учете самомодуляции пролетного угла величина β выразится как

$$\beta = \frac{A_{\max}^2 \left| \begin{array}{l} \theta_0 \neq 0 \\ \theta_1 \neq 0 \end{array} \right.}{A_{\max}^2 \left| \begin{array}{l} \theta_0 = 0 \\ \theta_1 = 0 \end{array} \right.}$$

Кроме того, полезно ввести величину β_1 :

$$\beta_1 = \frac{A_{\max}^2 \left| \begin{array}{l} \theta_0 \neq 0 \\ \theta_1 \neq 0 \end{array} \right.}{A_{\max}^2 \left| \begin{array}{l} \theta_0 = 0 \\ \theta_1 \neq 0 \end{array} \right.}$$

Обе эти величины зависят от параметров следующим образом:

$$\beta = \frac{\delta_2 \left[\sqrt{1 + 8\theta_1^2 (1 + 2 \sin^2 \theta_0) (m/4 - \delta + \delta_1 \cos \theta_0) / (\delta_2 \cos \theta_0) - 1} \right]}{4\theta_1^2 (1 + 2 \sin^2 \theta_0) (m/4 - \delta + \delta_1)} \quad (19)$$

$$\beta_1 = \frac{\sqrt{1 + 8\theta_1^2 (1 + 2 \sin^2 \theta_0) (m/4 - \delta + \delta_1 \cos \theta_0) / (\delta_2 \cos \theta_0) - 1}}{(1 + 2 \sin^2 \theta_0) \left[\sqrt{1 + 8\theta_1^2 (m/4 - \delta + \delta_1) / \delta_2} - 1 \right]} \quad (20)$$

Здесь налицо два противоборствующих фактора: увеличение отклика системы на параметрическое воздействие с ростом θ_0 и ограничение амплитуды за счет самомодуляции, также существенно увеличивающееся по мере увеличения θ_0 . Последнее особенно существенно для систем с мягким предельным циклом.

Тип генератора	θ_0 , град	β			β_1	
		$\theta_1=0$	$\theta_1=0,1$	$\theta_1=0,2$	$\theta_1=0,1$	$\theta_1=0,2$
Отражательный клистрон . . .	60	1,64	0,854	0,508	1,13	0,985
ГЛПД	75	1,54	1,48	1,40	1,50	1,42

В табл. приведен пример численной оценки β и β_1 для вышеупомянутых параметров клистронного генератора и ГЛПД при $m/4=0,05$.

На рис. 4 приведены амплитудные кривые при различных θ_0 для клистронного генератора (а) и модели ГЛПД (б). При этом коэффициент самомодуляции θ_1 имеет постоянную величину. Для больших углов θ_0 приведены для сравнения кривые для $\theta_1=0$. Как видно из этих графиков, ширина полосы синхронизации и пределы изменения амплитуды в области устойчивой синхронизации существенно возрастают по мере увеличения угла θ_0 даже при наличии самомодуляции

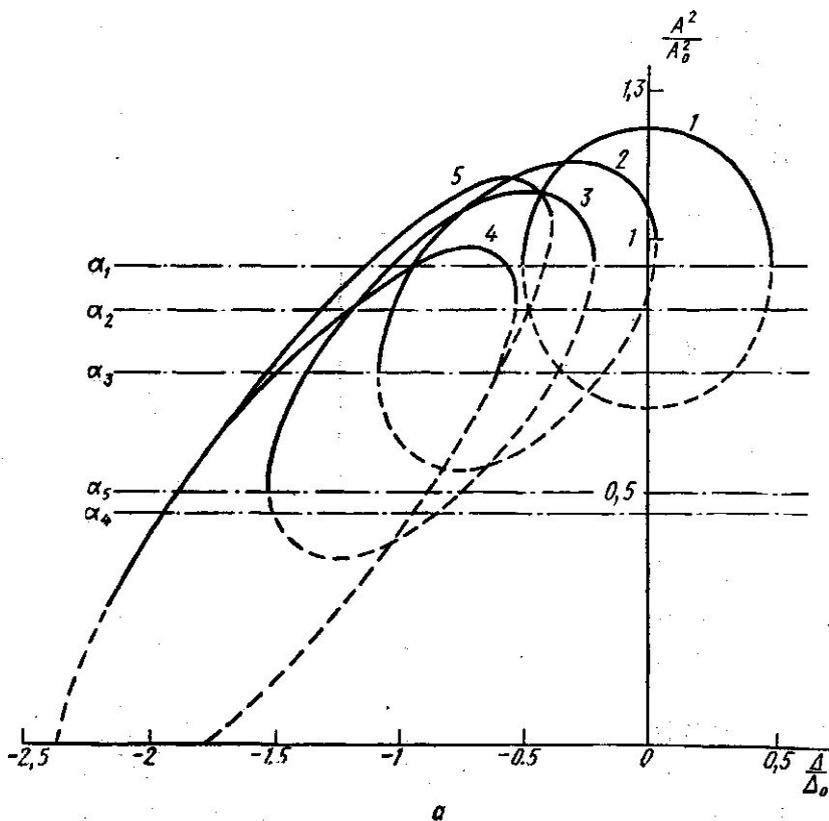


Рис. 4. Амплитудные кривые клистронного генератора (а) $a_n =$
 4 — $\theta_0 = 60^\circ$, 5 — $\theta_0 = 60^\circ$; $\theta_1 = 0$. Амплитудные кривые модели ГЛПД
 5 — $\theta_0 = 75^\circ$

пролетного угла. Границы устойчивости для малых θ_0 определяются фазовым условием, а по мере увеличения θ_0 начинает сказываться и амплитудное условие. Под шириной полосы синхронизации здесь понимается ширина полосы удержания синхронного режима, так как раскрыв области синхронизации в первом приближении не зависит от наличия запаздывания [2].

Таким образом, учет самомодуляции пролетного угла в первом приближении приводит к изменению амплитудно-частотной характеристики системы в автономном режиме, наиболее существенном при больших θ_0 . Это изменение связано с нелинейным и автопараметрическим воздействием самомодуляции, особенно сильно сказывающимся у систем с мягким предельным циклом. Отклик системы на внешнее параметрическое воздействие при самомодуляции снижается. Однако при этом основной эффект увеличения отклика при увеличении запаздывания преобладает в системах как с мягким, так и с жестким предельным циклом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бухари А. Х. Ш., Минакова И. И., Федосеев А. Г. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астроном., 13, № 4, 1972.
2. Минакова И. И., Федосеев А. Г. «Радиотехника и электроника», 18, № 11, 1973.
3. Гвоздовер С. Д. Теория электронных приборов СВЧ. М.—Л., 1956.
4. Хохлов Р. В. ЖТФ, 25, 14, 1955.
4. Тагер А. С., Вальд-Перлов В. М. Лавинно-пролетные дноды и их применение в технике СВЧ. М., 1968.
6. Мигулин В. В., Коваленко А. С. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астроном., 11, № 3, 1970.
7. Степанова Н. В. Синхронизация отражательного клистрона. Канд. дисс., 1959.
8. В. В. van Jregeп, Н. Tjassens. «Microwave j.», 15, 11, 29, 1972.

Поступила в редакцию
24.5 1974 г.

Кафедра
физики колебаний