ЛИТЕРАТУРА

1. Debye P., J. Chem. Phys., 1933, 1, p. 13.
2. Стюэр Дж., Егер Э — В сб.: Физическая акустика / Под ред У. Мэзона.— М.: Мир, 1968, 2, ч А, с. 371.
3 Исакович М. А. Общая акустика,— М: Наука, 1973
4. Измайлов Н А. Электрохимия растворов — М.: Химия, 1966.

Горьковский государственный университет

Поступила в редакцию 15 августа 1980 г.

УДК 621.391.822.3

ВЛИЯНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ АМПЛИТУДЫ И ЧАСТОТЫ НА СПЕКТР РАДИОИМПУЛЬСНОГО УМНОЖИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

А. З. Венгер, Н. И. Гаврилова, А. М. Якименко

Влияние различного рода флуктуаций на спектр радиоимпульсных последовательностей и, в частности, на выходной спектр радиоимпульсных умножителей частоты в предположении стационарности и независимости флуктуаций различных параметров импульсов исследовано достаточно полно [1-4] Между тем, на практике эти предположения не всегда правомерны. Так, при использовании для генерации радиоимпульсов ЛПД или диодов Ганна флуктуации амплитуды и частоты генерируемого колебания носят нестационарный характер, коррелированы между собой [5-8] и в ряде случаев являются определяющими.

Поэтому представляется целесообразным проанализировать влияние флуктуаций амплитуды и частоты на спектр радиоимпульсной последовательности, полагая все остальные параметры импульсов регулярными.

Рассмотрим k-ю реализацию импульсного случайного процесса $\xi^{(k)}(t)$ с детерминированным тактовым интервалом и неизменной начальной фазой радиоимпульсов:

$$\xi^{(k)}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(1 + \delta\alpha_n^{(k)}\right) U\left[(t - nT_0)/\tau_{\text{и}}\right] \exp\left[i\left(\omega_0 + \delta\omega_n^{(k)}\right)(t - nT_0)\right], \tag{1}$$

где $U(x)$ — функция, описывающая форму импульса, равная нулю вне интервала [0, 1], T_0, $\tau_{\text{и}}$, ω_0 — период следования, длительность и частота заполнения радиоимпульсов, $\delta\alpha_n^{(k)}$, $\delta\omega_n^{(k)}$ — случайные отклонения амплитуды и частоты от их средних значений

Энергетический спектр последовательности (1) в предположении малости флуктуаций частоты по сравнению с частотой генерации равен [1]

$$F(\omega) = F_{\text{н}}(\omega) + F_{\text{д}}(\omega),$$

$$F_{\text{н}}(\omega) = \left(\tau_{\text{и}}^2/T_0^2\right) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \{g\bar{g}S_\alpha(\omega - 2\pi m/T_0) + |g'|^2 \tau_{\text{и}}^2 S_\omega(\omega - 2\pi m/T_0) -$$

$$- 2\tau_{\text{и}} \operatorname{Re}\left[S_{\alpha\omega}(\omega - 2\pi m/T_0)\, \overline{g'g}\right]\}, \tag{2}$$

$$F_{\text{д}}(\omega) = 4\pi\tau_{\text{и}}^2/T_0^2 \{g\bar{g} + \sigma_\omega^2 \tau_{\text{и}}^2 \operatorname{Re}(g\bar{g}'') - B_{\alpha\omega}(0)\, \tau_{\text{и}}\, 2 \operatorname{Re}(g\bar{g}')\} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - 2\pi m/T_0).$$

Здесь

$$\frac{dg\left[\tau_{\text{и}}(\omega - \omega_0)\right]}{d\left[\tau_{\text{и}}(\omega - \omega_0)\right]} \equiv g', \qquad \frac{d^2 g\left[\tau_{\text{и}}(\omega - \omega_0)\right]}{d\left[\tau_{\text{и}}(\omega - \omega_0)\right]^2} \equiv g'',$$

$$g\left[\tau_{\text{и}}(\omega - \omega_0)\right] \equiv g,$$

$g\left[\tau_{\text{и}}(\omega - \omega_0)\right] = \int_0^1 U(y) \exp\left[-i\tau_{\text{и}}(\omega - \omega_0)\, y\right] dy$ — спектр огибающей радиоимпульса

$$\sigma_\omega^2 = \lim_{l\to\infty} \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^{l} m_1 \left\{ \delta^2\omega_m^{(k)} \right\},$$

$$B_{\alpha\omega}(p) = \lim_{l\to\infty} \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^{l} m_1 \left\{ \delta\alpha_m^{(k)}\, \delta\omega_{m+p}^{(k)} \right\},$$

σ_ω^2, $B_{\alpha\omega}(p)$ — введенные по аналогии с [9] дисперсия и взаимная функция корреляции второго рода, которые для стационарных случайных величин совпадают с дисперсией и взаимной корреляционной функцией, S_α, S_ω, $S_{\alpha\omega}$ — спектр флуктуаций амплитуды, частоты и взаимный спектр этих флуктуаций соответственно

Как было указано, при вычислении спектра (2) предполагалась малость флуктуаций частоты по сравнению с частотой генерации, что позволило функции, входящие в выражение спектра, разложить в ряд Тейлора и ограничиться членами второго порядка малости Это справедливо при $\sigma_\omega^2\, \tau_и^2 \ll 1$.

Общее выражение энергетического спектра радиоимпульсного случайного процесса (2) в данном приближении состоит из непрерывной части и дискретных спектральных линий при частотах $f = m/T_0$

Спектры модулирующих воздействий «переносятся» на каждую гармонику выходного колебания, причем член, зависящий от спектра взаимных флуктуаций амплитуды и частоты, вносит вклад того же порядка, что и остальные члены суммы. Взаимного перекрытия спектров, связанных с отдельными гармониками не будет, если верхние частоты спектров воздействий $\Omega_в$ удовлетворяют неравненству $\Omega_{в\alpha}$, $\Omega_{в\omega} \leqslant \leqslant \pi/T_0$. При отсутствии корреляции между импульсами ($\tau_к \ll T_0$) выражение для непрерывной части спектра упрощается

$$F_н(\omega) = 2\tau_и^2/T_0 \left\{ \sigma_\alpha^2 g\bar{g} + \sigma_\omega^2 \tau_и^2 |g'|^2 - 2\tau_и B_{\alpha\omega}(0)\,\mathrm{Re}\,(g'\bar{g}) \right\} \qquad (3)$$

и при заданной форме импульсов определяется только дисперсиями случайных величин и значением в нуле взаимной корреляционной функции второго рода. В качестве примера на рис 1 приведены результаты численного расчета функций $g\bar{g}$, $|g'|^2$, $\mathrm{Re}(\bar{g}g'')$, $2\mathrm{Re}(\bar{g}g')$ для радиоимпульсов с огибающей прямоугольной формы.

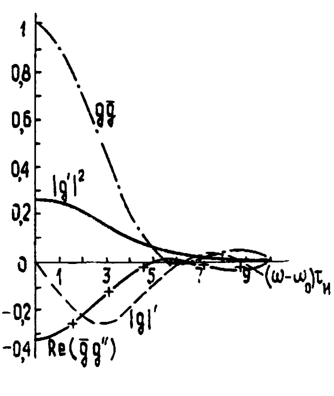

Рис. 1.

Рассчитаем далее спектральные характеристики радиоимпульсного умножителя частоты. Отношение шум/сигнал на выходе умножителя

$$\mu = \int F_н(\omega)\, |Q(\omega)|^2\, d\omega \Big/ \sum F_д(\omega)\, |Q(\omega)|^2, \qquad (4)$$

где $|Q(\omega)|^2$ — модуль передаточной функции фильтра на выходе радиоимпульсного умножителя Средняя мощность шумов на выходе полосового фильтра с $2\,\Delta_ф \leqslant \Omega = 2\pi/T_0$ и средней частотой $k\Omega \approx \omega_0$ запишется с учетом (4) в виде

$$W_н(2\Delta_ф) \approx \left(\tau_и^2\, \Delta_ф/\pi T_0 \right) \left\{ \sigma_\alpha^2\, |g(0)|^2 + \sigma_\omega^2\, \tau_и^2\, |g'(0)|^2 \right\}. \qquad (5)$$

Мощность составляющей дискретного спектра с частотой $k\Omega$ равна

$$W_д(2\Delta_ф) \approx \tau_и^2/T_0^2 \left\{ |g(0)^2| + \sigma_\omega^2\, \tau_и^2\, \mathrm{Re}\,[g(0)\overline{g''(0)}] \right\}. \qquad (6)$$

Из (5) и (6) следует, что отношение шум/сигнал на выходе фильтра имеет вид

$$\mu \approx 2\,\Delta_ф/\Omega \left\{ \sigma_\alpha^2 + \sigma_\omega^2\, \tau_и^2\, |g'(0)/g(0)|^2 \right\}. \qquad (7)$$

Теоретические расчеты удовлетворительно совпали (в пределах 10%) с экспериментальными результатами, полученными на радиоимпульсном умножителе частоты трехсантиметрового диапазона, выполненном на диоде Ганна 3А703.

Таким образом, на основе полученных в работе удобных для инженерных расчетов формул можно с высокой степенью точности рассчитать спектральные характеристики радиотехнических устройств, сигнал на выходе которых может быть представлен случайной импульсной последовательностью (1)

ЛИТЕРАТУРА

1 Левин Б Р Теоретические основы статистической радиотехники — М. Сов радио, 1966

2 Левин Б. Р, Виленчик Л. С — Радиотехника, 1970, 25, № 8, с. 18

3. Коновалов Г В, Тарасенко Е. М Импульсные случайные процессы в электросвязи — М.: Связь, 1973.
4. Григулевич В И, Иммореев И Я Радиоимпульсные преобразователи частоты.— М.: Сов. радио, 1966.
5. Венгер А. З, Ермак А. Н, Якименко А.М — ПТЭ, 1976, **6**, с 98.
6. Тагер А С, Вальд-Перлов В. М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ — М · Сов. радио, 1968
7. Левинштейн М Е, Пожела Ю К, Шур М С Эффект Ганна — М: Сов. радио, 1975
8. Thaler H., Ulrich G., Weidman G — IEEE, 1971, **TrMTT-19**, № 18, p. 692.
9. Малахов А. Н. Флуктуации в автоколебательных системах.— М: Наука, 1968.

Харьковский государственный университет

Поступила в редакцию 1 сентября 1980 г.

УДК 538 56 . 519 25

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ГЕНЕРАТОРЕ НА ДИОДЕ ГАННА

Г Н Коростелев, Е П Бочаров, А. Н Бочкарев

Интенсивные шумовые колебания в диодах Ганна, возникающие на начальном отрезке падающего участка N-образной вольт-амперной характеристики были впервые обнаружены в [1]. При этом исследования проводились в низкочастотной области (до 30 *МГц*), а в качестве нагрузки диода использовалось омическое сопротивление. Позднее в [2] было проведено численное решение системы уравнений, описывающих поведение доменов электрического поля в диоде Ганна, результаты которого привели автора к выводу об автостохастической природе данного явления. В работе [3] экспериментально обнаружены шумовые колебания в лабораторных образцах диодов Ганна с S-образной вольт-амперной характеристикой.

В настоящей работе рассматриваются автоколебательные режимы генератора на типовом диоде Ганна, помещенном (в отличие от [1]) в СВЧ колебательную систему, причем внимание уделено вопросам, не затронутым в [1, 3], а именно выявлению типичных для автостохастичности признаков, а также характера бифуркаций, предшествующих возникновению монохроматического режима

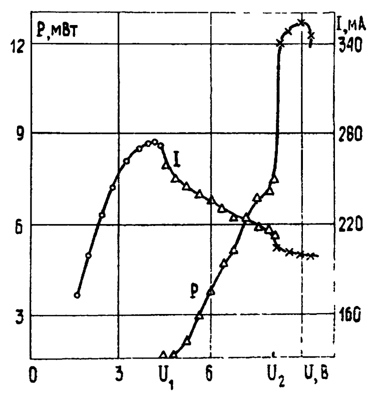

Рис. 1.

Исследовался генератор обычной волноводной конструкции, активным элементом которого являлся типовой диод Ганна, помещенный между широкими стенками. Настройка осуществлялась с помощью подвижного поршня. Вольт-амперная характеристика $I(U)$ и соответствующая зависимость генерируемой в сантиметровом диапазоне мощности от приложенного к диоду статического напряжения приведены на рис 1 (кружки — колебания отсутствуют, треугольники — интенсивные шумовые колебания, крестики — монохроматические колебания). При напряжениях, меньших порогового ($U < U_1 = 4{,}5$ *В*), колебания отсутствуют. При $U = U_1$ начинается падающий участок вольт-амперной характеристики (это соответствует, как известно, возникновению отрицательного сопротивления в диоде), ток уменьшается скачком, и возникают колебания мощностью 1,5 *мВт* Эти колебания характеризуются сплошным шумоподобным спектром, представленным на рис 2 (развертка логарифмическая).

С ростом напряжения мощность шумовых колебаний увеличивается, каких-либо качественных изменений в спектре сигнала при этом не происходит При $U = U_2 = 8{,}2$ *В* наблюдается еще одно скачкообразное уменьшение тока и увеличение высокочастотной мощности, сопровождающее возникновение очень неустойчивого режима многочастотных (по всей видимости — автомодуляционных) колебаний, сменяющегося одночастотным при незначительном увеличении напряжения Частота монохроматических колебаний мало отличается от центральной частоты спектра шумоподобных