01;09

Возбуждение потенциально автоколебательного состояния в генераторе с запаздыванием и инерционностью при одновременном воздействии регулярного и хаотического сигналов

© *Э.В. Кальянов*

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино

Поступило в Редакцию 24 марта 1997 г.

Применительно к скрытной передаче информации в двоичной системе исчисления рассмотрена возможность стимулирования потенциально автоколебательного состояния в бистабильной автоколебательной системе при одновременном воздействии регулярного и хаотического сигналов. Приведена система нелинейных дифференциально-разностных уравнений, описывающая поведение генератора с запаздыванием и инерционностью при воздействии сложных колебаний в заданном интервале времени. Численными методами показано, что даже при отсутствии возбуждения потенциально автоколебательного состояния внешним регулярным сигналом стохастические колебания могут, наряду с маскирующим действием, выполнять роль дополнительного стимула для перевода системы в бассейн притяжения потенциально автоколебательного аттрактора.

В последнее время широко исследуются различные способы передачи сигнала при его маскировке хаотическими колебаниями [1–6]. В связи с тем, что возможно использование бистабильных генераторов сверхвысоких частот для передачи информации в двоичной системе исчисления [7], представляется целесообразным исследование возможности стимулирования в таких генераторах переходов из одного устойчивого состояния в другое слабым регулярным сигналом в присутствии маскирующего шума.

Для генераторов сверхвысоких частот характерно наличие запаздывания и инерционности. В настоящей работе приведены результаты численного анализа воздействия внешнего регулярного сигнала на автоколебательную систему с инерционностью и запаздыванием, находящуюся в шумовой среде. При численном анализе рассмотрены уравнения

$$\frac{d^2x_i}{dt^2} + \frac{\omega_i}{Q_i}\frac{dx_i}{dt} + \omega_i^2 x_i = \omega_i^2\left(\frac{1}{\sigma_i}\frac{d}{dt}F_i(y_i) + K_j f(t)\right),$$

$$\delta_i\frac{dy_i}{dt} + y_i = x_i(t - \tau_i), \tag{1}$$

$$f(t) = D\,(1 + \mathrm{th}(t - t_0))\,(1 - \mathrm{th}(t - (t_0 + T_0))\varphi(t)),$$

$$\varphi(t) = Cx_2(t) + A_c\cos(\omega_c t),$$

где $i,\ j = 1,\ 2$ при $i \neq j$, $k_i = 0$, $k_2 = 1$.

Система нелинейных дифференциально-разностных уравнений (1) описывает исследуемый, первый ($i = 1$) генератор, на который в заданном интервале времени T_0 наряду с внешним гармоническим сигналом воздействуют колебания другого, второго ($i = 2$) генератора. Каждый генератор состоит из замкнутых в кольцо нелинейного усилителя, фильтров первого и второго порядков, линии задержки и дифференцирующего элемента. Обозначения имеют следующий смысл: x_i, y_i — переменные, зависящие от времени t, и характеризующие колебательные процессы в генераторах; ω_i, Q_i — частоты и добротности фильтров второго порядка; δ_t, δ_i — постоянные времени фильтров первого порядка и дифференцирующих элементов соответственно; $F_i(y_i)$ — характеристики нелинейных усилителей; τ_i — времена задержки сигналов; A_c, ω_c — амплитуда и частота внешнего гармонического сигнала; C — коэффициент, определяющий уровень воздействия колебаний второго генератора; D — постоянный коэффициент; t_0 — момент начала воздействия.

Расчеты проведены методом Рунге–Кутта–Мерсона 4-го порядка с шагом интегрирования по времени, равным 0.05, при аппроксимировании характеристик нелинейных усилителей выражением

$$F_i(y_i) = B_i\sigma_i\exp(-y_i^{ni}), \tag{2}$$

где B_i, ni — параметр усиления и степень нелинейности.

Параметры в соотношениях (1) и (2) выбраны так, что первый генератор работает в бистабильном режиме, а второй — в хаотическом.

Величины этих параметров равны; $\omega_1 = \omega_2 = 1$, $Q_1 = Q_2 = 2$, $\delta_1 = \delta_2 = 0.1$, $\tau_1 = 9.25$, $\tau_2 = 9.5$, $B_1 = 1.6$, $B_2 = 4$, $ni = 2$, $n2 = 6$.

При выбранных параметрах исследуемого генератора автономно колебания в нем возбуждаются в бассейне притяжения высокочастотного аттрактора (аттрактора H) на частоте $\omega_h = 1.26$, а на частоте $\omega_i = 0.76$ (низкочастотный аттрактор L) они являются потенциально автоколебательными. Воздействие внешнего сигнала позволяет осуществлять управление возбуждением колебаний. Это управление проявляется в стимулировании перехода колебаний из бассейна притяжения аттрактора H в бассейн притяжения аттрактора L и обратно. Как выяснено, оно возможно при воздействии наряду с регулярным сигналом более интенсивных хаотических колебаний, причем даже в случае, когда воздействие только регулярных колебаний не обеспечивает возбуждения потенциально автоколебательного состояния системы. Это иллюстрируется реализациями рис. 1, 2.

На рис. 1 приведены реализации, иллюстрирующие поведение колебательного процесса $x_1\ (t)$ при воздействии внешнего сигнала $f(t)$, когда последний представляет собой либо только регулярные колебания (рис. $1, a$), либо только хаотические колебания (рис. $1, b$), либо сумму регулярных и хаотических колебаний (рис. $1, a$). Реализации соответствующих воздействующих колебаний приведены на рис. $2, a$–c. Параметры, определяющие воздействующие колебания, в случае рис. $1, a, 2, a$ имеют значения $A_c = 0.2$, $\omega_c = 0.76$, $C = 0$, в случае рис. $1, b, 2, b$ — $A_c = 0$, $C = 0.8$ и в случае рис. $1, c, 2\,c$ — $A_c = 0.2$, $\omega_c = 0.76$, $C = 0.8$. Во всех трех случаях $D = 0.25$, $T_0 = 120$, $t_0 = 900$.

В интервале времени $t \in (870;\ 900)$ (до воздействия) имеют место регулярные автономные колебания $x_1(t)$ частоты $\omega_h = 1.26$ с простым предельным циклом в бассейне притяжения аттрактора H. При внешнем воздействии (в интервале времени $t \in (900;\ 1020)$) возникает переходный процесс, продолжающийся и после прекращения воздействия. В результате, в случаях рис. $1, a, b$ колебания $x_1(t)$ остаются в бассейне притяжения H, а в случае рис. $1,$ *в* — попадают в бассейн притяжения аттрактора L. В последнем случае частота колебательного процесса $x_1(t)$ после окончания воздействия стремится к значению $\omega_l = 0.76$ и это можно рассматривать как процесс запоминания системой частоты регулярной составляющей воздействующих колебаний, так как $\omega_l = \omega_c$.

Колебания $x_2(t)$ в интервале времени $t \in (900;\ 1020)$ достаточно хорошо выполняют роль колебательного процесса, маскирующего регу-

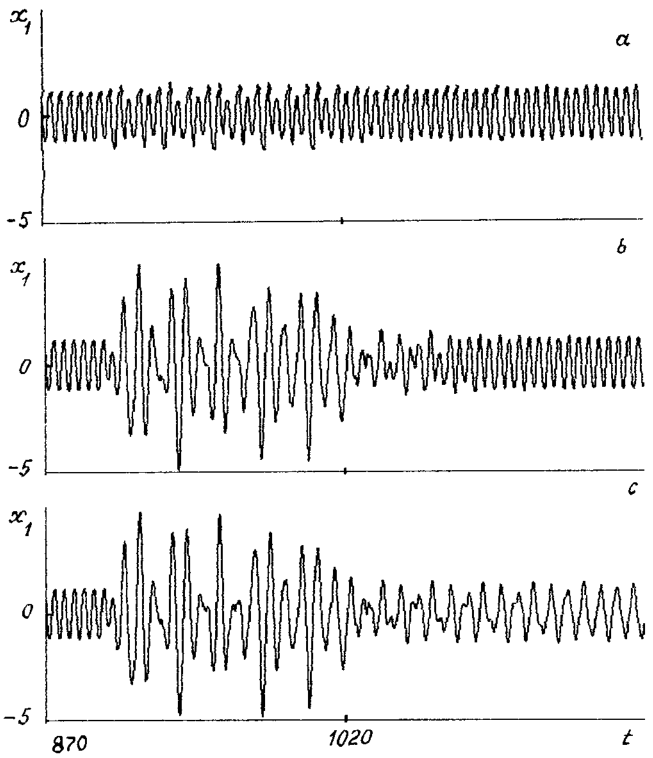

Рис. 1. Реализации колебаний генератора при воздействии только регулярного сигнала (a), при воздействии только хаотических колебаний (b) и при одновременном воздействии регулярного и хаотического сигналов (c).

лярный сигнал в этом же интервале времени. Из сравнения реализаций рис. 2 видно, что амплитуда регулярных колебаний (рис. $2, a$) на порядок меньше максимальных отклонений хаотического колебательного процесса $x_2(t)$ (рис. $2, b$). Поэтому реализация суммарных колебаний имеет вид стохастического сигнала (см. рис. $2, c$) и почти не отличается от реализации рис. $2, b$.

Хаотические колебания в случае рис. $1, c$ кроме роли маскирующего сигнала выполняют функцию источника дополнительного стимула, по-

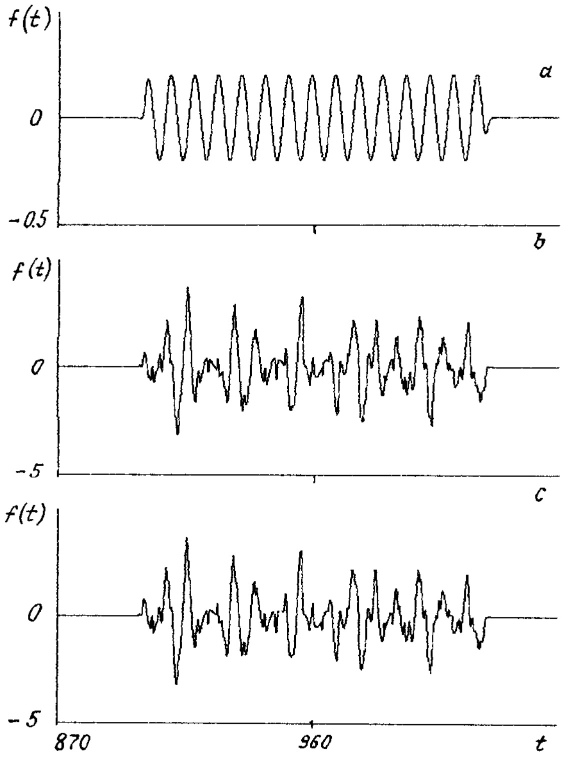

Рис. 2. Реализации воздействующих колебаний: *a* — регулярные колебания, *b* — хаотические колебания, *c* — суммарные колебания регулярного и хаотического сигналов.

скольку без них нет перехода системы в бассейн притяжения аттрактора L. При большей величине амплитуды колебаний регулярного сигнала (например, при $A_c = 0.4$) переход системы в бассейн притяжения аттрактора L возможен и при $C = 0$. Однако маскирующая роль стохастических колебаний сохраняется.

Результаты приведенных расчетов свидетельствуют о принципиальной возможности осуществления скрытной передачи информации, когда эффект стимулирования потенциально автоколебательного состояния системы достигается путем одновременного воздействия регулярного и хаотического сигналов. Следует отметить, что этот эффект может зависеть от длительности воздействия. Этот вопрос не изучен и представляет самостоятельный интерес. Влияние длительности воздействия на бистабильную автоколебательную систему рассмотрено лишь применительно к случаю регулярных воздействий в работе [8], в которой показано, что поведение системы нетривиальным образом зависит от длительности внешнего радиоимпульса.

Список литературы

[1] *Kocarev L.J., Halle K.S., Eckert K., Chua L.O.* // Int. J. Bifurcation and Caos. 1992. V. 2. N 3. P. 709–713.
[2] *Волковский А.Р., Рульков Н.Ф.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 3. С. 71–75.
[3] *Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С.* // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. В. 7. С. 1310–1315.
[4] *Кислов В.Я.* // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. В. 10. С. 1793–1815.
[5] *Козлов А.К., Шалфеев В.Д.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 23. С. 82–85.
[6] *Козлов А.К.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 17. С. 65–69.
[7] *Голант М.Б., Гуляев Ю.В., Гриценко А.В.* и др. // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36. В. 3. С. 501–511.
[8] *Кальянов Э.В., Старков С.О.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 23. С. 49–51.