

01;09;12

## **Автостохастическая система связанных генераторов сверхвысоких частот**

© Р.В. Беляев, Э.В. Кальянов, В.Я. Кислов,  
Б.Е. Кяргинский, М.Н. Лебедев

Институт радиотехники и электроники РАН (Фрязинская часть)

Поступило в Редакцию 25 ноября 1998 г.

Приведены уравнения системы связанных генераторов с учетом в каждом парциальном генераторе инерционности и запаздывания в обратной связи. Учтено также запаздывание в элементах связи между генераторами. Выполнен численный анализ динамики одного, двух и трех генераторов. Показано, что хаотизация колебаний облегчается в связанной системе двух и трех генераторов по сравнению со случаем одиночного генератора. Это подтверждено результатами эксперимента на транзисторных генераторах сверхвысоких частот. Установлено, что в системе трех связанных транзисторных генераторов можно получить шумовые колебания в широком диапазоне частот сантиметрового диапазона длин волн.

Известные исследования связанных автостохастических систем носят в основном характер изучения физики процессов [1–5], а эксперименты проводятся в области низких частот [2,5]. В то же время динамический хаос представляет интерес для практики, в частности, для применения в системах связи [6,7]. Особый интерес для систем связи представляют хаотические сигналы сверхвысоких частот с большой размерностью [8]. Формирование таких сигналов представляется возможным при использовании современных достижений в области твердотельной электроники, связанных с продвижением транзисторов в область сверхвысоких частот. Это делает целесообразными исследования возможности создания широкополосных автостохастических генераторов на сверхвысоких частотах. В настоящей работе рассматривается транзисторный генератор сверхвысоких частот на основе трех связанных автоколебательных систем. Исследуется математическая модель, по возможности адекватно отражающая специфику связанных генераторов на сверхвысоких частотах, и приводятся результаты экспериментальной

автостохастической системы трех связанных транзисторных генераторов.

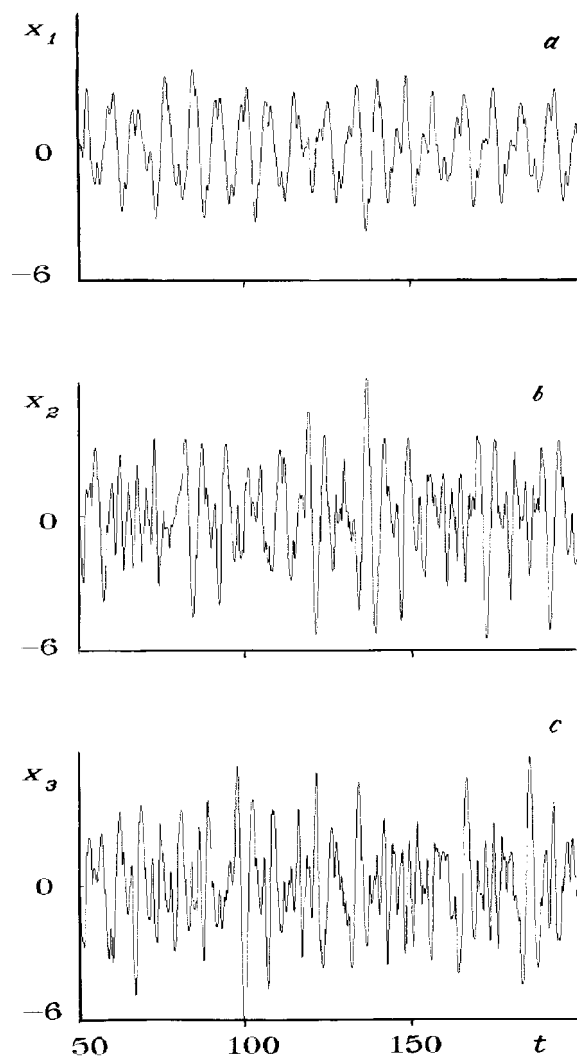
Уравнения системы многих связанных генераторов с запаздыванием и инерционностью с учетом запаздывания по связи можно, учитывая лишь емкостную связь, представить следующим образом:

$$\ddot{x}_i + \frac{\omega_i}{Q_i} \dot{x}_i + \omega_i^2 x_i = \omega_i^2 \left\{ B_i [1 - (1 - n_i) y_i^{n_i}] \right. \\ \left. \times [x_i(t - \tau_i) - y_i] \delta_i^{-1} (1 + y_i^{n_i})^{-2} + \sum_{j, j \neq i} C_{ji} x_j(t - T_{ji}) \right\}, \\ \delta_i \dot{y}_i + y_i = x_i(t - \tau_i),$$

где  $i, j = 1, 2, \dots, k$ ,  $k$  — число парциальных генераторов. Каждый парциальный генератор состоит из замкнутого в кольцо нелинейного элемента, фильтра первого порядка, линии задержки, фильтра второго порядка и дифференцирующего элемента. При этом обозначения имеют следующий смысл:  $\delta_i$  — постоянная времени фильтра первого порядка,  $\tau_i$  — запаздывание в цепи обратной связи,  $\omega_i$  и  $Q_i$  — резонансная частота и добротность фильтра второго порядка.  $C_{ji}$  — коэффициенты связи,  $T_{ji}$  — время запаздывания по связи,  $B_i, n_i$  — постоянные коэффициенты, определяющие усиление в кольце парциального генератора и его нелинейность соответственно. Точкой обозначено дифференцирование по времени.

В соответствии с проводившимся экспериментом ограничимся случаем, когда парциальные генераторы различаются лишь значениями собственных частот колебательных систем и параметров усиления. Остальные параметры предполагаются одинаковыми, так что  $C_{ji} = C$ ,  $Q_i = Q$ ,  $T_{ji} = \tau_i = \tau$ ,  $n_i = n$ ,  $\delta_i = \delta$  (при максимальном значении  $k = 3$ ). При этом параметры  $Q, n$  и  $\delta$  предполагаются равными  $Q = n = 4$ ,  $\delta = 0.1$ .

В случае одного генератора ( $k = 1$ ) колебательный процесс  $x(t)$  существенно зависит от времени задержки  $\tau$ . Так, при резонансной частоте  $\omega = 1$  в интервале изменения параметра усиления  $B \in [0, 6]$  при величине  $\tau = 1.25$  существуют лишь регулярные колебания. Возбуждение колебаний (с однооборотным предельным циклом) происходит при  $B = 1.2$ . В случае большей задержки ( $\tau = 2$ ) при  $B > 4.4$  возникают хаотические колебания. При этом возбуждение колебаний происходит



**Рис. 1.** Реализации колебательных процессов в парциальных генераторах для случая одновременного включения трех связанных генераторов: *a* — первый генератор, *b* — второй генератор, *c* — третий генератор.

сразу (при  $B = 2.2$ ) на основе трехоборотного предельного цикла, минуя режим однотоктных колебаний.

В случае двух связанных генераторов характер колебаний зависит от величины параметра связи. При резонансных частотах  $\omega_1 = 1$ ,  $\omega_2 = 2$  и параметрах усиления  $B_1 = B_2 = 5$  переход к хаотическим колебаниям при  $\tau = 1.25$  происходит, когда параметр связи достигает значения  $C = 0.2$ . В случае  $\tau = 2$ , когда автономно в парциальных генераторах имеет место хаотический режим, увеличение связи между генераторами приводит к изменению характера хаотических колебаний.

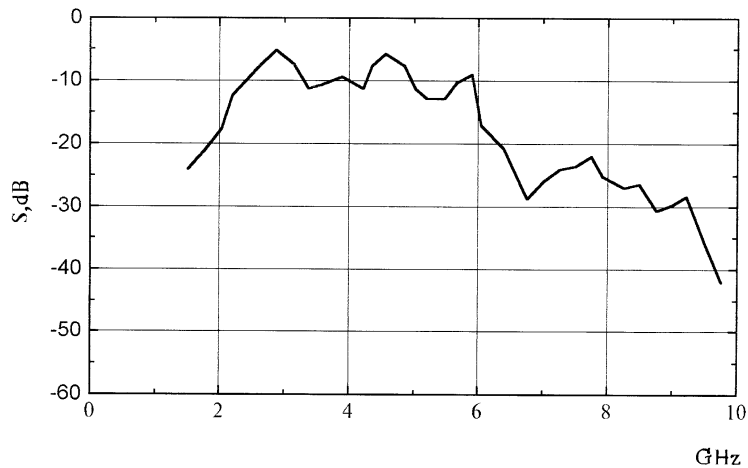
При совместной работе трех генераторов, различающихся значениями собственных частот парциальных колебательных систем ( $\omega_1 = 1$ ,  $\omega_2 = 1.3$  и  $\omega_3 = 1.1$ ), величина параметра связи при  $\tau = 1.25$ ,  $B_1 = B_2 = B_3 = 5$ , соответствующая хаотизации колебаний, меньше, чем в случае двух генераторов. При  $\tau = 2$  также сохраняется хаотический режим.

На рис. 1 приведены реализации колебательных процессов  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  и  $x_3(t)$ , полученные при режиме, определяемом значением  $C = 0.2$  при  $\tau = 2$ . Из реализаций рис. 1 следует, что колебательные процессы в различных парциальных генераторах не синхронизированы. При этом видно также, что "средние" частоты хаотических колебаний различны и увеличиваются в соответствии со значениями собственных частот парциальных колебательных систем.

Приведенный численный анализ свидетельствует о том, что с увеличением числа взаимодействующих парциальных генераторов возможно получение более "развитых" хаотических движений и это, при практической реализации системы из нескольких связанных генераторов, позволяет ожидать возможность получения устойчивых режимов широкополосных хаотических колебаний.

Экспериментальное исследование физической модели в сантиметровом диапазоне проводилось с использованием сверхвысокочастотных биполярных транзисторов и стандартной микрополосковой техники. Сверхвысокочастотная схема включала три связанных генератора, отличившихся только своими рабочими частотами. Колебательная система каждого генератора представляла собой отрезки микрополосковых линий. В качестве управляющего параметра при экспериментах выбрано напряжение коллектор-база транзисторов  $U_{k-b}$ .

Экспериментально установлено, что с увеличением числа включенных генераторов от одного до трех увеличивается ширина зоны изменения управляющего параметра, в пределах которой реализуется режим



**Рис. 2.** Изменение спектральной плотности мощности генерируемых хаотических колебаний в зависимости от частоты.

генерации хаотических колебаний. При этом наблюдается снижение неравномерности спектральной плотности мощности ( $S$ ) генерируемых хаотических колебаний и расширение спектра.

На рис. 2 приведен спектр генерируемых системой колебаний в сантиметровом диапазоне. Неравномерность спектральной плотности мощности шума в полосе 2–6 GHz составляет  $\sim 15$  dB.

Результаты экспериментальных исследований находятся в соответствии с теоретическими исследованиями. На основе трех связанных генераторов создана автостохастическая система, устойчиво работающая в режиме генерации шума.

Приведенная в работе математическая модель системы связанных генераторов позволяет учесть специфику генераторов сверхвысоких частот. Как в математической, так и в физической моделях хаотизация колебаний в связанной автоколебательной системе облегчается с повышением степени связи и с увеличением запаздывания в цепях обратной связи парциальных генераторов. Система трех связанных генераторов позволяет осуществить устойчивые режимы хаотических колебаний, которые не критичны к изменениям параметров.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 98-02-16722).

## Список литературы

- [1] *Афраймович В.С., Веричев Н.Н., Рабинович М.И.* // Известия вузов. Радиофизика. 1986. Т. XXIX. № 9. С. 1050–1960
- [2] *Кальянов Э.В., Лебедев М.Н.* // РЭ. 1985. № 8. С. 1570–1576.
- [3] *Астахов В.В., Сильченко А.Н., Срежкова Г.И.* и др. // РЭ. 1996. Т. 41. № 11. С. 1323–1331.
- [4] *Кальянов Э.В.* // РЭ. 1996. Т. 41. № 5. С. 575–582.
- [5] *Анищенко В.С., Сильченко А.Н., Хованов И.А.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 7. С. 22–30.
- [6] *Кислов В.Я.* // РЭ. 1993. Т. 38. № 10. С. 1783–1815.
- [7] *Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О.* // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 10. С. 4–26.
- [8] *Кислов В.Я., Кислов В.В.* // РЭ. 1997. Т. 42. № 8. С. 982–973.