

01;09
©1995КАСКАДНЫЙ ГЕНЕРАТОР
С ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ

Э.В.Кальянов

Возможность генерирования шума динамическими системами в последнее время хорошо известна, и они находят различные применения. Попытки создания генератора шума на основе автоколебательных систем (магнетронов циклотронных колебаний) были предприняты еще в пятидесятых годах [1]. Однако пригодные для практики генераторы шума созданы в шестидесятых годах на основе ламп бегущей волны (ЛБВ) коллективом под руководством В.Я. Кислова и широко исследовались по настоящее время как теоретически, так и экспериментально с позиций динамической природы хаоса [3-10]. В предложенном в [2] генераторе процессы генерации шума рассматривались авторами как усиление собственных флуктуаций.

При широком практическом использовании наиболее эффективная схема генератора с хаотической динамикой, содержащего две ЛБВ (так называемого шумотрона [11]), в двухкаскадном варианте теоретически не исследовалась. При этом полагалось, что основные процессы аналогичны наблюдающимся в однокаскадном варианте и крутизна падающей характеристики нелинейного элемента выбиралась по возможности большей. В настоящей работе проведен теоретический анализ двухкаскадного генератора с хаотической динамикой, которым можно приближенно моделировать шумотрон. Показано, что повышение крутизны характеристики первого каскада, определяющего основные процессы при хаотизации колебаний, вместо ожидаемого эффекта усложнения колебаний может вызывать явление дестохастизации.

Представляя каскадный генератор в виде замкнутого в кольцо двух нелинейных усилителей, каждый из которых содержит нелинейное устройство, фильтр первого порядка, линию задержки и направленный ответвитель, можно записать

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) + r_i x_i(t) &= q_j r_j y_j(t - T_i), \\ y_j(t) &= F_j[x_j(t)], \end{aligned} \quad (1)$$

где $x_i(t)$, $y_j(t)$ — колебательные процессы на входе и выходе i -го нелинейного усилительного элемента; $i, j = 1, 2$ при $i \neq j$; $r_i = 1/p_i$, p_i — постоянная времени фильтра

первого порядка (i -го каскада); T_i — запаздывание в линии задержки; $F_j[x_j(t)]$ — характеристика нелинейного устройства; q_j — коэффициент ответвления направленного ответвителя, имеющего коэффициент пропуска сигнала в полезную нагрузку $s_j = 1 - q_j$; точкой обозначено дифференцирование по времени t .

При численном анализе нелинейное устройство аппроксимировалось с помощью унимодальной функции [12]

$$F_i(x_i) = G_i x_i (1 + x_i^{n_i})^{-1}, \quad (2)$$

где G_i , n_i — параметр усиления и параметр нелинейности соответственно.

При расчетах полагалось, что в качестве хаотизирующего каскада служит первый усилитель, а в качестве выходного — второй. Для эффективной работы каскадного генератора шума необходимо, чтобы выходной каскад работал с большим коэффициентом усиления при возможно малом ответвлении сигнала в цепь обратной связи, но в то же время достаточным для осуществления режима стохастизации. Поэтому выбраны следующие значения параметров: $q_1 = 1$, $q_2 = 0.1$, $G_1 = 1$, $G_2 = 40$, $r_1 = r_2 = 8$. Параметр нелинейности выходного каскада полагался равным $n_2 = 4$, что соответствует значению отношения максимальной крутизны падающего участка характеристики к крутизне нарастающего его участка, равному — 0.56. Значение параметра n_1 изменялось. При этом использовалось также различное запаздывание T в линиях задержки (при $T_1 = T_2 = T$).

Расчеты проводились методом Рунге-Кутты-Мерсона 4-го порядка с шагом интегрирования по времени 0.01 при значениях всех переменных в начальный момент времени $t = 0$, равных 0.1.

На рис. 1 приведены бифуркационные диаграммы, иллюстрирующие изменение максимальных значений колебательного процесса $y_2(t)$ на выходе второго каскада генератора (обозначено $[y_2]$) в зависимости от параметра нелинейности первого каскада. Рис. 1, а получен при задержке $T = 0.4$, а рис. 1, б — при $T = 0.8$. Изменению параметра n_1 от 1 до 10 соответствует изменение отношения максимальной крутизны падающего участка к крутизне нарастающего участка в интервале $(0, -2.02)$. Промежуточные значения этого отношения при величинах $n_1 = 2, 4, 6, 8$ соответственно равны $-0.12, -0.56, -1.04, -1.52$. Видно, что при $T = 0.4$ колебания возбуждаются при достижении параметром нелинейности значения $n_1 = 3.5$. При $n_1 = 5.1$ колебания хаотизируются. Однако при $n_1 > 7$ возникает дестохастизация и колебания становятся пятитактными. Аналогичный процесс дестохастизации наблюдается при запаздывании, равном $T = 0.8$, но детерминированные движения являются более сложными. При этом несколько шире область хаотических колебаний.

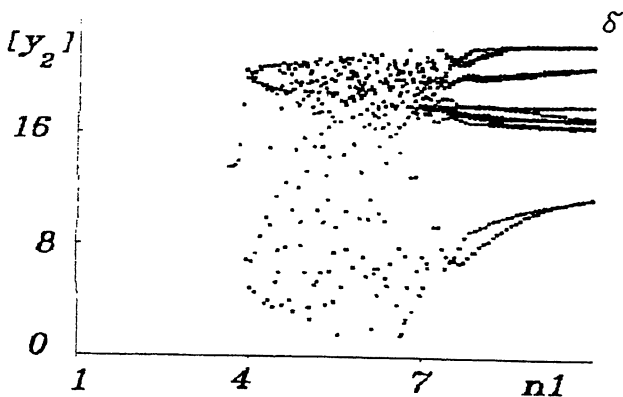
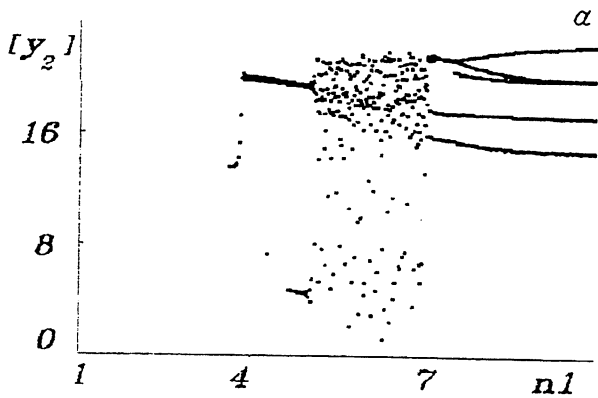


Рис. 1. Бифуркационные диаграммы при различных задержках: а — $T = 0.4$; б — $T = 0.8$.

Следует заметить, что при обратном изменении (уменьшении) параметра нелинейности от 10 до 1 бифуркационные диаграммы приобретают иной вид — проявляется гистерезис. Так, при $T = 0.4$ в отличие от рис. 1, а интервал значений $n1$, которому соответствует хаотический режим, смещается в область меньших величин $n1$ ($n1 \in (5.1, 6.7)$). При этом минимальная величина $n1$, соответствующая генерации однократных колебаний, становится равной $n1 = 2.6$.

Дестохастизация при изменении параметра нелинейности $n1$ от 0 до 10 не наблюдается при $T > 1.8$; так, в случае $T = 2$ при достижении значения $n1 = 4.3$ сразу возбуждаются хаотические колебания, сохраняющиеся до величины $n1 = 10$.

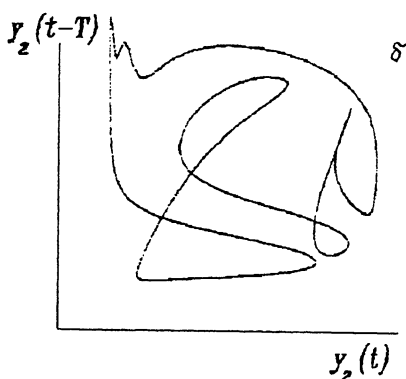
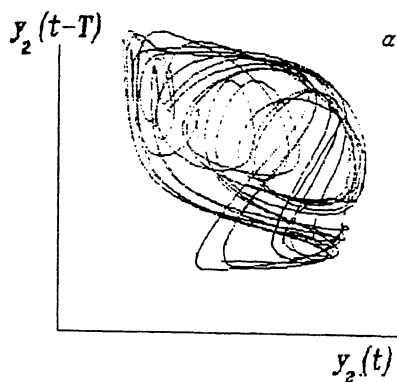


Рис. 2. Проекция аттракторов колебаний при хаотическом режиме (а) и при дестохастизации (б).

На рис. 2 приведены проекции аттракторов на плоскость $y_2(t)$, $y_2(t-T)$, иллюстрирующие хаотические и детерминированные колебания на выходе второго каскада при значениях параметра нелинейности $n_1 = 6$ (рис. 2, а) и $n_1 = 9$ (рис. 2, б). Проекция аттракторов получены в интервале времени $t \in (50, 70)$ при задержке, соответствующей режиму рис. 1, а. Рис. 2, а отображает сложное движение стохастическим множеством, а рис. 2, б — пятитактные колебания.

Приведенные результаты, полученные при различных величинах крутизны падающего участка нелинейной характеристики первого каскада генератора, показывают, что нельзя достичь устойчивого режима хаотических колебаний только путем увеличения этой крутизны. Важное значение имеет правильное сочетание величин параметра нелинейности и запаздываний в цепях обратной связи.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 95-02-04300).

Список литературы

- [1] Филиппов М.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1958. Т. 1. № 3. С. 143-146.
- [2] Ries C.A., Zellers J.E. // Pat. 3178655 (US). Filed 16. 11. 61, N 152883; Publ. 13.04.65. Kl. 331-78.
- [3] Кислов В.Я., Залогин Н.Н., Мясин Е.А. // РЭ. 1979. Т. 24. № 6. С. 1118-1130.
- [4] Кислов В.Я. // РЭ. 1980. Т. 25. № 8. С. 1683-1690.
- [5] Дитяр В.Б., Старков С.О. // РЭ. 1982. Т. 27. № 12. С. 2557-2463.
- [6] Анисимова Ю.В., Дмитриев А.С., Залогин Н.Н. и др. // Письма ЖЭТФ. 1983. Т. 37. № 8. С. 387-389.
- [7] Кац В.А. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 11. С. 684-689.
- [8] Кац В.А., Трубецков Д.И. // Письма ЖЭТФ. 1984. Т. 39. № 3. С. 116-119.
- [9] Манькин И.А., Школьников В.Г. // РЭ. 1984. Т. 29. № 2. С. 307-313.
- [10] Кац В.А., Кузнецов С.П. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 12. С. 727-733.
- [11] Мясин Е.А., Кислов В.Я., Богданов Е.В., // Заявка № 964513/19-09 от 31.07.68. А.с. 1125735 МКИ НОЗ В 29/00.
- [12] Гласс Л., Мэки М. От часов к хаосу. Ритмы жизни. М.: Мир, 1991. 248 с.

Поступило в Редакцию
19 июля 1995 г.
