

01;09

Синхронизация автостохастических систем импульсным сигналом

© В.В. Рождественский, Ю.В. Рождественский

Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Поступило в Редакцию 16 февраля 1997 г.

В работе с помощью натурального эксперимента показано, что причиной синхронизации гладких потоков является наличие устойчивых фрагментов на их траекториях.

Явление синхронизации как переход от режима хаотических колебаний к режиму периодических колебаний, когерентных периодическому внешнему сигналу, рассматривалось многими авторами (обзор работ по этому вопросу имеется, например, в [1]). Вместе с тем оставались невыясненными причина и механизм этого явления. В наших работах [2,3] мы теоретически и численно показали, что причиной синхронизации гладких отображений является наличие устойчивых фрагментов на их траекториях и высказали гипотезу, что у гладких отображений такие фрагменты существуют. В этой работе мы с помощью натурального эксперимента покажем, что аналогичный механизм синхронизации возможен и в случае гладких потоков.

Исследуемая система представляла собой радиофизический генератор автостохастических колебаний [4], схема которого представлена на рис. 1, а. На этом рисунке: 1 — фазоинвертер, 2 — нелинейный безынерционный элемент, 3 — буферный каскад, 4 — фильтр нижних частот, 5 — вход внешнего сигнала, 6 — выход, $C = 1000$ пФ, $R_1 = 825$ Ом, $R_2 = 500$ Ом, $R_3 = 18$ Ом, $R_4 = 160$ Ом. Каскад 2 — двухтактный, собран на двух полевых транзисторах КП103М, его характеристика изображена на рис. 1, б. ФНЧ4 — шестизвенный LC-фильтр с П-образными звеньями, характеристическим сопротивлением 1330 Ом и частотой среза 85 кГц.

В состав экспериментального стенда помимо обычного набора приборов входила персональная ЭВМ с аналого-цифровой платой L-1230. Максимальная частота оцифровки аналогового сигнала составляла

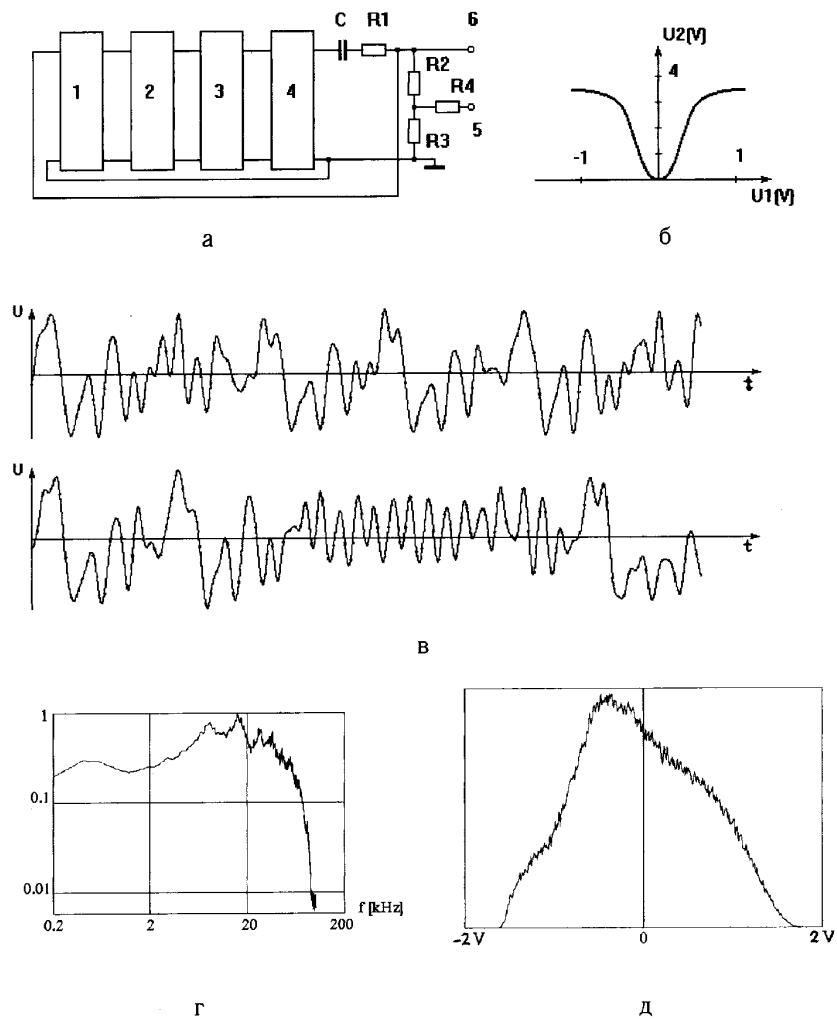


Рис. 1. Схема автогенератора и характеристики колебаний в автономном режиме.

250 кГц, разрядность оцифровки — 12 бит. Созданный нами пакет прикладных программ позволял работать в режиме цифрового осциллографа, измерять статистические характеристики сигнала, определять точечную размерность аттрактора. На рис. 1, *в–д* изображены фрагменты траекторий, а также спектр и функция распределения колебаний автогенератора в автономном режиме. Размерность аттрактора в этом режиме составляла $D_p = 4.2$.

В отличие от предшествующих работ, где изучалась синхронизация гармоническим сигналом, мы изучали синхронизацию импульсным сигналом. Действие короткого импульса (в пределе δ -импульса) на динамическую систему приводит к мгновенному сдвигу изображающей точки в фазовом пространстве на вектор [Всдвига, определяющийся параметрами импульсного сигнала и местом его приложения к системе. В остальном система движется автономно. Поэтому синхронизация импульсным сигналом, т.е. образование устойчивого периодического движения, возможно при выполнении двух условий: 1) на траекториях автономной системы существуют орбитно-устойчивые фрагменты; 2) импульсное воздействие сдвигает конечную точку устойчивого фрагмента в начальную.

Вначале, используя методику [3], мы провели численное моделирование импульсной синхронизации с помощью упрощенной математической модели генератора — двумерного гладкого отображения [4,5]:

$$x(t+1) = (1-c)F(px(t)) - ay(t) + \varphi(t),$$

$$y(t+1) = cF(px(t)) + ay(t), \quad F(z) = z^2/(1+z^2). \quad (1)$$

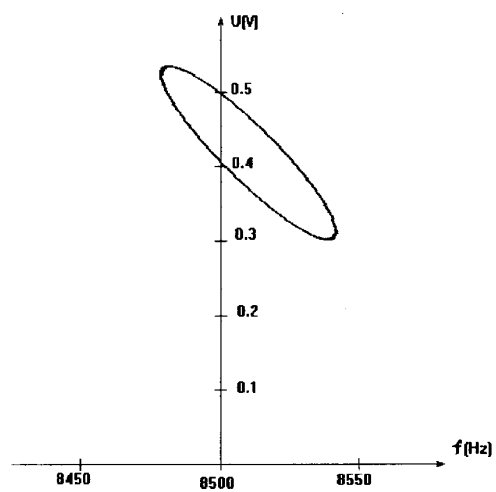
В этих формулах x пропорционален напряжению на выходе b , y — напряжению на емкости C , $\varphi(t)$ — напряжению на резисторе R_3 (рис. 1, *а*). Само отображение связывает значения переменных в момент t с их значениями в момент $t + \tau$, где τ — время задержки в кольце обратной связи. Значения параметров p , a , c соответствовали режиму работы генератора и составляли 9, 0.6 и 0.4. Было найдено, что при изучаемом типе сигнала, имеющем только x -компоненту, и тактностях $T < 10$ возможна синхронизация любой тактности, а минимальная амплитуда синхронизирующего сигнала достигается при $T = 4$, и составляет примерно 1/15 часть от x -диаметра аттрактора. Полярность оптимального сигнала — отрицательная.

При экспериментальном исследовании синхронизации мы подавали импульсный синхронизирующий сигнал на вход 5 (рис. 1, *a*). Импульс можно считать коротким, когда его длительность меньше, чем $1/f_c$, где f_c — частота среза фильтра нижних частот. Время задержки τ в силу дисперсионных свойств ФНЧ зависит от формы колебаний в автогенераторе [6]. Нижняя граница величины τ дается выражением $\tau_1 = \tau_0/\pi$, где $\tau_0 = N/f_c$ (N — число звеньев ФНЧ). Как правило, завышенные оценки величины τ дает средняя групповая задержка $\tau_2 = \tau_0/2$. Отсюда, в нашем случае, частота повторения импульсов для синхронизации четырехтактных устойчивых фрагментов должна лежать в пределах от 7 до 11 кГц.

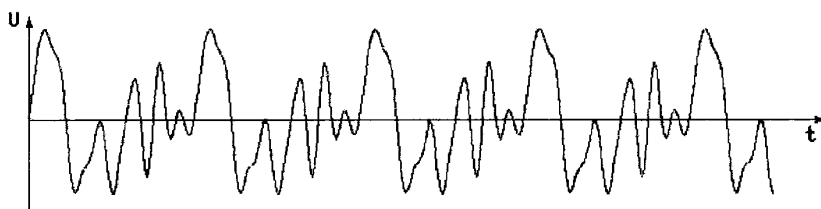
Эксперименты, действительно, позволили обнаружить синхронизацию при частоте повторения импульсов около 8.5 кГц и амплитуде около 0.3 В, что составляет примерно 1/10 часть x -диаметра аттрактора. На рис. 2 приведена область синхронизации на плоскости частота–амплитуда синхронизирующего сигнала (*a*) и запись синхронизованных колебаний генератора (*б*). Длительность импульса — 10 мкс, полярность — отрицательная. Небольшое увеличение длительности импульса практически не влияет на процесс синхронизации. Картина синхронизации сохраняется также и при уменьшении длительности импульса, если пропорционально увеличивать его амплитуду. Сравнение рис. 1, *в* и рис. 2, *б* показывает, что на траекториях автономного генератора действительно существуют фрагменты, весьма близкие к траектории синхронизованного генератора.

Эксперименты по импульсной синхронизации показали также, что существуют и другие области синхронизации рассмотренного типа, но они имеют более высокий порог синхронизации. Имеются также намного более широкие области синхронизации, когда импульсы не короткие, а их амплитуда велика. Мы трактуем такую синхронизацию как синхронизацию сильным сигналом, при которой собственная автоколебательность системы подавляется и периодический процесс на выходе есть просто отклик устойчивой нелинейной системы на периодический импульсный сигнал.

Что касается рассмотренной выше синхронизации слабым коротким импульсным сигналом, то в ней проявляются все черты, характерные для синхронизации гладких отображений [2,3]: существование верхнего и нижнего порога по амплитуде, переходный хаос при входе в синхронизацию, разрушение синхронизации через удвоение периода при



а



б

Рис. 2. Область синхронизации 4-тактного цикла и осциллограмма синхронизованных колебаний.

уменьшении и скачкообразно при увеличении амплитуды импульсного сигнала. Этот тип синхронизации существует лишь в очень узком интервале частот повторения импульсов.

Наконец, отметим, что если усложнять форму сигнала, т. е. за период повторения подавать не одиночный короткий импульс, а несколько коротких импульсов разной полярности и амплитуды, то можно существенно снизить порог синхронизации. Путем подбора полярности и амплитуд парциальных импульсов сигнала нам, например, удалось в рассмотренном выше случае снизить порог синхронизации более чем в три раза. Форма и амплитуда синхронизованных колебаний при этом не изменялись, размеры области синхронизации пропорционально уменьшались, и сильно возросло время переходного хаоса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 95-02-03633-а.

Список литературы

- [1] *Неймарк Ю.И., Ланда П.С.* Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987. 423 с.
- [2] *Рождественский В.В., Потапов В.А., Шершнев И.А.* // РиЭ. 1994. Т. 39. № 5. С. 814–821.
- [3] *Рождественский В.В.* // РиЭ. 1997. Т. 42. № 3.
- [4] *Рождественский В.В., Стручков И.Н.* // ЖТФ. 1992. Т. 62. № 10. С. 102–110.
- [5] *Рождественский В.В., Стручков И.Н.* // Изв. вузов. ПНД. 1993. Т. 1. № 1–2. С. 83–92.
- [6] *Вайнштейн Л.А.* // УФН. 1976. Т. 118. № 2. С. 339–367.