

09

Формирование переключающихся хаотических колебаний с помощью генератора Чуа, находящегося в предстартовом режиме

© Э.В. Кальянов, Б.Е. Кяргинский

Институт радиотехники и электроники РАН (Фрязинский филиал),
Фрязино (Моск. обл.)
E-mail: erast@ms.ire.rssi.ru

Поступило в Редакцию 22 февраля 2006 г.

На основе численного анализа и экспериментально показано, что при воздействии переключающихся хаотических колебаний на генератор Чуа, находящийся в предстартовом режиме, происходит усложнение движений в смысле большего развития хаотичности.

PACS: 05.45.Pq

Одним из хорошо известных генераторов хаотических колебаний, достаточно просто реализующимся на практике, является генератор Чуа [1]. Он отличается от классической схемы триггера [2] лишь наличием емкости, шунтирующей индуктивный элемент, что, впрочем, не умаляет достоинств генератора, а иллюстрирует то, как исключительно простое изменение схемы может привести к принципиально новым эффектам.

Генератор Чуа обладает свойством переключения движений между двумя бассейнами притяжения, благодаря чему его колебаниям соответствует оригинальный аттрактор типа двойной завиток. Однако недостатком хаотических колебаний генератора Чуа, проявляющихся при его практическом применении [3], является относительно слабое развитие хаоса. Структура колебаний отображает их квазирегулярное возбуждение при хаотическом переключении движений между двумя бассейнами притяжения. В связи с этим представляет интерес усложнение колебаний в смысле получения более запутанных траекторий движения изображающей точки в трехмерном фазовом пространстве.

Именно с этой целью проводились исследования хаотических систем на основе различных модификаций генератора Чуа (см., например, [4,5]).

Представляется возможным изменение структуры колебаний генератора Чуа с целью развития большей хаотичности движений с помощью регенерированного триггера, представляющего собой, по существу, тот же генератор Чуа, но находящийся в предстартовом режиме. Данная работа посвящена исследованию этого вопроса.

Уравнения движения рассматриваемой системы могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} d^2x/dt^2 + \alpha [dx/dt + (\beta - 1)x] &= -\alpha [\varepsilon \operatorname{arctg}(y) + y], \\ dy/dt + y - \varepsilon \operatorname{arctg}(y) &= x, \\ d^2z/dt^2 + \delta [dz/dt + (\sigma - 1)z] &= -\delta [\mu \operatorname{arctg}(u) - u] + \gamma y, \\ du/dt + u - \mu \operatorname{arctg}(u) &= z, \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y, z, u — переменные, $\alpha, \beta, \delta, \sigma, \varepsilon, \mu, \gamma$ — постоянные.

При соответствующем выборе параметров первые два уравнения описывают генератор Чуа (первая подсистема), а третье и четвертое — регенерированный триггер (вторая подсистема). В случае генератора значение α выбирается так, чтобы обеспечивалось возбуждение автоколебаний, которым соответствует аттрактор типа двойной завиток. В случае регенерированного триггера параметр δ имеет величину, при которой автономно (при $\gamma = 0$) колебания не возбуждаются: вторая подсистема находится в предстартовом режиме.

Безразмерное время t нормировано в системе (1) таким образом, что каждая из подсистем сводится в частном случае к уравнениям обычного триггера. Так, из уравнений первой подсистемы при $(1/\alpha) = 0$ нетрудно получить следующие уравнения, описывающие поведение системы с двумя устойчивыми состояниями:

$$\begin{aligned} dx/dt + (\beta - 1)x &= -[\varepsilon \operatorname{arctg}(y) + y], \\ dy/dt + y - \varepsilon \operatorname{arctg}(y) &= x. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь следует отметить, что из нормированных уравнений Чуа в общепринятой форме записи (см., например, [1,6]) невозможно получить уравнения триггера. Это обусловлено тем, что в выражение для

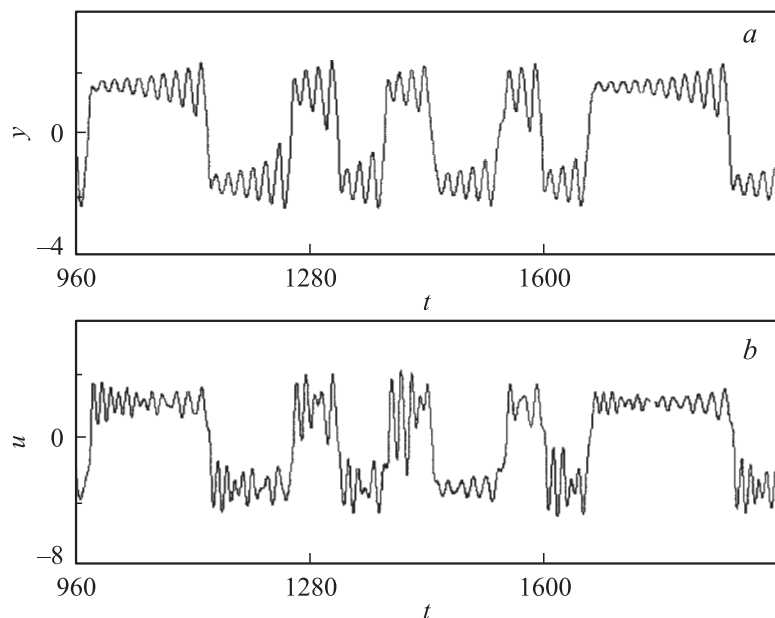


Рис. 1. Фрагменты рассчитанных реализаций на выходе генератора Чуа (*a*) и после преобразования колебаний в регенерированном триггере (*b*).

нормированного времени, используемого в общепринятых уравнениях Чуа, входит емкость, шунтирующая индуктивный элемент, но которой нет в триггере.

На рис. 1 приведены реализации колебаний, иллюстрирующие изменение структуры движений при их преобразовании с помощью генератора Чуа, находящегося в предстартовом режиме. При совместном решении уравнений (1) различными заданы значения параметров α и δ ($\alpha = 0.111$, $\delta = 0.24$), чем обеспечивается различие однонаправленно связанных подсистем (генератор и регенерированный триггер). Остальные параметры воздействующей и преобразующей подсистем одинаковые и имеют следующие значения: $\beta = \sigma = 1.586$, $\varepsilon = \mu = 1.6$. При этом коэффициент связи $\gamma = 0.2$. Начальные условия для переменных воздействующей подсистемы заданы равными 0.1, а для переменных

преобразующей подсистемы — нулевыми. Шаг интегрирования по времени t выбран равным 0.04.

Как видно (рис. 1, *a*), фрагмент реализации на выходе первой подсистемы демонстрирует нарастающие колебания при их нерегулярном переключении между двумя бассейнами притяжения. Устойчивые состояния, между которыми происходит переключение колебаний, определяются решениями уравнений (2). Колебаниям, иллюстрируемым рис. 1, *a*, соответствует аттрактор с относительно слабым перемешиванием траекторий движения изображающей точки. Спектр мощности также отображает их слабое перемешивание.

Фрагмент реализации, рассчитанный для переменной, описывающей колебания на выходе регенерированного триггера (рис. 1, *b*), иллюстрирует более запутанные движения, чем в случае рис. 1, *a*. Колебания нерегулярны в обоих бассейнах притяжения. При этом моменты времени, соответствующие переключению движений, примерно те же, что и в случае первой подсистемы. Аттракторы и спектры мощности, рассчитанные для второй подсистемы, также свидетельствуют о большем перемешивании фазовых траекторий при использовании преобразования колебаний с помощью регенерированного триггера.

Экспериментальные исследования проводились при использовании двух последовательно соединенных цепей Чуа, одна из которых обеспечивала генерирование хаотических колебаний, а другая (преобразующая) находилась в предстартовом состоянии. Для развязки подсистем и регулирования уровня сигнала, воздействующего на регенерированный триггер, использовался линейный усилитель. В качестве активных элементов, формирующих нелинейные характеристики генератора и регенерированного триггера, использовались микросхемы типа LM324N. Параметры элементов схем обеих подсистем одинаковые, за исключением величин емкостей, шунтирующих индуктивные элементы и обеспечивающих в первой подсистеме условия возбуждения колебаний, а во второй — условия регенерации. В соответствии со значением этих емкостей экспериментально заданные параметры α и δ , определяющие согласно (1) рабочие режимы подсистем, равны $\alpha = 0.02$, $\delta = 0.66$.

На рис. 2, *a, b* приведены характерные фрагменты реализаций, соответствующих воздействию колебаниям (колебаниям генератора Чуа) (*a*) и колебаниям, полученным после их преобразования в регенерированном триггере (*b*). Видно, что, как и при численном анализе, в регенерированном триггере происходит усложнение движе-

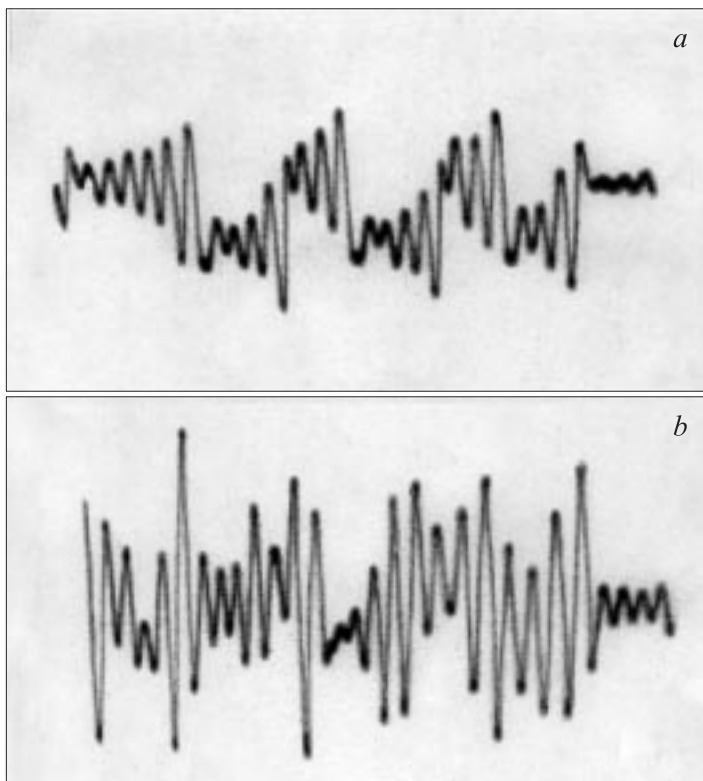


Рис. 2. Фрагменты экспериментально наблюдаемых реализаций на выходе генератора Чуа (*a*) и после преобразования колебаний в регенерированном триггере (*b*).

ний: фрагмент реализации, представленный на рис. 2, *b*, иллюстрирует более развитый хаос. Усложнение колебаний при их преобразовании с помощью регенерированного триггера проявляется также в структуре наблюдающихся экспериментально аттракторов.

Приведенные результаты численного анализа и эксперимента свидетельствуют об эффективности использования такой простой системы, как регенерированный триггер для усложнения хаотических

движений. При численном анализе выяснено также, что с помощью регенерированного триггера возможно создание хаотических движений, которым соответствует аттрактор типа двойной завиток, когда исходные колебания отображают хаос в одном бассейне притяжения. Это открывает перспективы формирования большого разнообразия по структуре переключающихся хаотических движений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 04-02-16536).

Список литературы

- [1] *Chua L.O., Komuro M., Matsumoto T.* // IEEE Trans. Circuits Syst. 1986. V. CAS-33. Nov. P. 1072–1118.
- [2] *Cunningham W.J.* Introduction to nonlinear analysis. McGraw-Hill Book Co., Inc., N.Y., 1958. *Каннингхем В.* Введение в теорию нелинейных систем / Пер. с англ. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. 456 с.
- [3] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2002. 252 с.
- [4] *Кальянов Э.В.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 6. С. 1–6.
- [5] *Safagna D., Grassi G.G.* // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2003. V. 13. N 10. P. 2889–2904.
- [6] *Кузнецов С.П.* Динамический хаос (курс лекций). М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2001. 296 с.