



Сорок лет модели кольцевого генератора Дмитриева–Кислова

А. С. Дмитриев

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

E-mail: chaos@cplire.ru

Поступила в редакцию 1.07.2024, опубликована 31.07.2024

Для цитирования: Дмитриев А. С. Сорок лет модели кольцевого генератора Дмитриева–Кислова // Известия вузов. ПНД. 2024. Т. 32, № 4. С. 423–427. DOI: 10.18500/0869-6632-003119. EDN: KUIFZS

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Создание этой модели генератора с полутора степенями свободы, содержащей единственный нелинейный элемент с симметричной характеристикой, было непосредственно связано с предшествующими работами в ИРЭ АН СССР по генераторам шумов на основе ламп бегущей волны — «шумотронам». На первом этапе исследований природа шумовых колебаний была загадочна, и в авторском свидетельстве на «шумотрон» [1] рассмотрение физики появления шумов в вакуумных устройствах ограничилось некоторыми правдоподобными рассуждениями.

Однако вскоре в работах [2, 3] теоретически и экспериментально было установлено и доказано, что возникновение шумовых колебаний в автоколебательных системах с запаздывающей обратной связью (типа шумотрона) определяется не флуктуациями и раскачкой тепловых шумов, а их нелинейными динамическими свойствами. Таким образом, эти колебания оказались не шумовыми, а шумоподобными, порождаемыми собственной динамикой автоколебательных систем. Ключевым моментом в выяснении физики возникновения шумоподобных колебаний послужило построение и исследование в работах [2, 3] простой математической модели шумотрона, динамика которой демонстрирует сложное неперiodическое поведение. Сначала такое поведение называли стохастическими колебаниями, а позднее стали называть хаотическими колебаниями, или динамическим хаосом.

Математическая модель шумотрона строится на основе его структурной схемы, состоящей из нелинейного усилителя с характеристикой $F(X)$, линии задержки с временем запаздывания T и фильтра Φ (рис. 1, а). Если фильтр представляет собой колебательный контур с добротностью Q , состоящий из емкости, индуктивности и сопротивления (однозвенный RLC -фильтр), модель описывается дифференциально-разностным уравнением

$$\ddot{Z} + \frac{\dot{Z}}{Q} + Z = F(Z(t - T)). \quad (1)$$

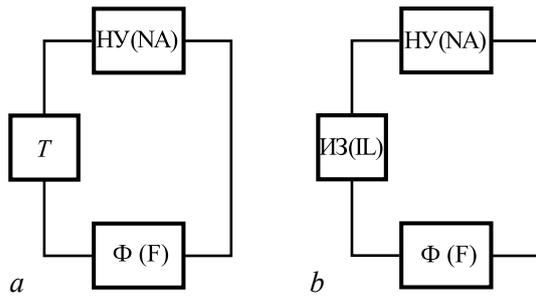


Рис. 1. Блок-схемы генератора с запаздывающей обратной связью (а) и генератора с инерционным запаздыванием (b). НУ — нелинейный усилитель; Т — задержка; Ф — фильтр; ИЗ — инерционное звено

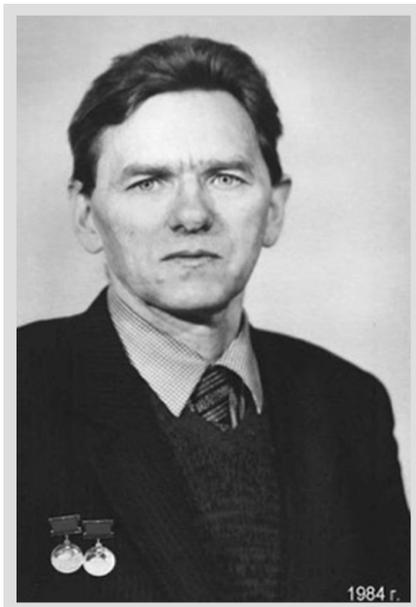
Fig. 1. Block diagrams of a generator with delayed feedback (a) and a generator with inertial delay (b). NA — nonlinear amplifier; T — delay; F — filter; IL — inertial link

Такая модель в виде кольцевого автогенератора с полутора степенями свободы была предложена А. С. Дмитриевым и В. Я. Кисловым [4, 5]. За основу была взята модель шумотрона (1). Переход от распределенной модели, описываемой дифференциально-разностным уравнением, к конечномерной модели осуществлялся путем замены запаздывания на инерционный элемент первого порядка (рис. 1, b). В результате была получена математическая модель автоколебательной системы с полутора степенями свободы — простейший конечномерный аналог модели шумотрона:

$$T\dot{X} + X = F(Z), \quad \ddot{Z} + \frac{\dot{Z}}{Q} + Z = X$$

или

$$T\dot{X} + X = F(Z), \quad \dot{Y} = X - Z, \quad \dot{Z} = Y - \frac{Z}{Q}. \quad (2)$$



Владимир Яковлевич Кислов
Vladimir Yakovlevich Kislov

Чаще всего в качестве нелинейной функции используется $F(Z, M) = MZ \exp(-Z^2)$, где параметр M — коэффициент усиления в линейном режиме.

Модель, описываемая уравнением (1), с математической точки зрения представляет динамическую систему с бесконечным числом степеней свободы, хотя физическое число степеней свободы ограничено и составляет $N \sim \Delta f T$, где Δf — полоса пропускания фильтра.

Разработка нового поколения генераторов хаоса на твердотельной элементной базе в начале 1980-х годов потребовала создания модельных электронных генераторов хаоса с сосредоточенными параметрами и минимальным числом степеней свободы.

В (2) X характеризует сигнал на выходе инерционного элемента, а Z — на входе усилителя. Параметры T и Q определяют соответственно время релаксации инерционного элемента и добротность RLC -фильтра, а параметр M задает коэффициент усиления.

Вследствие того, что характеристика усилителя выбрана симметричной, система остается инвариантной относительно замены $(X, Y, Z) \rightarrow (-X, -Y, -Z)$. Поэтому аттрактор может либо удовлетворять условию симметрии и переходить в себя при указанной замене, либо, будучи несимметричным, иметь симметрично расположенную копию.

При переходе параметра M через бифуркационное значение $M_0 = 1$ в системе происходит бифуркация — потеря устойчивости положения равновесия в начале координат. В результате рождается пара симметрично расположенных устойчивых состояний равновесия $Z = Y = \pm \sqrt{\ln M}$,

которые с ростом M удаляются от начала координат. При следующем критическом значении $M = M_1$ оба эти положения равновесия теряют устойчивость и становятся неустойчивыми фокусами. В окрестности каждого равновесия рождается предельный цикл. Эти два цикла симметричны друг другу. При дальнейшем увеличении параметра M происходит каскад бифуркаций удвоения периода и переход к хаосу, причем аттрактор похож на аттрактор Рёсслера. Затем, при достаточно больших M , происходит объединение двух симметричных друг другу аттракторов и образование единого симметричного аттрактора. О характерных режимах в системе можно судить по эволюции фазового портрета аттрактора, представленной на рис. 2.

Вскоре кольцевой автогенератор был реализован в виде аналоговой электронной схемы, и на его основе был создан первый макет схемы передачи звуковой и музыкальной информации с использованием динамического хаоса (рис. 3) [6–8].

В дальнейшем модель кольцевого автогенератора с полутора степенями свободы была обобщена на многомерные модели, которые использовались и продолжают использоваться для изучения хаотических колебаний различной размерности [5, 9, 10]. В частности, с помощью разработанной на основе моделей повышенной размерности аналитическо-вычислительной теории генерации хаоса была установлена возможность формирования спектра мощности генерируемых хаотических колебаний заданной формы и в заданном частотном диапазоне [9, 10].



Александр Сергеевич Дмитриев
Alexander Sergeevich Dmitriev

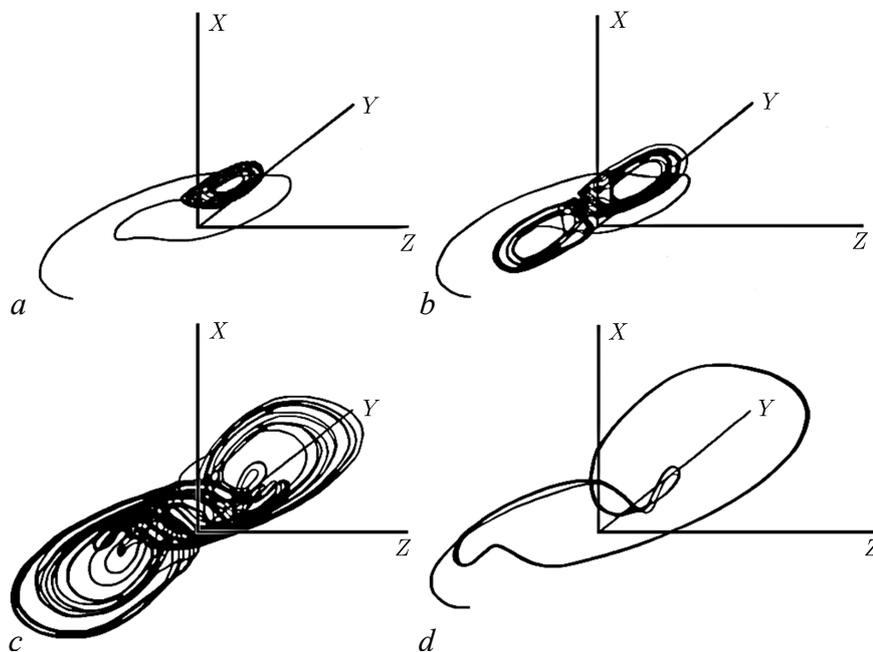


Рис. 2. Эволюция аттрактора с увеличением коэффициента усиления: $M = 3.5$ (a), 5 (b), 12 (c), 16 (d); $T = 2$, $Q = 10$
Fig. 2. Evolution of the attractor with increasing gain: $M = 3.5$ (a), 5 (b), 12 (c), 16 (d); $T = 2$, $Q = 10$

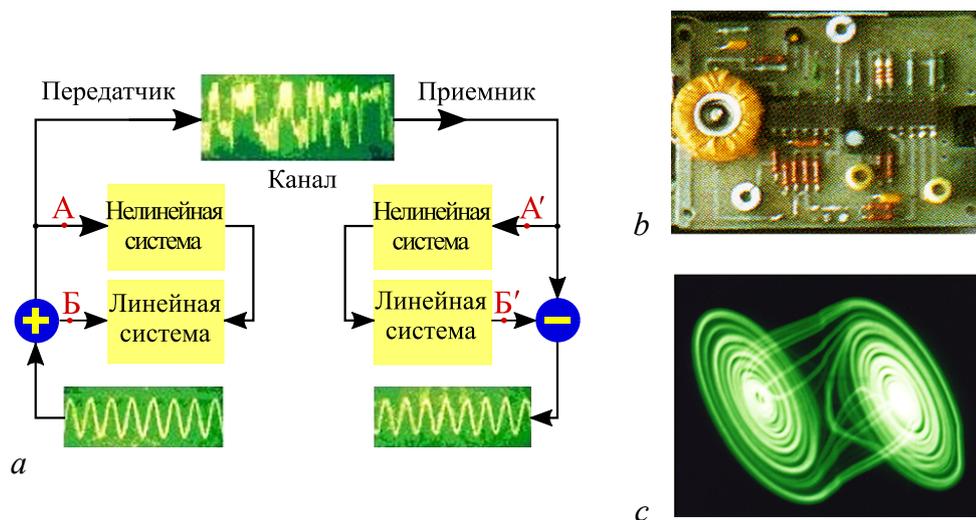


Рис. 3. Эксперименты по передаче звуковой информации в системе с нелинейным подмешиванием (1994 год): *a* — схема передачи; *b* — передатчик системы на основе кольцевого генератора хаоса с 1.5 степенями свободы; *c* — фазовый портрет сигнала в канале при передаче звукового сигнала

Fig. 3. Experiments on the transmission of sound information in a system with nonlinear mixing (1994): *a* — transmission scheme; *b* — transmitter of a system based on a ring chaos oscillator with 1.5 degrees of freedom; *c* — phase portrait of the signal in the channel when transmitting an audio signal

В наши дни исследования по генерации хаоса в конечномерных кольцевых автоколебательных системах продолжают развиваться и использоваться для создания твердотельных генераторов хаоса на сосредоточенных элементах с заданными спектральными характеристиками в радио-, СВЧ- и КВЧ-диапазонах частот [11]. Упомянутые генераторы являются ключевыми компонентами для сверхширокополосных прямохаотических приемопередатчиков [12–14], эффективных малогабаритных источников радиосвета [15–18] и других применений высокочастотного электромагнитного динамического хаоса.

Список литературы

1. Кислов В. Я., Мясин Е. А., Богданов Е. В. Способ генерирования электромагнитных шумовых колебаний: АС. 1125735 СССР; заявл. 29.12.1982; приор. 31.07.1967, СССР; опубл. 23.11.1984, Бюл. Изобретений № 43, 1984.
2. Кислов В. Я., Залогин Н. Н., Мясин Е. А. Исследование стохастических автоколебательных процессов в автогенераторах с запаздыванием // РЭ. 1979. Т. 24, № 6. С. 1118–1130.
3. Кислов В. Я. Теоретический анализ шумовых колебаний в электронно-волновых системах // РЭ. 1980. Т. 25, № 8. С. 1683–1690.
4. Дмитриев А. С., Кислов В. Я. Стохастические колебания в автогенераторе с инерционным запаздыванием первого порядка // РЭ. 1984. Т. 20, № 12. С. 2389–2398.
5. Дмитриев А. С., Кислов В. Я. Стохастические колебания в радиофизике и электронике. М.: Наука, 1989. 278 с.
6. Дмитриев А. С., Панас А. И., Старков С. О. Эксперименты по передаче музыкальных и речевых сигналов с использованием динамического хаоса: препринт Рос. АН, Ин-т радиотехники и электрон. № 12(600). М.: ИПЭ РАН, 1994. 42 с.
7. Dmitriev A. S., Panas A. I., and Starkov S. O. Experiments on speech and music signals transmission using chaos // Int. J. of Bifurcation and Chaos. 1995. Vol. 5, No. 4. P. 1249–1254.

8. *Дмитриев А. С., Панас А. И.* Динамический хаос: Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. 251 с.
9. *Бельский Ю. Л., Дмитриев А. С., Панас А. И., Старков С. О.* Синтез полосовых хаотических сигналов в автоколебательных системах // РЭ. 1992. Т. 37, № 4. С. 660–670.
10. *Dmitriev A. S., Panas A. I., Starkov S. O.* Ring oscillating systems and their application to the synthesis of chaos generators // Int. J. of Bifurcation and Chaos. 1996. Vol. 6, No. 5. P. 851–865.
11. *Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Максимов Н. А., Панас А. И.* Генерация хаоса М.: ТЕХНОСФЕРА, 2012. 423 с.
12. *Дмитриев А. С., Панас А. И., Старков С. О., Андреев Ю. В., Кузьмин Л. В., Кяргинский Б. Е., Максимов Н. А.* Способ передачи информации с помощью хаотических сигналов: патент РФ № 2185032; приор. 27.07.2000; заявл. 06.10.2000; опубл. 10.07.2002.
13. *Дмитриев А. С., Кяргинский Б. Е., Панас А. И., Старков С. О.* Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне // РЭ. 2001. Т. 46, № 2. С. 224–233.
14. *Dmitriev A. S., Kyarginsky B. Ye., Panas A. I., Starkov S. O.* Experiments on ultra wideband direct chaotic information transmission in microwave band // Int. J. Bifurcation & Chaos. 2003. Vol. 13, No. 6. P. 1495–1507.
15. *Дмитриев А. С., Ефремова Е. В.* Источники радиоосвещения на основе сверхширокополосных микрогенераторов хаотических колебаний // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, № 24. С. 49–57.
16. *Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Герасимов М. Ю., Ицков В. В.* Радиоосвещение на основе сверхширокополосных генераторов динамического хаоса // РЭ. 2016. Т. 61, № 11. С. 1073–1083.
17. *Андреев Ю. В., Гуляев Ю. В., Дмитриев А. С., Ефремова Е. В. и др.* Процессы передачи и обработки информации в системах со сложной динамикой. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. 319 с.
18. *Dmitriev A. S., Efremova E. V., Ryzhov A. I., Petrosyan M. M., Itskov V. V.* Artificial radio lighting with sources of microwave dynamic chaos // Chaos. 2021. Vol. 31. P. 063135.