

УДК 530.18 + 532.59 + 534.0 + 621.37

И.В. ИЗМАЙЛОВ*, Б.Н. ПОЙЗНЕР*, И.В. РОМАНОВ*, С.М. СМОЛЬСКИЙ**

О ПАРАЛЛЕЛЯХ В ДИНАМИКЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ХАОСА С «ГОТОВОЙ» И С ФОРМИРУЕМОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ¹

Приводятся результаты вычислительных экспериментов с двумя генераторами хаоса. Нелинейность первого «приготовлена» как суперпозиция линейных и нелинейных преобразований сигнала. Нелинейность второго (как и у всех оптических интерферометров) обусловлена временной формой высокочастотного сигнала. Обсуждаются сходства и различия этих устройств, их взаимозаменяемость.

Ключевые слова: динамический хаос, формируемая нелинейность, радиоаналог нелинейного кольцевого интерферометра.

1. Нелинейность составляет одну из фундаментальных характеристик не только физического мира, но и живых организмов, а также мира социального. Как известно, на языке «воздействие v – отклик $N(v)$ » нелинейность есть *непропорциональность* второго первому, т.е. факт отличия функции $N(v)$ от линейной. Или, строже, нелинейность есть нарушение принципа суперпозиции. Многолетний и нарастающий интерес к нелинейным динамическим системам вызван тем, что, несмотря на их простоту, в них возможны *нетривиальные явления*: неустойчивость, генерация колебаний и волн, самоорганизация, бифуркации, детерминированный (динамический) хаос.

Одна из причин внимания к хаосу и к разработке генераторов хаоса (ГХ) – возможность построения на его основе систем конфиденциальной связи [1–3] и применения его в спутниковых системах позиционирования [4]. Применительно к системам связи форма передаточной характеристики нелинейного элемента в ГХ может рассматриваться как «сложный параметр». Он способен быть одним из ключей такой системы нелинейно-динамической криптологии [2, 5]. Причём здесь практически важна возможность оперативной и сравнительно простой *смены нелинейности* (ключа), обеспечивающей максимальное разнообразие ключей [5].

В ходе решения этой задачи выявлен и продемонстрирован универсализм «конструкций» элементов с нелинейной статической передаточной характеристикой (ПХ) [5, 6]. В этом контексте введено условное разделение нелинейности на «готовую» и формируемую исследователем. С «готовой» нелинейностью в физике обращаются как с «чёрным ящиком» (в смысле Эшби), обладающим известной нелинейной статической ПХ. А «формируемая» нелинейность является неким продуктом взаимодействия сигналов и нескольких преобразователей. *Сопротивопоставление* нелинейностей по признаку «готовая» – «формируемая» связано с позицией исследователя в отношении конкретного нелинейного элемента: интересуется ли его, чем обусловлена та или иная ПХ, как устроен соответствующий преобразователь или нет etc.

Наша цель – указать на условность, но также на методологическую и практическую продуктивность такого сопротивопоставления. Для этого предлагается сравнить динамику процессов в двух радиоэлектронных ГХ. В первом динамика разворачивается в пространстве *величин* сигналов (а нелинейность – «готовая»). Во втором ГХ динамика происходит ещё и в пространстве *параметров* сигнала, циркулирующего в системе, а нелинейность – «формируема» и использует ПХ в этом пространстве параметров.

2. Схемы обсуждаемых ГХ приведены на рис. 1 [4, 5], где РУ – линейный регулируемый усилитель, СМ – схема смещения постоянной составляющей сигнала, НЭ – нелинейный элемент («готовая» нелинейность), ФНЧ и ФВЧ – фильтры нижних и верхних частот первого порядка с постоянными времени $\tau_{\text{ФНЧ}}$ и $\tau_{\text{ФВЧ}}$, ЛЗ и t_c – линии задержки с малой дисперсией, блоки «А» и «А²» – амплитудный детектор и квадратор. На рис. 1, б блок γ_a указывает на возможность регулировать одноимённый амплитудный коэффициент передачи сигнала за один обход системы (например, от входа фазового модулятора – через контур обратной связи – до его же входа). Аналогично, блок α отвечает за установку коэффициента, учитывающего эффективность амплитудного детектора «А»

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-02-98037 р_сибирь_a и гранта РНФ № 14-49-00079, а также при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 1729).

и коэффициент передачи квадратора « A^2 ». Управляющий регулируемой ЛЗ сигнал $\alpha U_{\text{ФНЧ}}$ (рис. 1, б) поступает от ФНЧ. Модуляция времени распространения сигнала в этой ЛЗ предполагается медленной. В схеме на рис. 1, б это обеспечивается условием $\tau_{\text{ФНЧ}} \gg T$, где T – характерное время изменения сигнала от источника колебаний некоторой формы (например, T – период колебаний, если этот сигнал – периодический). Блоки «Сумматор», «Делитель», «Усилитель» выполняют соответствующие преобразования сигнала. Положим пока, что стрелки 2 нет.

Заметим, что если из устройства на рис. 1, б изъять ФВЧ, а источник колебаний некоторой формы заменить источником гармонических колебаний, то ГХ станет радиоаналогом системы Икеды – нелинейного кольцевого интерферометра [5]. А на рис. 1, а сумматор « \oplus » может использоваться для подмешивания информационного сигнала m_1 к хаотическому, если ГХ предназначен для скрытой в сигнале z_1 передачи m_1 . Далее положим $m_1=0$.

ПХ нелинейного элемента в ГХ на рис. 1, а напоминает отрезок гармонической функции, включающий три минимума и два более острых максимума (рис. 2). А сам ГХ есть нелинейный усилитель (из РУ, СМ, НЭ) с обратной связью, состоящей из ФНЧ, ФВЧ, ЛЗ [4].

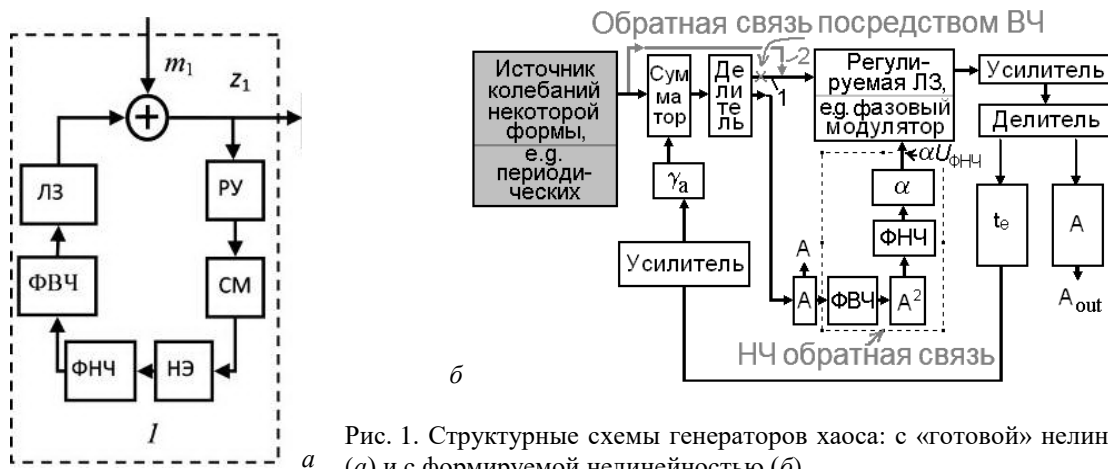


Рис. 1. Структурные схемы генераторов хаоса: с «готовой» нелинейностью (а) и с формируемой нелинейностью (б)

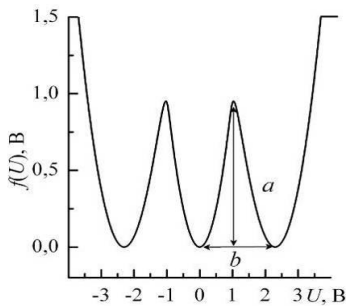


Рис. 2. Передаточная характеристика $f(U)$ нелинейного элемента в ГХ на рис. 1, а: $a=0,95$ В, $b=2,3$ В

Подобной характеристикой в некоторых приближениях (например, при $\gamma_a^2 \ll 1$ и гармоническом сигнале от источника колебаний) математическая модель процессов в ГХ на рис. 1, б содержит функцию $[\text{const} + \cos(x)]^{0,5}$ как нелинейность, где $\text{const} \geq 1$. Эта нелинейность имеет несколько более острые минимумы (в зависимости от величины const). Она есть результат фазовой модуляции, суммирования гармонических сигналов и детектирования амплитуды [5–7]. При таком упрощении ГХ на рис. 1, б, как и система на рис. 1, а, является эрдитарной системой, описывается двумя дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом (для напряжений в конденсаторах ФНЧ и ФВЧ) [4, 5, 7].

Непривычность второй системы (рис. 1, б) состоит в том, что в ней, казалось бы, затруднительно выделить нелинейный усилитель, содержащий НЭ. Тем не менее, его функцию выполняют *in corpore* все блоки, исключая цепочку: ФВЧ, « A^2 », ФНЧ (обведена пунктиром). Причём эта цепочка организует обратную связь по низкой частоте (НЧ). Остальные же блоки в совокупности назовём «формируемой нелинейностью». Дело в том, что функциональный вид ПХ $A(\alpha U_{\text{ФНЧ}})$ такого *составного* нелинейного элемента существенно зависит от формы внешнего сигнала, поступающего от источника колебаний. Наряду с обратной связью по НЧ, генератор на рис. 1, б охвачен обратной связью посредством сигнала высокой частоты – стрелка 1. Если разорвать её (крестик вблизи блока «Делитель»), но на вход регулируемой ЛЗ подать сигнал по стрелке 2, то такое устройство тоже есть «формируемая нелинейность», поскольку сохраняется упомянутая зависимость вида ПХ $A(\alpha U_{\text{ФНЧ}})$ от формы сигнала, приходящего из источника колебаний. Как указывалось выше, в случае источника гармонических колебаний и при $\gamma_a^2 \ll 1$ ПХ $A(\alpha U_{\text{ФНЧ}})$ имеет вид $[\text{const} + \cos(x)]^{0,5}$ [5, 7].

В этом пункте читатель вправе протестовать: цепочка ФВЧ, «А²», ФНЧ содержит «готовую» нелинейность «А²», и поэтому всё остальное по отношению к ней следует называть обратной связью! И он отчасти будет прав. Действительно, возможна и такая интерпретация, однако это не отменяет соображений о присутствии в системе формируемой нелинейности. В принципе – для наглядности – можно исключить блок «А²» вовсе либо поместить его сразу за блоком «А». Кроме того, читатель может заметить, что, в отличие от ГХ на рис. 1, а, ЛЗ (блок «t_c») находится *внутри* формируемой нелинейности. Но это не принципиальное отличие. ЛЗ можно изъять и поставить в контур обратной связи одновременно и по низкой частоте (в цепочку ФВЧ, «А²», ФНЧ), и посредством высокой (в разрыв стрелки *l*). Кроме этого, в приближении больших потерь поля (т.е. при $\gamma_a^2 \ll 1$) контур обратной связи посредством высокой частоты «выключается», что увеличивает сходство двух ГХ.

Как видим, оба ГХ имеют сходную структуру, содержат нелинейные элементы с ПХ сходной формы, описываются аналогичными уравнениями. Может быть, существенно то отличие, что второй ГХ имеет добавочную «готовую» нелинейность (блок «А²»). Есть и другое, несущественное – с точки зрения исследования динамики медленных величин (амплитуды, фазы, напряжений на конденсаторах) – отличие. Оно состоит в том, что вторая («формируемая») нелинейность в ГХ на рис. 1, б сконструирована как упомянутое выше *единство* многих блоков. А в первом ГХ эта нелинейность – «готовая», т.е. является «чёрным ящиком» для нас.

3. Сказанное выше порождает ожидание сходной динамики и бифуркационного поведения в этих ГХ. Действительно, сравнение результатов симуляции процессов в ГХ с «готовой» нелинейностью и в ГХ с «формируемой нелинейностью» [5, 7] позволяет выявить это сходство. Рис. 3 и 4 свидетельствуют, что в обоих ГХ имеют место сценарии перехода к хаосу через удвоение периода и однотипные режимы – «хаос смещающегося предельного цикла». Кроме того, в таких ГХ симуляция и эксперимент показывают сценарий перехода к хаосу через разрушение двухчастотного автоколебательного режима (разрушение двумерного тора) и перемежаемость. Последней, вероятно, способствует то, что $\tau_{\text{ФНЧ}} \gg \tau_{\text{ФВЧ}}$.

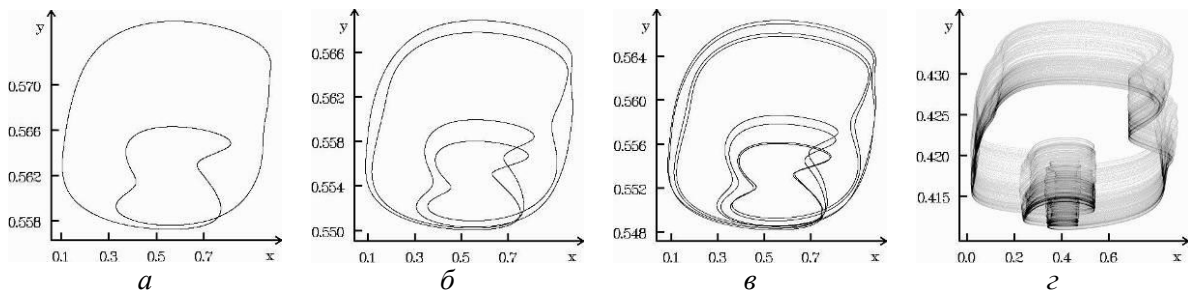


Рис. 3. Фазовые портреты при различных коэффициентах усиления K , демонстрирующие две бифуркации удвоения периода и «хаос смещающегося предельного цикла» (z) в модели ГХ на рис. 1, а. Здесь $x(t)$ и $y(t)$ – напряжение на конденсаторе ФНЧ и ФВЧ, коэффициент K равен 1,25 (a), 1,29 (b), 1,30 (v), 2,51 (z)

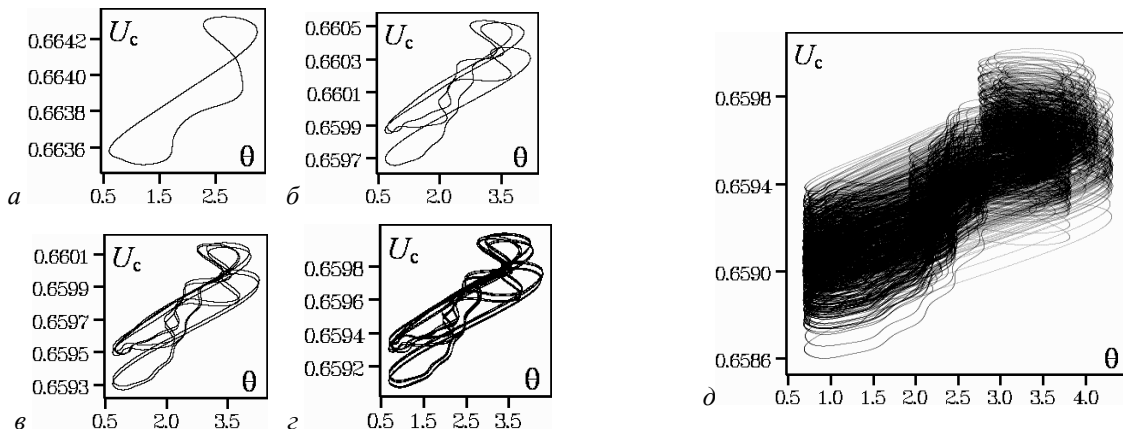


Рис. 4. Фазовые портреты при различных коэффициентах нелинейности (пропорционален коэффициенту усиления) K_a , демонстрирующие бифуркацию утроения и две бифуркации удвоения периода, а также «хаос смещающегося предельного цикла» (d) в модели ГХ на рис. 1, б [5, 7]. Здесь U_c – напряжение на конденсаторе ФВЧ, θ – сдвиг фазы в фазовом модуляторе (пропорционален напряжению $U_{\text{ФНЧ}}$ на конденсаторе

ФНЧ), коэффициент K_a равен 86 (а), 125 (б), 127 (в), 128 (г), 129 (д)

Итак, мы удостоверились, что свойства ГХ с близким видом нелинейности, полученной различным путём, близки. Значит, ГХ с «готовой» нелинейностью заменим ГХ с формируемой нелинейностью – при должной точности исполнения последней. А вот наоборот – едва ли: в силу гибкости изменения формируемой нелинейности. Однако, конечно же, у первого ГХ могут быть некоторые особенности ПХ нелинейного элемента, повторить которые формируемая нелинейность может, но это не всегда целесообразно, скажем, из-за громоздкости требуемой конструкции. Но возможности технологий микроэлектроники, не говоря уж о нанотехнологиях, способны придать проблеме синтеза формируемой нелинейности характер *типовой технической* процедуры.

Авторы благодарны доценту С.С. Новикову за полезную критику и вопросы, побуждающие к рефлексии над результатами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. // Успехи физ. наук. – 2009. – № 12. – С. 1213–1238.
2. Владимиров С.Н., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Нелинейно-динамическая криптология: радиофизические и оптические системы. – М.: Физматлит, 2009. – 208 с.
3. Vladimirov S.N., Smolskiy S.M. Non-traditional dynamics in electronics: theory and practice. – Pacey Segovia Irine (USA, CA), Scientific Research Publ. Inc., 2011. – 260 p.
4. Романов И.В., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н., Григорьев Д.В. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/2. – С. 326–328.
5. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Аксиоматическая схема исследования динамических систем: от критериев их разобщения к самоизменению. – Томск: STT, 2011. – 570 с.
6. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 2. С. 18–21.
7. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2010. Т. 18, № 1. С. 61–79.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

**Национальный исследовательский Университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия

E-mail: pznr@mail.tsu.ru

Измайлов Игорь Валерьевич, к.ф.-м.н., доцент;

Пойзнер Борис Николаевич, к.ф.-м.н., профессор;

Романов Илья Владимирович, к.ф.-м.н.;

Смольский Сергей Михайлович, д.ф.-м.н., профессор.

I.V. IZMAILOV*, B.N. POIZNER*, I.V. ROMANOV*, S.M. SMOLSKIY**

PARALLELS IN DYNAMICS OF RADIOELECTRONIC CHAOS GENERATORS WITH «PREPARED» AND FORMED NONLINEARITY

The results of computing experiments with two chaos generators are presented. Nonlinearity of the first generator «is prepared» as a superposition of linear and nonlinear signal transformations. Nonlinearity of the second generator (like of all optical interferometers) is due to the high-frequency temporary signal. Similarities and differences of these devices, their interchangeability are discussed.

Keywords: dynamical chaos, formed nonlinearity, radioelectronic analog of nonlinear ring interferometer.

REFERENCES

1. Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Hramov A.E. On the use of chaotic synchronization for secure communication, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2009, vol. 179, no 12, pp. 1213–1238.
2. Vladimirov S.N., Izmailov I.V., Poizner B.N., *Nonlinear-dynamical cryptology: radiophysical and optical systems*, Moscow, Fizmatlit, 2009, 208 p. (In Russ.)
3. Vladimirov S.N., Smolskiy S.M., *Non-traditional dynamics in electronics: theory and practice*, Pacey Segovia Irine (USA, CA), Scientific Research Publ. Inc., 2011, 260 p.
4. Romanov I.V., Izmailov I.V., Poizner B.N., Grigoryev D.V. Chaotic signals as a way to judge a length of the communication canal, *Izv. vuzov. Fizika*, 2013, vol. 56, No 8/2, pp. 326–328. (In Russ.)
5. Izmailov I.V., Poizner B.N., *Axiomatic scheme for investigation of dynamic systems: from criteria of their diversity to self-change*, Tomsk, STT Publisher, 2011, 574 p. (In Russ.)
6. Izmailov I.V., Poizner B.N., Generation of nonlinearity to increase the variety of systems with dynamic and static instability, *Russian Physics Journal*, 2010, vol. 53, No 2, pp. 123–127.

7. Izmailov I.V., Poizner B.N., Chaos in an radio device with square-law phase modulator and interference amplification of quasi-harmonic signal: a model and simulation, *Izv. vuzov. Prikladnaya nelineinaya dinamika*, 2010, vol. 18, no 1, pp. 61–79. (In Russ.)

*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia,

**National Research Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia,

E-mail: pznr@mail.tsu.ru

Izmailov Igor Valerevich, Ass. Prof., PhD;

Poizner Boris Nikolaevich, Prof., PhD;

Romanov Ilia Vladimirovich, PhD.;

Smolskiy Sergey Mihailovich, Prof., Dr. Sc.