УДК 517.9+621.372.011.7

В. Г. Прокопенко

МОДУЛЯЦИЯ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В АВТОНОМНЫХ АВТОСТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С МНОГОСЕГМЕНТНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

Рассмотрены способы управления хаотическими колебаниями, генерируемыми автономными автостохастическими системами с многосегментной нелинейностью, и различные подходы к решению этой задачи, использующие вариацию числа сегментов и их параметров.

E-mail: vadipro@yandex.ru

Ключевые слова: генератор хаоса, автономная автостохастическая система, многосегментная нелинейность, управление хаотическими колебаниями, модуляция.

В настоящее время явление динамического хаоса получает все большее прикладное значение. В частности, значительное распространение получило применение этого явления в системах передачи информации [1–7]. В связи с этим актуален поиск новых способов управления параметрами хаотических колебаний, которые могут быть использованы при построении приемо-передающих систем данного типа.

Одним из таких способов является вариация параметров нелинейности в автономных автостохастических системах с многосегментной нелинейностью [8]. Особенностью таких генераторов хаоса является возможность сохранения устойчивости движения при вариации числа сегментов и их параметров [9–14], причем, если изменение числа сегментов не сопровождается изменением структуры нелинейной функции, наблюдается также и крайне незначительная зависимость режима колебаний от числа сегментов [8].

Это позволяет перестраивать параметры хаотического колебания путем изменения числа и/или характеристик сегментов в составе нелинейной функции генератора хаоса.

Сигнал, генерируемый автостохастической системой с многосегментной нелинейностью, представляет собой хаотическое колебание с хаотической автомодуляцией. В его составе имеется высокочастотная компонента, представляющая собой квазипериодическое движение в окрестности одного из нескольких дискретных положений равновесия, и низкочастотная импульсная составляющая, отвечающая самопроизвольной смене положений равновесия.

Малая зависимость режима колебаний таких динамических систем от числа сегментов (задающего число положений равновесия) наблюдается только в том случае, когда сохраняется режим высокочастотных колебаний вблизи положений равновесия, а также условия смены положений равновесия. Это возможно, если при изменении числа сегментов сохраняются профиль (если сегменты линейные — наклон), относительные размеры и взаимное расположение сегментов. В таком случае все изменения режима колебаний обусловливаются только изменением соотношения числа средних и двух боковых сегментов, так как для последних указанные условия несколько иные вследствие асимметрии внешних границ боковых сегментов. В противном случае характер движения в окрестностях положений равновесия и условия переходов между ними могут довольно существенно изменяться. Важно то, что это не обязательно ведет к качественному изменению интегрального колебания, которое в общем случае может сохранять свой характер и при весьма значительных изменениях характеристик нелинейной функции [13].

Поэтому все способы модуляции автономных автостохастических систем с многосегментной нелинейностью, связанные с изменением параметров нелинейной функции, можно классифицировать по степени влияния на режим колебаний. Целесообразно выделить две основные группы — сохраняющие и изменяющие режим колебаний в окрестностях положений равновесия, отвечающих средним сегментам нелинейной функции. Последнюю группу, в свою очередь, целесообразно разделить на две группы по характеру и степени влияния на свойства движения вблизи положений равновесия. К одной группе естественно отнести способы, оказывающие минимальное влияние, а именно не предполагающие изменение профиля сегментов. Ко второй — те, которые основаны на изменении профиля сегментов, что уже непосредственно изменяет условия движения в окрестностях соответствующих им положений равновесия.

1. Способы модуляции, сохраняющие режим колебаний в окрестностях положений равновесия, отвечающих средним сегментам нелинейной функции. Возможны только два способа такой модуляции:

— использование различных вариантов собственно изменения числа сегментов (рис. 1, 2) (на этих и остальных (кроме рис. 8) рисунках в верхнем ряду показано используемое при модуляции изменение нелинейной функции, в среднем и нижнем — соответствующие изменения хаотического аттрактора и генерируемого колебания);

— изменение масштаба нелинейной функции (рис. 3).

Сохранение структуры нелинейной функции при изменении числа сегментов возможно только в том случае, если она является регулярной, т.е. содержит только два типа сегментов, расположенных через

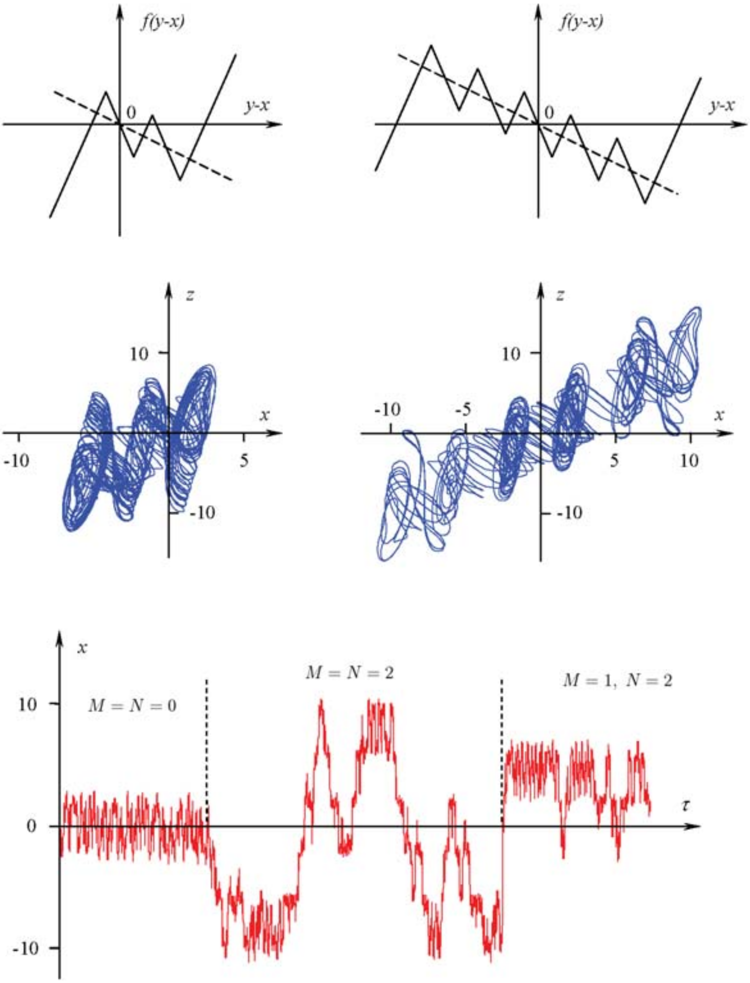

Рис. 1. Модуляция хаотического сигнала изменением числа сегментов регулярной многосегментой нелинейной функции

одинаковые интервалы (см. рис. 1). В этом случае осью симметрии функции является прямая, пересекающая все сегменты (кроме боковых) посередине. В случае линейных сегментов такую нелинейность можно представить, например, следующим уравнением:

$$S(\xi) = b\xi + \frac{a-b}{2}\Bigg[-P(\xi) + \sum_{m=1}^{M}[P(\xi + mc\gamma) - \gamma] + \sum_{n=1}^{N}[P(\xi - nc\gamma) + \gamma]\Bigg], \qquad (1)$$

где $P(\xi) = \dfrac{|\xi+\gamma| - |\xi-\gamma|}{2}$; $c = 2\dfrac{a-b}{1-b}$. Коэффициенты a и b задают наклон сегментов, M и N — их число, равное $3 + 2(M + N)$, $M + N = 0, 1, 2, \ldots$; γ — масштабный коэффициент, равный единице, если только не ставится задача вариации масштаба нелинейной функции.

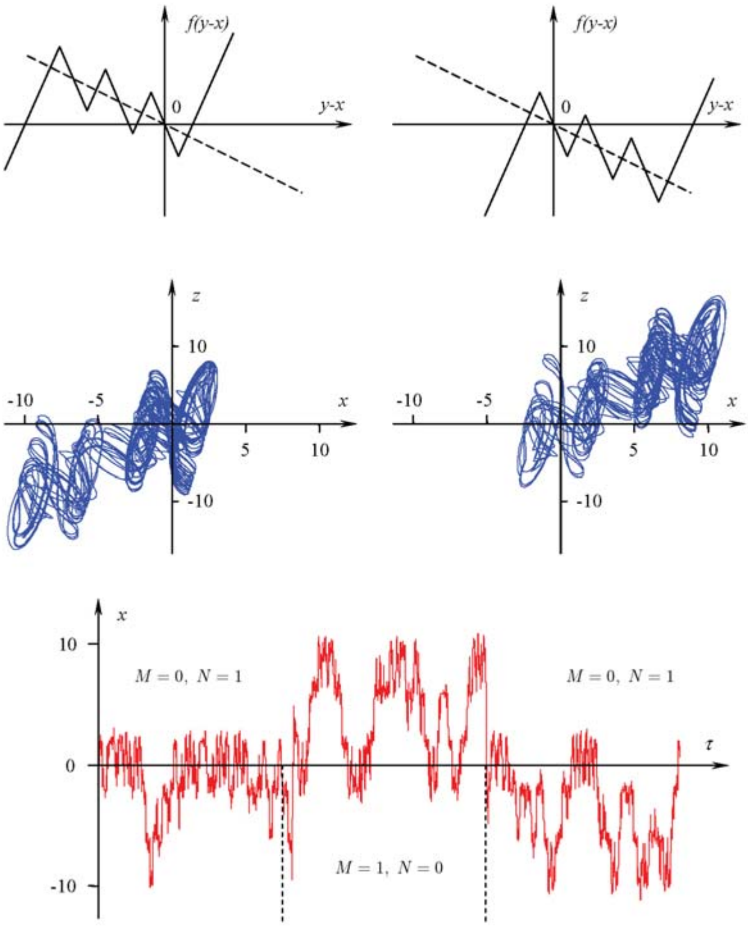

Рис. 2. Модуляция смещением нелинейной функции вдоль оси симметрии

Так как число сегментов образует ряд целых чисел, то при использовании первого способа модулирующий сигнал должен быть дискретным. Глубина модуляции лимитируется числом сегментов в составе нелинейной функции, которое равно $3 + 2k$, $k = 0, 1, 2, \ldots$ [5]. Поэтому максимальная глубина модуляции в общем случае здесь равна $\dfrac{2k}{3+2k}$, т.е. может изменяться от 40 % при $k = 1$ до 80 % при $k = 6$ и (в пределе) до 100 % при неограниченном увеличении числа сегментов.

В частности, такая модуляция может осуществляться пошаговым смещением нелинейной функции вдоль линии нагрузки. Этот способ основан на свойстве трансляционной инвариантности режима колебаний автономных динамических систем с регулярной многосегментной нелинейностью.

При смещении такой нелинейной функции вдоль оси симметрии на интервал $[kc, kc]$, где k — целое число, все однотипные сегменты переходят друг в друга: сегменты с наклоном a в сегменты с на-

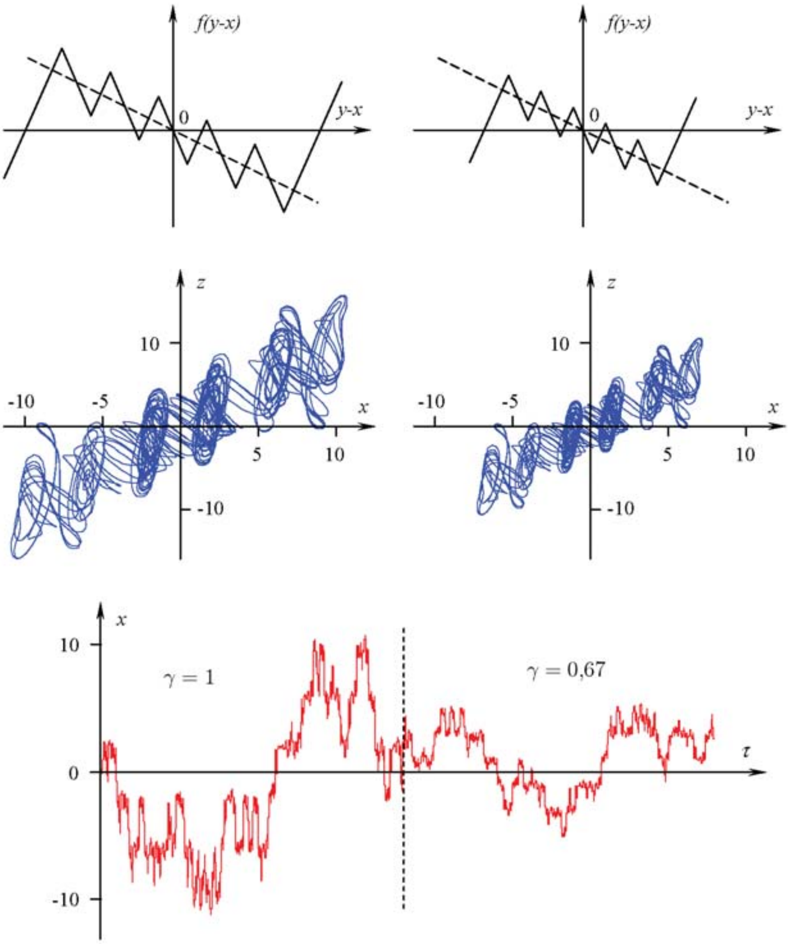

Рис. 3. Модуляция масштабированием

клоном a, сегменты с наклоном b в сегменты с наклоном b. Кроме этого трансляционная симметрия распространяется на смещение регулярной многосегментной функции на интервалы, кратные интервалу $[1 - c/2, 1 + c/2]$. В этом случае происходит обмен местоположений сегментов с наклоном a и сегментов с наклоном b.

Любые смещения такого типа сохраняют как конфигурацию нелинейной функции, так и все параметры хаотического сигнала. Изменяется лишь положение нелинейной функции относительно центра координат, который при этом всегда находится в пределах одного из сегментов функции в точке его пересечения с осью симметрии многосегментной функции.

Полное сохранение режима колебаний наблюдается также при модуляции изменением масштаба нелинейной функции (см. рис. 3). В данном случае модулирующий сигнал может быть не только дискретным, но и аналоговым.

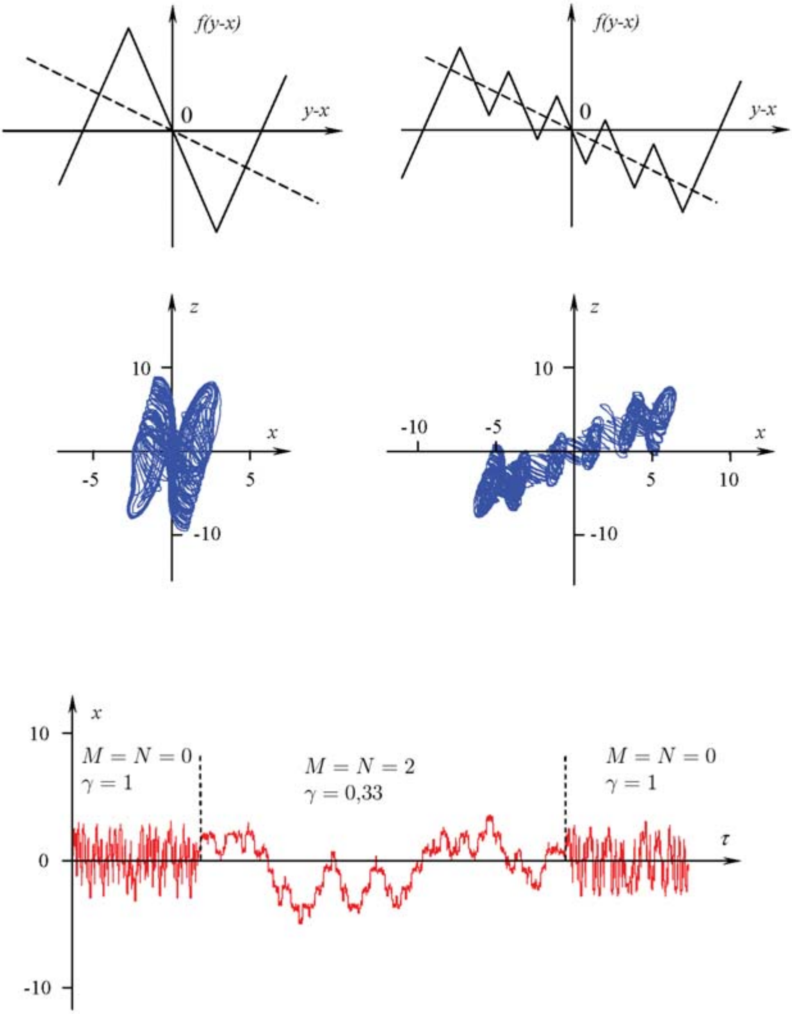

Рис. 4. Модуляция комбинацией изменения числа сегментов и масштабирования

Возможны также различные комбинации перечисленных способов модуляции, например совмещение изменения масштаба нелинейной функции и числа сегментов в ее составе (рис. 4).

2. Способы модуляции, связанные с изменением режима колебаний в окрестностях положений равновесия, отвечающих средним сегментам нелинейной функции. Здесь возможно очень большое число самых разных вариантов, приведем только некоторые наиболее характерные примеры, принимая сегменты линейными.

Способы модуляции, сохраняющие профиль (наклон) сегментов:

— модуляция последовательным изменением длины сегментов вдоль оси симметрии нелинейной функции (рис. 5). Так как длина сегментов может изменяться непрерывно, этот метод позволяет модулировать хаотическое колебание как дискретным, так и аналоговым

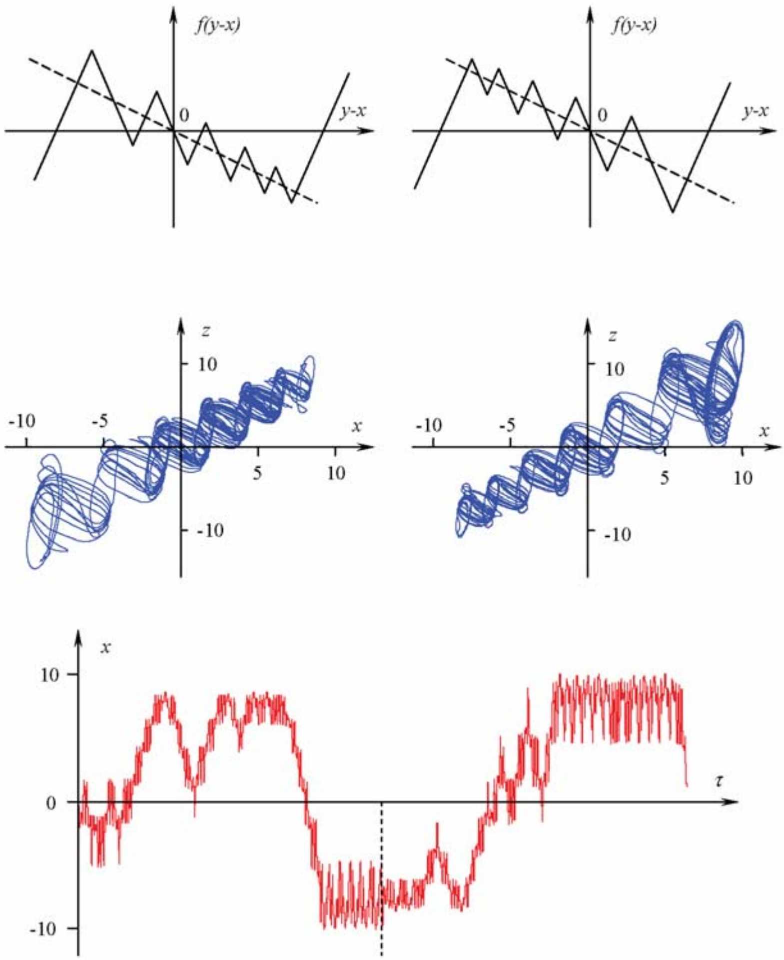

Рис. 5. Модуляция изменением длины сегментов

сигналами. Глубина модуляции зависит от допустимой степени вариации длины сегментов;

— модуляция смещением нелинейной функции поперек оси симметрии. Смещение должно быть таким, чтобы начало координат оставалось в пределах одного из сегментов. Этот способ также позволяет модулировать хаотические колебания и дискретными, и аналоговыми сигналами. Глубина модуляции определяется относительной величиной допустимого поперечного смещения нелинейной функции.

Способы модуляции, предполагающие изменение профиля (наклона) сегментов:

— модуляция изменением наклона всех или отдельных сегментов вдоль нелинейной функции (рис. 6); Так как наклон сегментов может изменяться непрерывно, этот метод позволяет модулировать хаотическое колебание как дискретным, так и аналоговым сигналами. Глубина модуляции зависит от допустимой степени вариации наклонов одно-

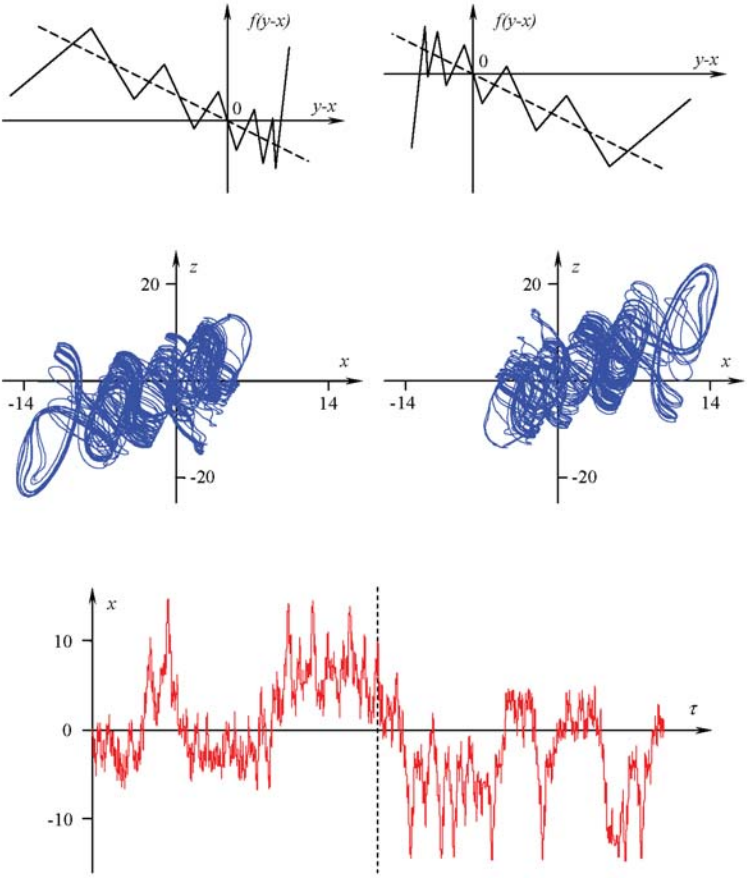

Рис. 6. Модуляция изменением наклона сегментов

типных сегментов. Очевидно, что существует большое число разнообразных вариантов этого способа.

— модуляция разворотом нелинейной функции относительно оси симметрии (рис. 7). Этот способ является частным случаем предыдущего. Позволяет модулировать хаотические колебания аналоговыми и дискретными сигналами.

На рис. 1–6 показаны видоизменения хаотического аттрактора и временных реализаций генерируемых колебаний при модуляции модифицированного генератора хаотических колебаний с отрицательной индуктивностью, динамика которого описывается следующей системой уравнений [14]:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\tau} &= A\left[f(y-x) - x\right]; \\ \frac{dy}{d\tau} &= f(y-x) + z; \\ \frac{dz}{d\tau} &= -By. \end{aligned} \qquad (2)$$

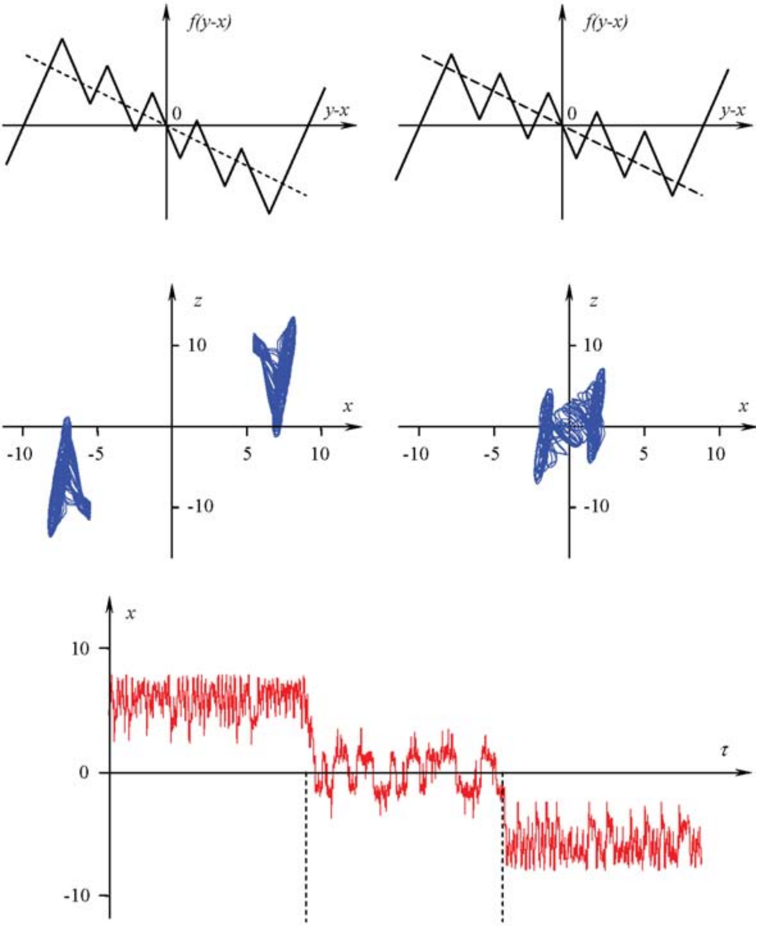

Рис. 7. Модуляция разворотом нелинейной функции относительно оси симметрии

Здесь используется нелинейная функция (1) (соответствует рис. 1–4) или ее обобщение на случай различных наклонов и произвольного относительного положения сегментов:

$$S(\xi) = S0(\xi) + Sm(\xi) + Sn(\xi) + Sme(\xi) + Sne(\xi); \tag{3}$$

$$S0(\xi) = am_0 \frac{|\xi - cn_0| - |\xi - cm_0| + cm_0 - cn_0}{2};$$

$$Sm(\xi) = \sum_{m=1}^{M} am_m \frac{|\xi - cm_{m-1}| - |\xi - cm_m| + cm_m - cm_{m-1}}{2};$$

$$Sn(\xi) = \sum_{n=1}^{N} an_n \frac{|\xi - cn_n| - |\xi - cn_{n-1}| + cn_n - cn_{n-1}}{2};$$

$$Sme(\xi) = am_M \frac{|\xi - cm_M| + \xi - cm_M}{2}, \quad Sne(\xi) = an_N \frac{\xi - |\xi - cn_N|}{2};$$

$$cm_i = cm_0 \left[1 + 2am_0 \sum_{k=1}^{i} \frac{(-1)^k}{am_k}\right] + \sum_{k=1}^{i} (-1)^k \frac{\Delta m_{k-1} + \Delta m_k}{am_k};$$

$$cn_j = cn_0 \left[1 + 2an_0 \sum_{k=1}^{j} \frac{(-1)^k}{an_k}\right] + \sum_{k=1}^{j} (-1)^k \frac{\Delta n_{k-1} + \Delta n_k}{an_k}.$$

В выражении (3) коэффициенты am_i и an_j задают наклоны сегментов, а коэффициенты Δm_i и Δn_j — это смещения ординат границ сегментов относительно их положений, отвечающих случаю регулярной многосегментной нелинейности (рис. 8).

Постоянные в уравнениях (2) выбирались равными $A = 2$, $B = 7$, $a = -4$, $b = 2$.

Отличительной особенностью сигналов, генерируемых автостохастическими системами с многосегментной нелинейностью, является, несмотря на существенную разницу свойств используемых генераторов хаоса, практически полная идентичность свойств низкочастотной импульсной составляющей таких сигналов, которая содержит всю информацию о модулирующем сигнале. Это делает их полностью сходными с наиболее широко используемыми в настоящее время носителями информации — модулированными сигналами с детерминированной несущей.

Поэтому использование генераторов хаоса с управляемой многосегментной нелинейностью позволяет дополнить известные методы

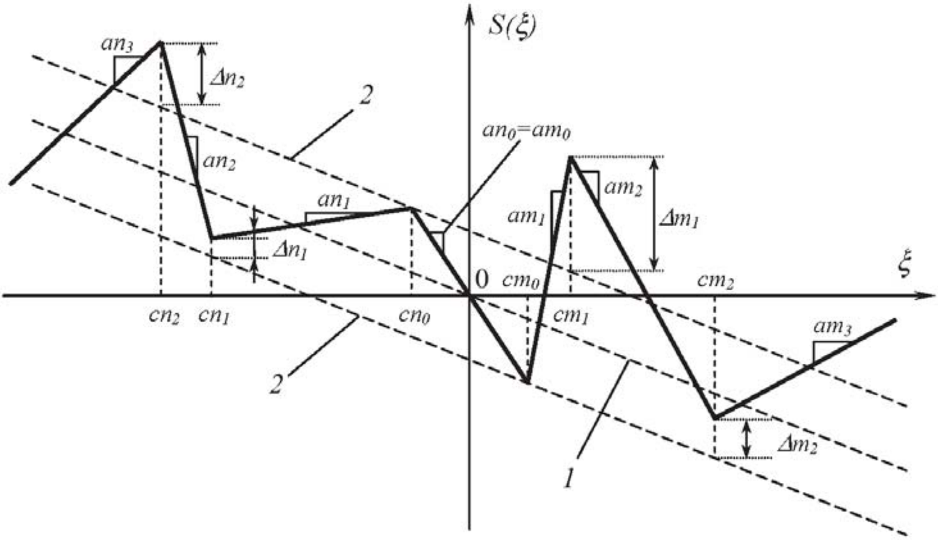

Рис. 8. Многосегментная нелинейная функция с имеющими различный наклон и длину линейными сегментами:
1 — ось симметрии регулярной многосегментной функции; *2* — линии, на которых расположены точки соединения ее сегментов

модуляции хаотических колебаний [1] новым, отличительной чертой которого является, с одной стороны, большая гибкость (основанная, в частности, на возможности модуляции непосредственно источников хаотических колебаний при сохранении режима колебаний), а с другой — возможность получения стандартизированных случайных процессов с помощью самой разнообразной аппаратурной базы.

С учетом того что физическими величинами, испытывающими хаотическое движение, в электронных генераторах могут быть не только напряжение и ток, но также частота и фаза (например, в автостохастических системах частотной и фазовой автоподстройки частоты [15]), область применения перечисленных способов модуляции может оказаться достаточно широкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. – М.: Физматлит, 2002. – 252 с.
2. Дмитриев А. С., Клецов А. В., Лактюшкин А. М., Панас А. И., Старков С. О. Сверхширокополосные коммуникационные системы на основе динамического хаоса // Успехи современной радиоэлектроники. – 2008. – № 1. – С. 4–16.
3. 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 / Пат. РФ № 2185032, приоритет от 27.07.2000.
4. Kocarev L., Halle K. S., Eckert K., Chua L. O., Parlitz U. Experimental demonstration of secure communications via chaotic synchronization // International Journal of Bifurcation & Chaos in Applied Sciences & Engineering. – 1992. – Vol. 2, no. 3. – P. 709–713.
5. Parlitz U., Chua L. O., Kocarev L., Halle K. S., Shang A. Transmission of digital signals by chaotic synchronization // International Journal of Bifurcation & Chaos in Applied Sciences & Engineering. – 1992. – Vol. 2, no. 4. – P. 973–977.
6. Itoh M., Murakami H. New communication systems via chaotic synchronizations and modulations // IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications & Computer Sciences. – 1995. – Vol. E78-A, no. 3. – P. 285–290.
7. Li Z., Li K., Wen C., Soh Y. C. A new chaotic secure communication system // IEEE Transactions on Communications. – 2003. – Vol. 51, no. 8. – P. 1306-1312; applications, Vol. 1. – P. 141–144.
8. Прокопенко В. Г. Динамический аналог схемы Чуа с многосегментной нелинейностью // Доклады РАН. – 2004. – Т. 396. – № 3. – С. 317–323.
9. Прокопенко В. Г. Генератор гиперхаотических колебаний. Пат. РФ 2208899. Опубл. 2003, БИПМ № 20.
10. Прокопенко В. Г. Генератор хаотических колебаний. Пат. РФ 2208897. Опубл. 2003, БИПМ № 20.
11. Прокопенко В. Г. Генератор хаотических колебаний. Пат. РФ 2209503. Опубл. 2003, БИПМ № 21.
12. Прокопенко В. Г. Генератор хаотических колебаний. Пат. РФ 2208899. Опубл. 2003, БИПМ № 20.

13. П р о к о п е н к о В. Г. Генератор хаотических колебаний. Пат. РФ 2321155. Опубл. 2008, БИПМ № 9.
14. П р о к о п е н к о В. Г. Генератор хаотических колебаний. Пат. РФ 2220497. Опубл. 2003, БИПМ № 36.
15. К о з л о в А. К., Ш а л ф е е в В. Д. Управление хаотическими колебаниями в генераторе с запаздывающей петлей фазовой автоподстройки // Известия вузов. Сер. Прикладная нелинейная динамика. – 1994. – Т. 2. – № 2.

Статья поступила в редакцию 10.11.2008

Вадим Георгиевич Прокопенко — ведущий конструктор НКБ “Миус” Таганрогского государственного радиотехнического университета, канд. техн. наук. Автор более 100 научных работ в области теории автономных автостохастических систем, полупроводниковой электроники, высокостабильных источников опорной частоты.

V.G. Prokopenko — Ph. D. (Eng.), leading designer of the design bureau “Mius” of the Taganrog State Radio Engineering University. Author of more than 100 publications in the field of the theory of independent auto stochastic systems, semiconductor electronics, sources of basic frequency.