



ПРЕЦИЗИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ НЕЛИНЕЙНОГО ЭЛЕМЕНТА

Л. В. Кузьмин, Н. А. Максимов, А. И. Панас

Рассматривается прецизионный генератор хаотических колебаний с 1.5 степенями свободы, представляющий собой последовательное соединение двух линейных и одного нелинейного четырехполосника в единую кольцевую схему и имеющий характеристику нелинейного элемента в виде кусочно-линейной функции. Численно и экспериментально исследуются типовые хаотические режимы генератора. Демонстрируется возможность анализа режимов генератора с помощью специального пакета прикладных программ Electronics Workbench, предназначенного для моделирования различных радиотехнических схем и устройств. Приводится принципиальная схема реализации нелинейного элемента.

Введение

С момента обнаружения динамического хаоса прошло уже более 30 лет [1–2]. За это время проявления динамического хаоса обнаружены в самых разнообразных областях (механика, биология, радиоэлектроника, экономика и т.п.), свойства его хорошо изучены и сегодня актуальным является вопрос практического использования полученных результатов.

Среди приложений динамического хаоса особое место занимают прикладные задачи, решение которых связано с необходимостью получения и использования хаотических сигналов. На практике функцию источников хаотических сигналов выполняют генераторы хаоса. Если на этапе исследования генераторов основное внимание уделялось изучению особенностей колебательных режимов (условия возникновения, бифуркационные явления и т.п.), то сегодня прикладные задачи выдвигают на передний план решение специфических проблем, связанных с конкретными применениями генераторов.

Одним из таких применений является использование генераторов хаоса для создания новых подходов к передаче информации [3–4]. В последние годы отмечен возросший интерес к этой проблеме. Проведены эксперименты как в низкочастотном, так и в радиочастотном диапазонах, подтверждающие возможность реализации указанных подходов. Однако использование полученных результатов на практике встречает определенные трудности. Одной из основных проблем является качество выделяемого в приемнике информационного сообщения. Генераторы хаоса являются базовым элементом приемно-передающих устройств, и от того, насколько точно удастся их воспроизвести (в приемнике и в передатчике) и зависит, главным образом, качество передачи. Другими словами,

при использовании динамического хаоса в системах передачи информации возникает проблема прецизионности используемых в них генераторов хаоса.

Принимая во внимание тот факт, что генераторы хаоса представляют собой специфические автоколебательные системы с высокой чувствительностью к параметрам и начальным (стартовым) условиям, необходимо пояснить, какое содержание вкладывается в термин «прецизионный генератор хаоса» и что является критерием определения прецизионности.

Структура коммуникационных систем с хаосом включает в себя передатчик (ведущая хаотическая система) и приемник (ведомая хаотическая система). Большая часть из известных на сегодняшний день схем передачи информации базируется на получении в приемнике синхронного хаотического отклика [5,6], который означает, что на выходе ведомой системы формируется хаотический сигнал, идентичный (или очень близкий, с высокой степенью соответствия) по своим характеристикам к сигналу на ее входе. В этом случае приемник является пассивной системой, в основе которой лежит такой же генератор хаоса, что и в ведущей системе, но с разорванной обратной связью. По существу, ведомая система представляет собой согласованный нелинейный фильтр по отношению к сигналу ведущей системы. Таким образом, в качестве критерия прецизионности генераторов хаоса в работе выступает синхронный хаотический отклик в паре ведущая – ведомая система.

Целью данной работы является рассмотрение конструкции прецизионного генератора и исследование как численными методами, так и экспериментально его наиболее типичных режимов.

Структура работы следующая. В разделе 1 обсуждаются необходимые условия прецизионности генераторов хаоса, во 2-м разделе рассматривается структура генератора с 1.5 степенями свободы, удовлетворяющего сформулированным условиям. Затем, в разделе 3 вводится математическая модель генератора и анализируются результаты численных экспериментов. Далее, в разделе 4 рассматривается принципиальная схема реализации нелинейного элемента и объясняется процесс формирования его кусочно-линейной характеристики. Раздел 5 посвящен радиотехническому моделированию генератора с помощью специального программного пакета Electronics Workbench. И, наконец, в разделе 6 приводятся результаты физических экспериментов.

1. Генераторы хаоса с кусочно-линейной характеристикой

К настоящему моменту известно довольно большое число генераторов хаоса, отличающихся как по конструкции, так и по типовым хаотическим режимам. Однако их общим свойством является то, что они представляют собой совокупность линейных и одного (нескольких) нелинейных элементов. С точки зрения радиотехнической реализации, линейные элементы могут быть как пассивными (сопротивления, конденсаторы, катушки индуктивности), так и активными (усилители и т.п.). Функцию нелинейных элементов могут выполнять как стандартные элементы (диоды, транзисторы,...), так и специально разработанные приборы или схемы, обладающие нелинейной функцией преобразования для одной (нескольких) характеристики проходящего через них сигнала.

Для того чтобы два генератора одной и той же структуры были прецизионными, необходимо попарно обеспечить идентичность всех составляющих его одинаковых элементов. Что касается линейных элементов, то их можно подобрать с довольно высокой точностью. Идентичность же нелинейных элементов подразумевает совпадение их функций преобразования сигнала. В случае использования стандартных нелинейных элементов, обладающих гладкими функциями преобразования, подбор двух одинаковых элементов, как правило, представляет собой гораздо более сложную проблему, а для специальных схем с такого вида функциями и совсем трудноразрешимую.

Выходом в данной ситуации является применение в конструкциях генераторов хаоса специально разработанных нелинейных элементов с воспроизводимыми функциями преобразования*. Примерами указанных функций являются кусочно-линейные функции, состоящие из нескольких линейных сегментов. При этом используется возможность воспроизведения характеристики нелинейного элемента на каждом из сегментов вследствие его линейности.

Широко известным примером генератора хаоса с кусочно-линейной характеристикой нелинейного элемента является цепь Чуа [7]. В ней функцию нелинейного элемента выполняет специально синтезированное нелинейное сопротивление с трехсегментной вольт-амперной характеристикой. Двухсегментные вольт-амперные характеристики используются в нелинейных элементах генераторов, рассмотренных в [8]. Другим примером является генератор, у которого функцию преобразования выполняет пятисегментная амплитудная характеристика нелинейного элемента, реализованного с помощью стандартных элементов – диодов [9].

2. Структура генератора с 1.5 степенями свободы

В основе структуры генератора (рис. 1, а), рассматриваемого в данной работе, лежит принцип построения хаотических автоколебательных систем [10–13], в соответствии с которым составляющие генератор элементы последовательно соединяют в схему, образующую единое кольцо обратной связи. При этом соединение элементов осуществляется через буферные устройства, которые обеспечивают однонаправленность обратной связи генератора и развязку между элементами. Чтобы реализовать указанные свойства, буферные устройства должны иметь большое входное и малое выходное сопротивления, обладать единичным коэффициентом передачи в прямом направлении и нулевым в обратном. В качестве составляющих генератор элементов могут выступать пассивные и активные, линейные и нелинейные, простые и сложные, имеющие свою внутреннюю структуру, элементы. Поэтому на рис. 1, а они изображены как подсистемы. В схемотехническом представлении такие подсистемы являются четырехполосниками.

Простейший генератор этого класса состоит из нелинейного элемента $F(z)$ (подсистема 1) с амплитудным преобразованием входного сигнала z (рис. 1, б), RC -фильтра низких частот (подсистема 2), RLC -фильтра низких частот (подсистема 3) и является автоколебательной системой с 1.5 степенями свободы. Функцию

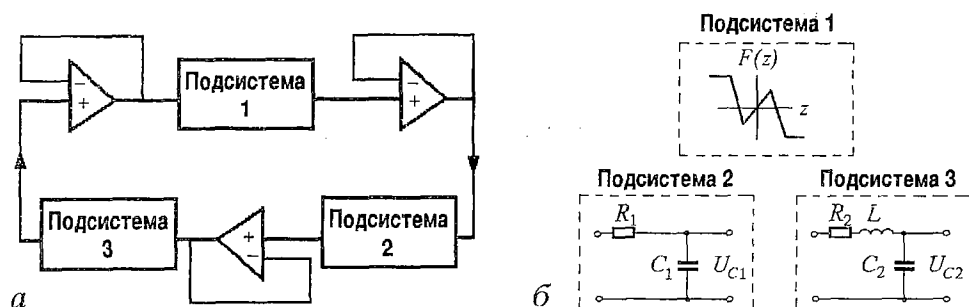


Рис. 1. Структура генератора хаотических колебаний: а – блок-схема генератора; б – структура подсистем, входящих в состав генератора: подсистема 1 – нелинейный элемент с кусочно-линейной характеристикой, подсистема 2 – фильтр низких частот первого порядка, подсистема 3 – фильтр низких частот второго порядка

* Другой возможный вариант – использование цифровых сигнальных процессоров – выходит за пределы данной работы и в ней не рассматривается.

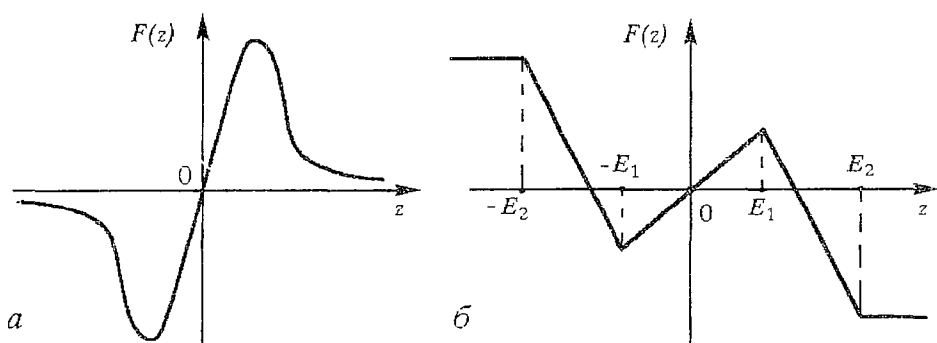


Рис. 2. Характеристика нелинейного элемента: а – гладкая, б – пятиsegmentная кусочно-линейная

устройств развязки выполняют буферные каскады на операционных усилителях. Динамика такого генератора с характеристикой нелинейного элемента

$$F(z) = Mz \exp(-z^2), \quad (1)$$

где M – коэффициент усиления, хорошо изучена [12, 14–15] и включает в себя разнообразные хаотические режимы с широкими зонами устойчивости в пространстве управляющих параметров генератора. Форма характеристики (1) представлена на рис. 2, а. Как видно из рисунка, она является гладкой функцией, что в силу указанных в предыдущем разделе причин делает проблематичным воспроизводимость генератора, а значит и использование его в прикладных задачах.

Чтобы сделать генератор воспроизводимым, сохранив при этом разнообразие хаотических режимов, предлагается использовать нелинейный элемент с кусочно-линейной пятиsegmentной характеристикой (рис. 2, б), сохраняющей подобие с характеристикой (1) и представляемой в виде

$$F(z) = M[|z + E_1| - |z - E_1| + (|z - E_2| - |z + E_2|)/2], \quad (2)$$

где E_1, E_2 – константы, M – коэффициент усиления. Конкретный выбор E_1, E_2 и M однозначно определяет характеристику (2). Наличие внешних ограничивающих сегментов связано с реально существующим на практике ограничением уровня амплитуд выходных сигналов различных устройств, применяемых в радиотехнике.

3. Математическая модель

Динамические режимы генератора описываются с помощью дифференциальных уравнений, получаемых из законов Кирхгофа для подсистем – четырехполюсников (см. рис. 1, б).

Обозначая напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 через U_{C1} и U_{C2} , соответственно, рассмотрим каждую из трех подсистем как четырехполюсник.

Подсистема 1 представляет собой четырехполюсник с нелинейной функцией преобразования амплитуды входного сигнала $F(z)$ (2). Входным сигналом для нее является выходной сигнал подсистемы 3, то есть напряжение U_{C2} . Таким образом выходным сигналом подсистемы 1 является напряжение $F(U_{C2})$.

Подсистема 2 представляет собой фильтр низких частот 1-го порядка, на вход которого подается напряжение $F(U_{C2})$, а выходным сигналом является U_{C1} . В соответствии со вторым законом Кирхгофа, принимая во внимание большое входное сопротивление буферного каскада, подсоединенного к выходу подсистемы, зависимость между напряжениями можно описать уравнением

$$C_1 R_1 dU_{C1}/dt = F(U_{C2}) - U_{C1}. \quad (3)$$

Подсистема 3 является фильтром низких частот второго порядка с входным напряжением U_{C1} и выходным U_{C2} . По аналогии с подсистемой 2 применение закона Кирхгофа приводит к следующему уравнению:

$$LC_2 d^2 U_{C2} / dt^2 + C_2 R_2 dU_{C2} / dt = U_{C1} - U_{C2}. \quad (4)$$

Объединение (3) и (4) приводит к системе дифференциальных уравнений, описывающих динамические режимы генератора,

$$C_1 R_1 dU_{C1} / dt = F(U_{C2}) - U_{C1}, \quad (5)$$

$$LC_2 d^2 U_{C2} / dt^2 + C_2 R_2 dU_{C2} / dt = U_{C1} - U_{C2}.$$

Если обозначить $U_{C1}=x$, $U_{C2}=z$, $C_1 R_1=T$, $R_2/L=\alpha$, $1/(LC_2)=\omega^2$ и ввести новую переменную $y=dU_{C2}/dt-R_2 U_{C2}/L$, то систему (5) можно представить в виде

$$\begin{aligned} x &= (F(z) - x)/T, \\ y &= \omega^2(x - z), \\ z &= y - \alpha z. \end{aligned} \quad (6)$$

Система (6) позволяет использовать стандартные численные методы решения дифференциальных уравнений (например, метод Рунге – Кутты) для анализа динамических режимов генератора. Результатом решения системы являются зависимости $x(t)$ и $z(t)$. Изменяя параметры системы (M , 85 , ω , α , E_1 , E_2) и анализируя получаемые реализации $x(t)$, $z(t)$, можно исследовать режимы генератора. Однако для того, чтобы сделать заключение о характере колебаний генератора, анализа реализаций недостаточно. В этом случае прибегают к другим характеристикам (спектры мощности, фазовые портреты, ляпуновские показатели, бифуркационные диаграммы и др.), для получения которых используют специальные программные средства [12].

Рассмотрим особенности возникновения различных колебательных режимов в модели генератора, описываемого системой (6). Эта система уравнений имеет три положения равновесия

$$(x, y, z)_1 = (0, 0, 0), \quad (7)$$

$$(x, y, z)_{2,3} = \pm [2ME_1 / (M+1)] (1, \alpha, 1). \quad (8)$$

Условия устойчивости точек равновесия определяются из линеаризованной в окрестности точек равновесия системы (6), анализ которой показывает, что устойчивость положения равновесия в начале координат возможна лишь в случае малых коэффициентов усиления, удовлетворяющих соотношению $M < 1$. С другой стороны, ненулевые положения равновесия сохраняют устойчивость при $T \ll 1$, $\alpha \gg 1$ и относительно небольших M ($M > 1$). Если параметры T и α соизмеримы с единицей, то увеличение M рано или поздно приводит к потере устойчивости положений равновесия (8) и возникновению автоколебаний.

Специфика динамических режимов рассматриваемого генератора при численном эксперименте отражена на бифуркационной диаграмме (рис. 3) и состоит в том, что при фиксированных

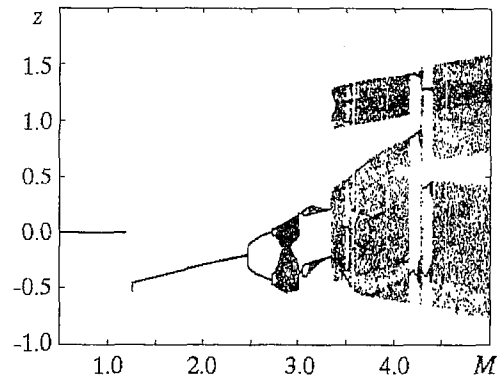


Рис. 3. Бифуркационная диаграмма: зависимость максимальных значений реализации сигнала z с выхода фильтра низких частот второго порядка от коэффициента усиления M при $\alpha=0.22$, $T=3$, $\omega=1$, $E_1=0.5$, $E_2=2$

параметрах T , ω , α , E_1 , E_2 и увеличении коэффициента усиления M жестким образом возбуждаются регулярные колебания вокруг одного из ненулевых положений равновесия с частотой, близкой к резонансной частоте фильтра второго порядка. Затем регулярные колебания теряют устойчивость и после ряда бифуркаций удвоения становятся хаотическими. На следующем этапе возникают колебания и вокруг второго из ненулевых положений равновесия. Хаотический аттрактор становится похожим на «двойную спираль» («double-scroll»), например, для цепи Чуа. И, наконец, дальнейшее увеличение M приводит к появлению хаотических колебаний, охватывающих все три положения равновесия.

На рис. 4 представлены наиболее типичные хаотические режимы генера-

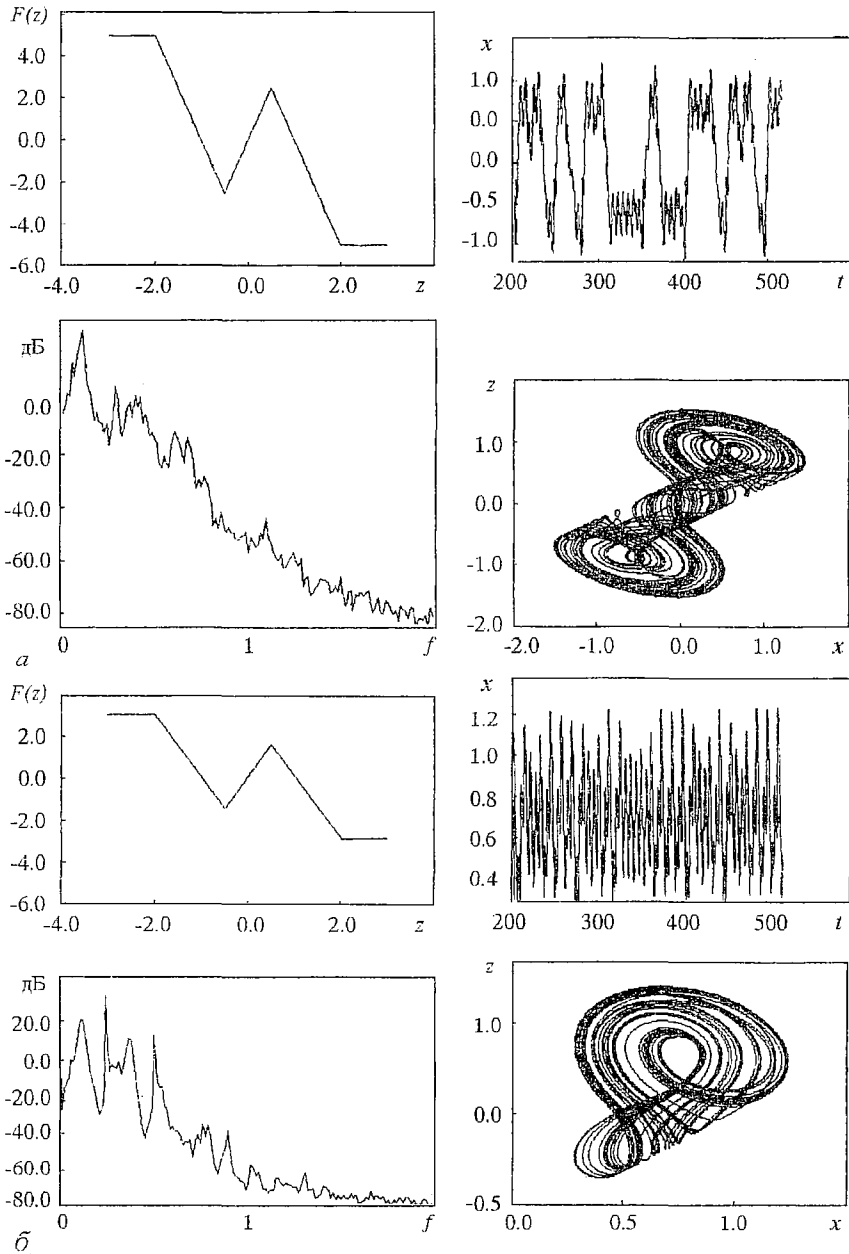


Рис. 4. Численный эксперимент: форма характеристики нелинейного элемента, форма сигнала $x=U_{C1}$ на выходе подсистемы 2, его спектр мощности и фазовый портрет в плоскости (x, z) , где $z=U_{C2}$, для различных значений коэффициента усиления: $a - M=5$, $b - M=3$; $\alpha=0.22$, $T=3$, $\omega=1$, $E_1=0.5$, $E_2=2$

тора, полученные при численном моделировании (6) при тех же фиксированных параметрах, как на рис. 3, и различных значениях M . Как видно из рисунка, изменение даже одного из параметров может приводить к появлению совершенно различных по своим характеристикам хаотических режимов. Так, рис. 4, *a* демонстрирует режим, характерной особенностью которого являются последовательные во времени хаотические колебания вокруг двух ненулевых неустойчивых положений равновесия. Как видно из рисунка, время нахождения траектории в окрестности каждого из положений равновесия не является постоянной величиной, а изменяется, принимая случайно-подобный характер.

Уменьшение коэффициента усиления M приводит к возникновению колебаний вокруг только одного из положений равновесия (рис. 4, *б*). Спектр мощности становится более изрезанным, а в реализации $x(t)$ появляется постоянная составляющая.

4. Реализация нелинейного элемента

Практическая значимость рассматриваемого генератора определяется тем, насколько физически реализуем и воспроизводим нелинейный элемент с

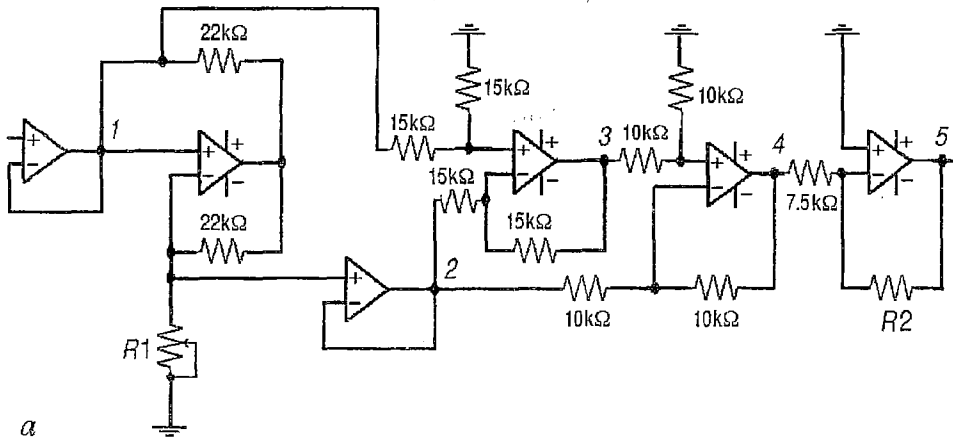
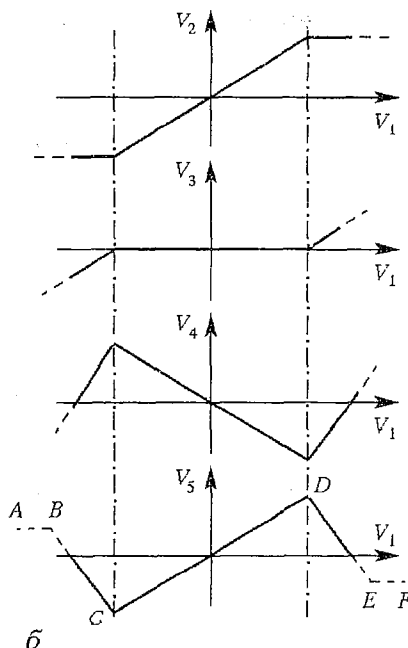


Рис. 5. Реализация нелинейного элемента: *a* – принципиальная схема; *б* – эпюры напряжений в узлах схемы

характеристикой (2). Выше упоминался генератор с подобной пятисегментной характеристикой нелинейного элемента на диодах. Однако, будучи нелинейными элементами, диоды затрудняют воспроизводимость характеристики.

Чтобы избежать этого недостатка, ниже рассматривается конструкция нелинейного элемента, содержащая операционные усилители и линейные пассивные компоненты. На рис. 5, *a* представлена его принципиальная схема. Входящие в состав элемента операционные усилители работают в линейном режиме.

На рис. 5, *б* приведены эпюры напряжений в различных узлах схемы рис. 5, *a*, иллюстрирующие формирование характеристики (2). V_2 представ-



ляет напряжение на выходе амплитудного ограничителя, на вход которого подается напряжение V_1 . V_3 является разностью напряжений V_1 и V_2 , а V_4 – разностью напряжений V_3 и V_2 . Крайний справа операционный усилитель осуществляет усиление и инвертирование напряжения V_4 .

Сопrotивления R_1 и R_2 являются элементами, управляющими параметрами M и E_1 характеристики (2). С помощью R_2 осуществляется изменение крутизны сегмента CD (M), R_1 регулирует ширину сегмента CD по оси абсцисс (E_1). Внешние сегменты AB и EF определяются напряжениями питания используемых в схеме операционных усилителей. На рис. 5, б они изображены штриховой линией, так как реально (в типовых режимах, рассматриваемых в работе) не принимают участия в формировании хаотических колебаний.

5. Применение программы Electronics Workbench для схемотехнического моделирования на PC

Схемотехническое моделирование генератора производилось с помощью пакета прикладных программ Electronics Workbench (версия 4.1). Пакет разработан фирмой Interactive Image Technologies Ltd., является развитием программы SPICE и удобен тем, что достоверность получаемых с его помощью результатов позволяет в ряде случаев заменить физический эксперимент, а такие качества, как простота в обращении и наглядность представления результатов, делают его эффективным инструментом при анализе поведения моделируемых радиотехнических устройств. Electronics Workbench снабжен графическим редактором принципиальных схем и набором виртуальных приборов для конструирования и анализа в интерактивном режиме как аналоговых, так и цифровых схем. Графический интерфейс Electronics Workbench, работающий в среде Windows, позволяет одновременно отражать на мониторе PC чертеж схемы и результаты ее моделирования на экране виртуальных приборов. Обширный выбор различных стандартных радиотехнических элементов и устройств (осциллограф, измеритель АЧХ, генератор сигналов различной формы и др.), которые можно подключать к любому узлу моделируемой схемы, допускает моделирование довольно сложных схем. А богатая библиотека выпускаемых промышленностью активных элементов (операционные усилители, транзисторы и т.д.) позволяет пользователю анализировать реально воспроизводимые на практике схемы.

На рис. 6 приведена принципиальная схема генератора с кусочно–линейной характеристикой нелинейного элемента, собранная с помощью Electronics Workbench. В качестве операционных усилителей в ней используются микросхемы LM324A с напряжением питания $\pm 12\text{В}$. Структура нелинейного элемента полностью совпадает со схемой на рис. 5. К нелинейному элементу через буферные усилители подключены фильтры низких частот (подсистемы 2,3), образуя кольцевую схему в соответствии с рис. 1. Также, на рис. 6 показаны виртуальные осциллографы, два входа которых подсоединены к выходам фильтров низких частот. Первый осциллограф работает в режиме отражения временных реализаций $x(t)$, $z(t)$, второй – фазового портрета. В качестве примера на рисунке демонстрируется режим хаотических колебаний вокруг двух неустойчивых положений равновесия и соответствующие этому режиму номиналы элементов принципиальной схемы.

Особенностью схемы является то, что в цепь обратной связи генератора введен управляемый ключ, замыкающий ее только спустя 2 мс после включения генератора. Сделано это для того, чтобы избежать переходных процессов в схеме, связанных с формированием характеристики нелинейного элемента.

6. Физический эксперимент

Основной задачей экспериментов являлась практическая апробация генератора с точки зрения его прецизионных свойств, а также исследование его

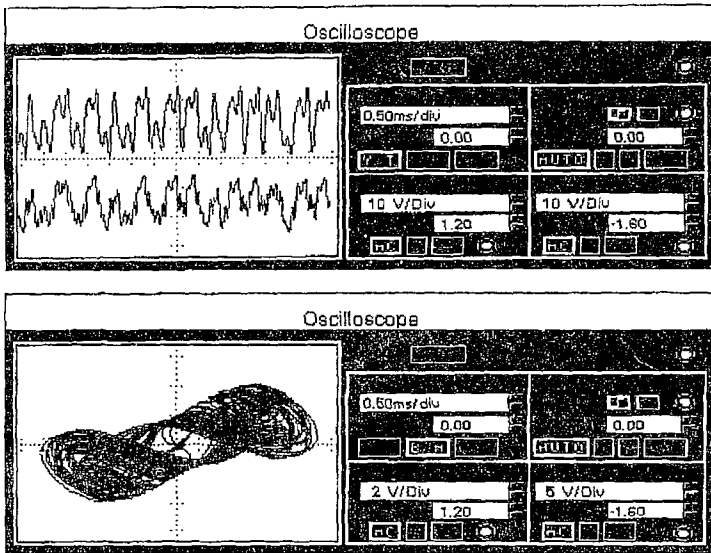
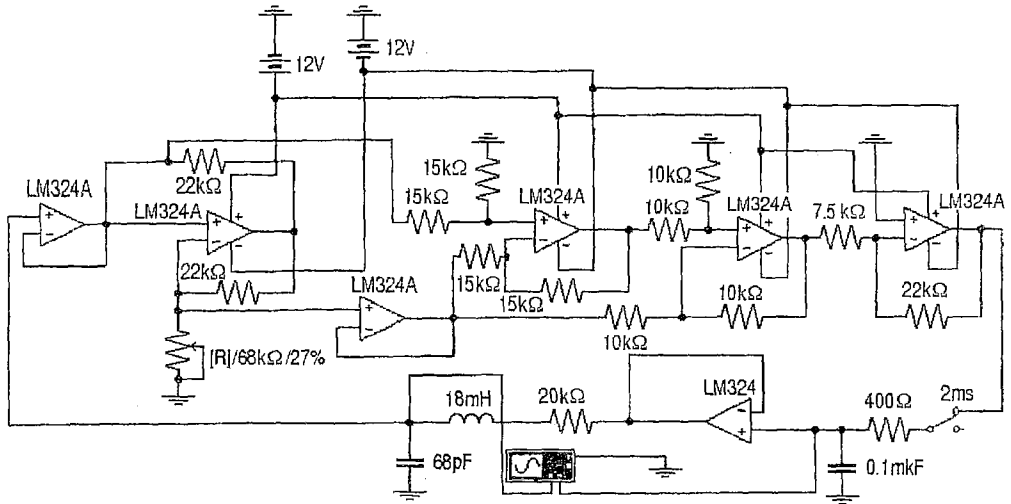


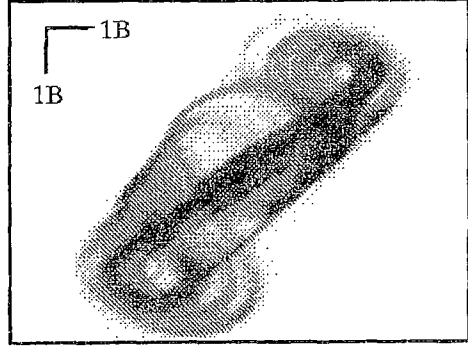
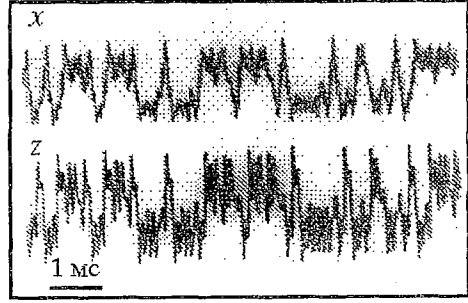
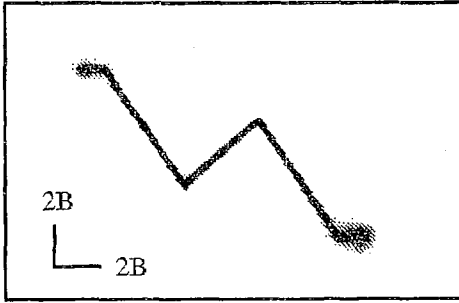
Рис. 6. Генератор хаотических колебаний, моделирование с помощью пакета прикладных программ Electronics Workbench. Принципиальная схема генератора и пример реализации хаотических сигналов и фазового портрета на виртуальном осциллографе

характерных хаотических режимов и сопоставление их с результатами моделирования.

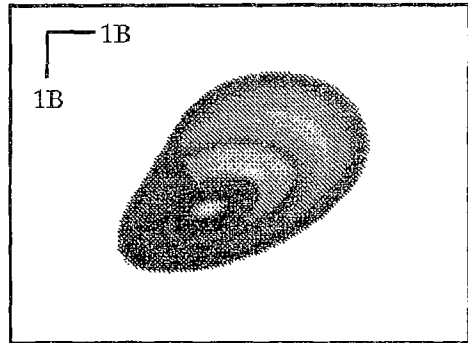
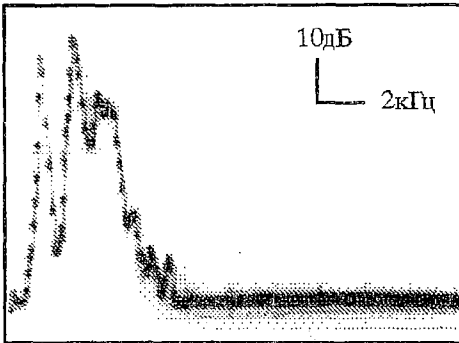
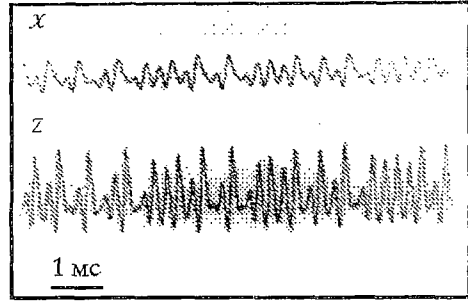
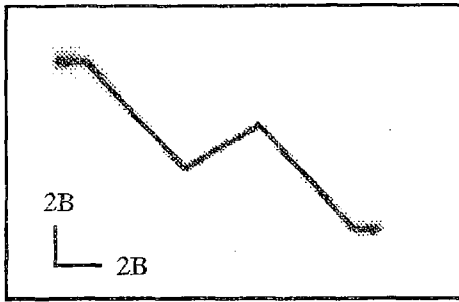
Эксперименты проводились с макетами генераторов, полностью соответствующими принципиальной схеме на рис. 6. Нелинейный элемент и буферные каскады были реализованы на базе операционных усилителей КР1401УД2Б, которые являются аналогами используемых в схеме усилителей LM324A. Такой выбор усилителей позволял варьировать напряжение питания в пределах $\pm(5\div 15)$ В.

На рис. 7, а, б представлены экспериментальные характеристики хаотических режимов при различных коэффициентах усиления M , качественно соответствующие режимам, приведенным на рис. 4, а, б. Рис. 7, в демонстрирует еще один типовой режим генератора. Он наблюдается при максимальном по отношению к рис. 7, а, б усилении и характеризуется возникновением колебаний вокруг трех положений равновесия, включая нулевое.

Проверка прецизионности осуществлялась на 4 макстах генераторов в соответствии с рассмотренным выше критерием, основанным на получении

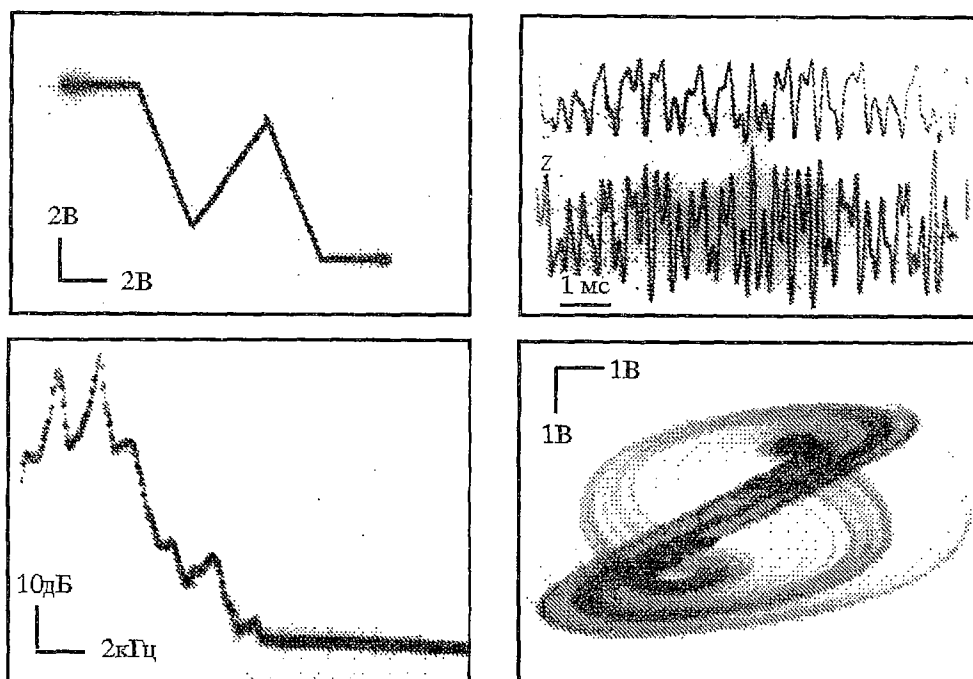


a



б

синхронного хаотического отклика в паре ведущая – ведомая система. При этом указанные генераторы попарно выполняли функции ведущей и ведомой систем. Пассивные элементы, входящие в состав генераторов, подбирались с точностью 1÷3 %. Эксперименты показали, что при условии выбора одинаковых параметров ($M, T, \omega, \alpha, E_1, E_2$) все генераторы демонстрируют идентичные по структуре и основным характеристикам хаотические колебания. Замена операционных



6

Рис. 7. Физический эксперимент: форма характеристики нелинейного элемента; осциллограммы сигналов x и z на выходах подсистем 2 и 3, соответственно; спектр мощности сигнала $x=U_{C1}$; фазовый портрет в плоскости (x,z) для различных значений коэффициента усиления: $a - M_1$, $b - M_2$, $в - M_3$ ($M_2 < M_1 < M_3$). $R_1=800$ Ом, $C_1=33$ нФ, $L=20$ мГн, $C_2=68$ нФ, $R_2=40$ Ом

усилителей или пассивных элементов (в пределах указанной точности) не приводит к нарушению воспроизводимости режимов! Более того, усилители КР1401УД2Б являются полностью взаимозаменяемыми с усилителями серии LM324А.

С другой стороны, то обстоятельство, что используемые в схеме операционные усилители работают в линейном режиме, позволяет применять и другие серии усилителей, например КР544УД1Б, сохраняя при этом совокупность типовых хаотических режимов.

Методика экспериментов по проверке прецизионности была основана на том, что для идентификации в физическом эксперименте двух прецизионных хаотических сигналов достаточно подать их на два входа осциллографа (входы X и Y). При этом, если сигналы совпадают или близки по форме и не имеют фазового сдвига один относительно другого, то на экране осциллографа наблюдается их фазовый портрет в виде прямой или очень близкой к ней линии. В случае несовпадающих сигналов фазовый портрет имеет существенно более сложную форму.

В качестве примера на рис. 8, *а* продемонстрирован синхронный хаотический отклик двух произвольно выбранных из тестируемых генераторов, один из которых играл роль ведущей системы, а другой – ведомой системы. Верхняя линия соответствует случаю, когда один и тот же хаотический сигнал подавался одновременно на оба входа осциллографа. Таким образом, она отражает ситуацию с идеальным синхронным откликом и выступает в качестве тестовой (калибровочной) линии. Для сравнения рис. 8, *б* иллюстрирует десинхронизацию (или отсутствие синхронного отклика), наблюдаемую при проведении экспериментов с генераторами, не являющимися прецизионными.

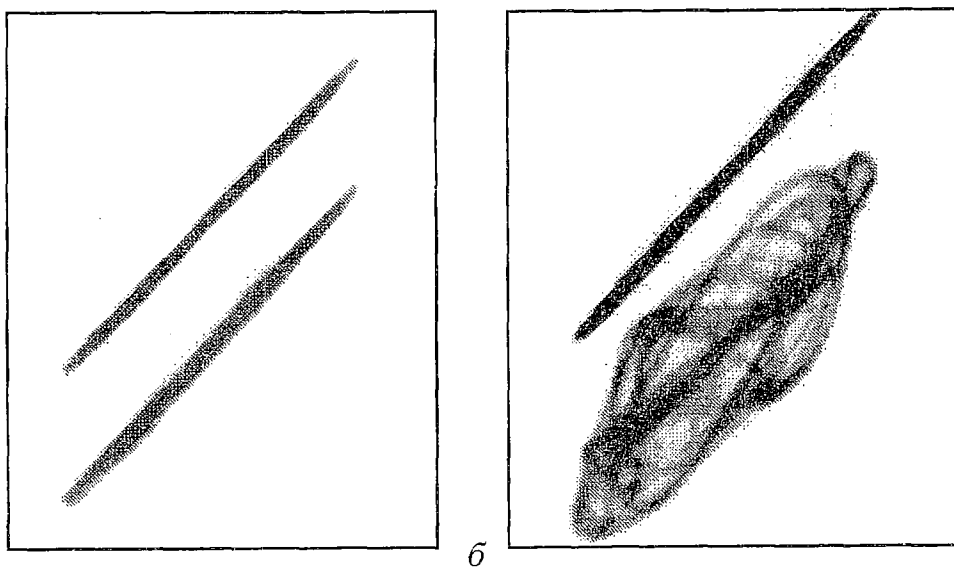


Рис. 8. Физический эксперимент: *а* – синхронный хаотический отклик (нижняя линия); *б* – десинхронизация отклика. Верхние линии соответствуют синхронному отклику для тестового хаотического сигнала (один и тот же хаотический сигнал синфазно подается на входы *X* и *Y* осциллографа)

Заключение

Таким образом, в работе рассмотрен прецизионный генератор хаотических колебаний с кусочно–линейной характеристикой нелинейного элемента.

Показано, что воспроизводимость хаотических режимов генератора обеспечивается использованием в его конструкции нелинейного элемента с кусочно–линейной характеристикой. Проведен анализ математической модели генератора и исследованы его типовые хаотические режимы. Обсуждена схмотехническая реализация нелинейного элемента и приведены результаты физических экспериментов в различных экспериментальных макетах генераторов. То обстоятельство, что в схеме нелинейного элемента используются только пассивные *R, C*–элементы в сочетании с усилителями, работающими в линейном режиме, позволяет получать прецизионные хаотические режимы как в различных образцах генераторов, так и в отдельно взятом генераторе при замене его комплектующих элементов на ближайшие аналоги.

Из сказанного, однако, не следует делать вывод о том, что применение в генераторах хаоса нелинейных элементов с кусочно–линейными характеристиками и их схмотехнических реализаций, использующих только линейные компоненты, является гарантией прецизионности генераторов в рассмотренном в работе контексте. Отмеченные качества генераторов служат необходимым, но недостаточным условием их прецизионности. Дело в том, что помимо кусочной (сегментной) линейности характеристики нелинейного элемента, не менее важное значение имеет и конкретная форма характеристики. Так, цепь Чуа [7] имеет трехсегментную кусочно–линейную характеристику нелинейного сопротивления, допускающую схмотехническую реализацию с помощью операционных усилителей, работающих в линейном режиме. Вместе с тем, она не может быть отнесена к прецизионным генераторам из–за «on–off» переменяемости [16,17], наблюдаемой в хаотическом отклике в реальных условиях и сопровождаемой нерегулярными «потерями» идентичности сравниваемых хаотических сигналов на входе и выходе ведомой системы.

В работе использована методика исследования динамических режимов генератора с помощью пакета прикладных программ Electronics Workbench (версия 4.1).

Прецизионность рассмотренного в работе генератора, наряду с простотой конструкции и разнообразными хаотическими режимами, делают возможным его использование в различных прикладных задачах, а также в учебном процессе, например, при постановке лабораторных работ.

Авторы признательны А.С. Дмитриеву, С.О. Старкову, Ю.В. Андрееву и М.Е. Широкову за полезные обсуждения проблемы, а также благодарны Ю.Г. Митрохину за сотрудничество при создании макетов генераторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 97-01-00800 и № 99-02-18315).

Библиографический список

1. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow // J. Atm. Sci. 1963. Vol. 20. P. 130.
2. Странные аттракторы / Под ред. Я.Г. Синая и Л.П. Шильникова. М.: Мир, 1981.
3. Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О. Динамический хаос как парадигма современных систем связи // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 10. С. 4.
4. Хаслер М. Передача информации с использованием хаотических сигналов. Последние достижения // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1998. №11. С.33.
5. Pecora L.M., Carroll T.L. Synchronization in Chaotic Systems // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol.64. P. 821.
6. Волковский А.Р., Рульков Н.Ф. Синхронный хаотический отклик нелинейной колебательной системы как принцип детектирования информационной компоненты хаоса // Письма в ЖТФ. 1993. Т.9, №3. С.715.
7. Madan R.N. Chua's circuits, a paradigm for chaos. Singapore: World Scientific, 1993.
8. Nishio Y., Mori S., Saito T. An approach toward higher dimensional autonomous chaotic circuits // Proc. NDES'92, Russia. Moscow, 1992. Vol. 2. P. 60.
9. Rulkov N.F. Images of synchronized chaos: Experiments with circuits // Chaos. 1996. Vol. 6, № 3. P. 2629.
10. Дмитриев А.С., Панас А.И. Странные аттракторы в кольцевых автоколебательных системах с инерционными звеньями // ЖТФ. 1986. Т.56, вып. 4. С.759.
11. Дмитриев А.С., Панас А.И. Квазипериодические, резонансные и хаотические режимы в кольцевых автоколебательных системах // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т.9. С.1085.
12. Дмитриев А.С., Кислов В.Я. Стохастические колебания в радиофизике и электронике. М.: Наука, 1989.
13. Dmitriev A.S., Panas A.I., Starkov S.O. Ring oscillating systems and their application to the synthesis of chaos generators // Int. J. of Bif. and Chaos. 1996. Vol.6. № 5. P. 851.
14. Дмитриев А.С., Кислов В.Я., Старков С. Экспериментальное исследование образования и взаимодействия странных аттракторов в кольцевом автогенераторе // ЖТФ. 1985. Т.55, №12. С. 2417.
15. Дмитриев А.С., Старков С.О. Исследование хаотической динамики кольцевого автогенератора с асимметричной характеристикой нелинейного элемента // РЭ. 1986. Т.31, №12. С. 2396.
16. Dmitriev A.S., Panas A.I., Starkov S.O., Kuzmin L.V. Experiments on RF band communication using chaos // Int. J. of Bif. and Chaos. 1997. Vol.7, № 11. P. 2511.
17. Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Панас А.И., Старков С.О. Эксперименты по передаче информации с использованием хаоса через радиоканал // РЭ. 1998. Т.43, № 9. С. 1115.

Московский физико-
технический институт
Институт радиотехники
и электроники РАН

Поступила в редакцию 25.02.99
после переработки 14.04.99

PRECISION CHAOTIC OSCILLATOR WITH PIECEWISE-LINEAR CHARACTERISTIC OF NONLINEAR ELEMENT

L.V. Kuzmin, N.A. Maximov, A.I. Panas

Precision chaotic oscillator with 1.5 degrees of freedom is considered. It consists of two linear and one nonlinear subsystems which are connected in series and closed in a loop. The nonlinear subsystem has five-segment piecewise-linear amplitude characteristic. Typical chaotic modes of the oscillator are analyzed numerically and in physical experiments. The use of special software Electronics Workbench (the electronic lab in a computer) for analysis of chaotic modes is demonstrated. The circuit schematic of the nonlinear subsystem is considered.



Кузьмин Лев Викторович – родился в 1974 году. Окончил факультет управления и прикладной математики Московского физико-технического института (1997), в настоящее время аспирант МФТИ. Область научных интересов – хаотическая динамика и ее использование в информационных технологиях. Автор более 10 работ.



Максимов Николай Андреевич – родился в 1949 году. Окончил МГУ им. Ломоносова, физический факультет (1973). В настоящее время – старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники РАН. Кандидат физико-математических наук (1989). Лауреат премии Совета Министров СССР (1989). Область научных интересов – динамический хаос, радиофизические, в том числе коммуникационные системы, использующие хаотические сигналы. Автор более 50 работ. E-mail: chaos@mail.cplire.ru



Панас Андрей Иванович – родился в 1955 году. Окончил Московский энергетический институт (1978). Кандидат физико-математических наук (1988). В настоящее время старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов – динамический хаос в радиофизических системах, информационные технологии на основе хаотической динамики. Лауреат премии Ленинского комсомола (1987). Автор более 60 научных работ.