

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

Ефремова Елена Валериевна

**ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ
ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА.
ГЕНЕРАЦИЯ И РАЗДЕЛЕНИЕ СИГНАЛОВ**

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2003

Работа выполнена в Московском физико-техническом институте.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор Дмитриев Александр Сергеевич

Научный консультант:

кандидат физико-математических наук,
Андреев Юрий Вениаминович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Кащенко Сергей Александрович

кандидат технических наук,
профессор Капранов Михаил Владимирович

Ведущая организация – Московский Институт Радиотехники, Электроники
и Автоматики

Защита состоится « ____ » _____ 2003 года в ____ часов на
заседании специализированного совета К 212.156.05 в Московском физико-
техническом институте по адресу: Московская обл., г. Долгопрудный,
Институтский переулок, 9.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
МФТИ.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2003 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета

к. ф.-м. н., доцент

С.М. Коршунов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Динамический хаос (ДХ) – сложное неперiodическое движение, порождаемое нелинейными системами. Такой тип движения может возникать в отсутствии внешнего шума и полностью определяется свойствами детерминированной динамической системы. В течение последних 40 лет, с момента открытия ДХ интерес к нему в научной среде не ослабевает. На протяжении этого времени это явление активно исследовалось различными научными группами.

В многочисленных теоретических и экспериментальных работах было показано, что явление ДХ может быть широко использовано в различных областях науки и техники, в частности путем создания новых технологий на его основе.

Одним из перспективных направлений использования ДХ является применение его в коммуникационных технологиях. Он обладает рядом свойств, которые могут быть полезны при передаче и обработке информации. Например, использование ДХ дает возможность получения сложных колебаний с помощью простых по структуре устройств, при этом в одном устройстве можно реализовать большое количество различных хаотических мод; управления хаотическими режимами путем малых изменений параметров системы; увеличения скорости модуляции по отношению к модуляции регулярных сигналов за счет чувствительности хаотической системы к внешним возмущениям; повышения уровня конфиденциальности при передаче сообщений. Хаотические сигналы обладают большой информационной емкостью и дают возможность использовать разнообразные методы ввода информационного сигнала в хаотический. Важной особенностью хаотических систем является возможность самосинхронизации передатчика и приемника. Наконец, в системах связи на хаотических сигналах можно реализовать нетрадиционные методы мультиплексирования и демупльтиплексирования.

Важнейшей частью системы передачи информации на основе динамического хаоса является генератор хаотических колебаний. Для обеспечения эффективной работы системы связи генератор хаоса должен обладать определенными характеристиками. Например, генерируемый сигнал должен иметь равномерный спектр мощности в нужной полосе частот. Поэтому создание генераторов хаоса с заданными спектральными характеристиками, а также с возможностью управления этими характеристиками является актуальной задачей, определяющей возможность практической реализации коммуникационных систем на основе динамического хаоса.

В последние годы был проведен ряд работ по созданию генераторов ДХ с заданным спектром. В частности, были предложены кольцевые генераторы хаоса, для которых разработана теория формирования спектра хаотического сигнала, а также однотранзисторный полосовой генератор хаоса, для которого продемонстрирована возможность управления полосой хаотического спектра. Однако в кольцевых системах, как правило, используются нелинейные элементы со сложной характеристикой, имеющей падающий участок, а также буферные каскады между элементами цепи. Это увеличивает число элементов в схеме и усложняет саму схему генератора, что затрудняет практическую реализацию таких схем в СВЧ диапазоне. В случае однотранзисторного полосового генератора хаоса нет полной ясности в том, какие механизмы отвечают за формирование спектра.

Для успешной разработки генераторов хаоса с заданным спектром необходимо понять, как происходит формирование спектра мощности сигнала в генераторе, какими параметрами системы определяется форма спектра и какие условия должны выполняться, для того, чтобы сигнал на выходе генератора имел спектр мощности максимально приближенный к желаемой форме.

Представляется целесообразным начать исследования с простейших генераторов – генераторов на основе одного транзистора и минимального

числа элементов, при котором в генераторе может возникать хаос (как известно это возможно в генераторе с 1.5 степенями свободы), изучить процесс формирования спектра в таком генераторе, после чего усложнять систему, добавляя в нее новые элементы, чтобы создать условия для формирования более сложных спектров.

Не менее важной задачей при реализации коммуникационной системы является реализация многопользовательского доступа, и, связанная с ней задача разделения суммы хаотических сигналов на отдельные компоненты при передаче их по каналу связи в присутствии внешних помех.

Хотя для современных систем связи разработан ряд методов разделения сигналов, проблема разделения сигналов остается актуальной и есть основания полагать, что использование хаотических сигналов в качестве несущей позволит разработать новые подходы к ее решению.

Целью диссертационной работы является исследование двух проблем, возникающих при разработке средств связи на основе хаотических сигналов: создание генераторов хаотических колебаний с заданными спектральными свойствами на основе транзисторов и разработка новых подходов к проблеме разделения хаотических сигналов.

Основные задачи, решаемые в работе:

- разработка и исследование моделей транзисторных генераторов хаоса с заданным спектром мощности;
- разработка метода разделения хаотических сигналов в присутствии внешнего шума;

Научная новизна заключается в следующем:

- предложен метод построения одностранзисторных генераторов хаоса со спектром, близким к заданному;
- на основе разработанного метода предложена модель хаотического генератора с 2.5 степенями свободы;

- изучены возможности формирования спектра в моделях трех генераторов хаоса: а) в емкостной трехточке; б) в генераторе с 2.5 степенями свободы; в) в полосовом генераторе с 5.5 степенями свободы;
- предложен метод повышения энергетической эффективности генератора с 5.5 степенями свободы;
- разработан метод разделения m хаотических сигналов на основе итерирования хаотических отображений в режиме обратного времени;
- обнаружен и исследован пороговый эффект качества разделения сигналов, обусловленный информационным содержанием сигналов;
- предложен метод разделения хаотических сигналов в режиме реального времени;
- установлена зависимость уровня шума, начиная с которого возможно разделение сигналов, от числа источников;

Достоверность научных выводов подтверждается согласованностью результатов математического моделирования с результатами физических экспериментов, а также сравнением с известными из литературы данными.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Метод построения одностранзисторных генераторов хаоса со спектром, близким к заданному, и модель генератора хаоса с 2.5 степенями свободы, построенная на основании предложенного метода;
2. Методика формирования заданного спектра в модели генератора с 5.5 степенями свободы и повышения его энергетической эффективности;
3. Методы разделения хаотических сигналов на основе итерирования обратных отображений;
4. Алгоритм разделения хаотических сигналов в режиме реального времени.

Научно-практическое значение. Предложенные и проанализированные в диссертационной работе подходы к построению генераторов хаоса позволяют управлять спектральными характеристиками сигналов генераторов и создают основу для их практической реализации. Разработанные методы разделения хаотических сигналов могут послужить

основой для разработки систем мультиплексирования и демупльтиплексирования в системах связи на основе динамического хаоса.

Апробация работы, публикации, внедрение и использование: материалы диссертационной работы были представлены на международном симпозиуме по нелинейной динамике и ее приложениям NOLTA'98 (Швейцария, 1998), на Европейской междисциплинарной школе по нелинейной динамике сигналов и систем EUROATTRACTOR'2000 (Варшава, Польша, 2000), на международном симпозиуме по цепям и системам ISCAS'2000 (Женева, Швейцария, 2000), на международной конференции по управлению колебаниями и хаосом СОС'2000 (Санкт-Петербург, Россия, 2000), на 9-й международной конференции по нелинейной динамике электронных систем NDES'2001 (Нидерланды, 2001), на международной конференции по прикладной нелинейной динамике (Фессалоники, Греция, 2001), на международном симпозиуме NOLTA'2001 (Япония, 2001), на 8-м международном семинаре по нелинейной динамике и сложным системам NDCS'2001 (Минск, Белоруссия, 2001), на Всероссийской научной школе «Нелинейные волны - 2002» (Нижний Новгород, Россия, 2002), на 10-й международной конференции по нелинейной динамике электронных систем NDES'2002 (Измир, Турция, 2002), на 1-й международной конференции по цепям и системам для коммуникаций (Санкт-Петербург, Россия, 2002), на международном семинаре по синхронизации хаотических и стохастических колебаний SYNCHRO'2002 (Саратов, Россия, 2002), на всероссийской научной конференции-семинаре «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации и акустике» СРСА'2003 (Муром, Россия, 2003), на международном симпозиуме по сигналам, цепям и системам SCS'2003 (Яссы, Румыния, 2003).

По теме диссертационной работы опубликована 21 печатная работа (2 тезисов докладов, 11 докладов на конференциях, 1 препринт, 7 статей в отечественных и зарубежных журналах).

Структура и объем работы: диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, 1 приложения и списка цитированной литературы. Содержит 156 страниц текста, 68 рисунков. Список цитированной литературы содержит 137 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, изложены положения, выносимые на защиту и краткое содержание работы.

Первая глава посвящена синтезу генераторов с биполярным транзистором в качестве активного элемента. Дается обзор известных генераторов хаоса и результатов исследований по проблеме формирования заданного спектра мощности в генераторах хаоса. В разделе 1.1 рассматривается общая схема построения генераторов на основе активного элемента и пассивного четырехполюсника.

В разделе 1.2 обсуждаются различные модели биполярных транзисторов и условия применимости той или иной модели для описания электрических схем на основе транзистора.

В разделе 1.3 описывается общая модель генератора с биполярным транзистором в качестве активного элемента и пассивным четырехполюсником в цепи обратной связи.

Представление генератора в виде совокупности активного четырехполюсника (транзистора) и пассивного четырехполюсника позволяет формировать хаотический сигнал, спектр которого определяется амплитудно-частотной характеристикой петли обратной связи.

Раздел 1.4 посвящен исследованию динамики модели трехточечной схемы генератора с кусочно-линейной характеристикой транзистора и его спектральных характеристик.

Динамические режимы генератора описываются с помощью системы дифференциальных уравнений:

$$C_1 \dot{V}_{CE} = I_L - I_C;$$

$$C_2 \dot{V}_{BE} = (V_E - V_{BE})/R_E - I_L - I_B;$$

$$L \dot{I}_L = V_C - V_{CE} - R_L I_L + V_{BE};$$

где V_{CE} , V_{BE} - напряжения коллектор-эмиттер и база-эмиттер, I_L , I_C , I_B - токи через индуктивность L , коллектор C и базу B . Для описания работы транзистора в модели используется кусочно-линейная аппроксимация статических характеристик транзистора.

$$I_B = 0, \text{ если } V_{BE} \leq V_T;$$

$$I_B = (V_{BE} - V_T)/R_{BE}, \text{ если } V_{BE} > V_T;$$

$$I_C = \beta I_B,$$

где I_B , I_C - токи, протекающие через базу и коллектор; V_T - барьерный потенциал (примерно 0,75 В); R_{BE} - сопротивление перехода база-эмиттер; β - коэффициент усиления транзистора.

Исследованы бифуркационные явления в модели трехточечной схемы генератора.

Продемонстрировано существование зависимости между спектром мощности сигнала на выходе трехточки и модулем комплексной передаточной функции петли обратной связи (рис 1.).

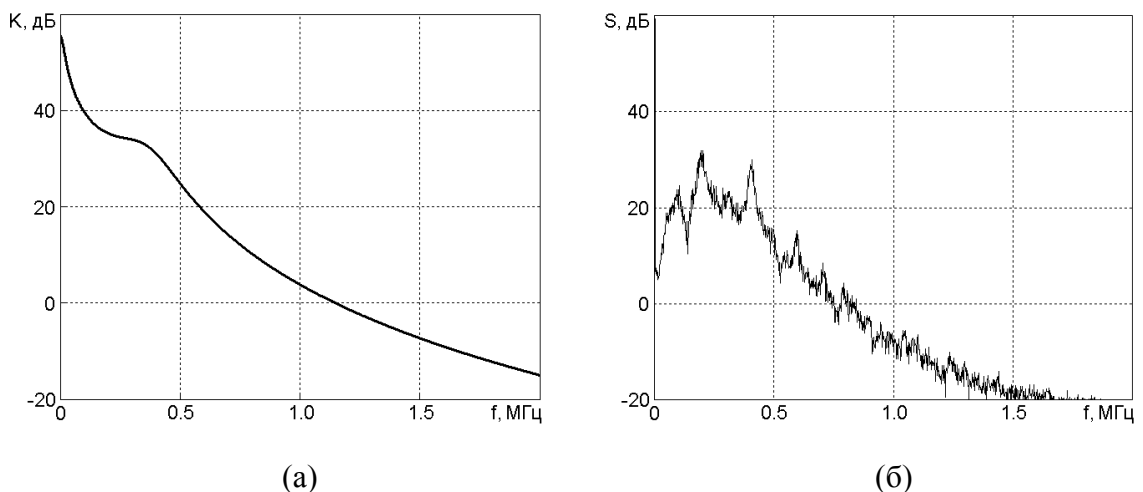


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика петли обратной связи (а) и спектр мощности сигнала (б) трехточечной схемы при значениях параметров: $V_E=2$ В, $V_C=7$ В, $L=30$ мкГн, $C_1=15$ нФ, $C_2=9.7$ нФ, $R_L=40$ Ом, $R_E=400$ Ом, $R_{BE}=200$ Ом, $\beta=300$.

Показано, что гладкость огибающей спектра можно регулировать путем выбора режимов с различными показателями Ляпунова, при этом гладкость спектра растет с увеличением показателя Ляпунова. Для выбора хаотического режима используется двухпараметрическая диаграмма показателей Ляпунова (рис. 2).

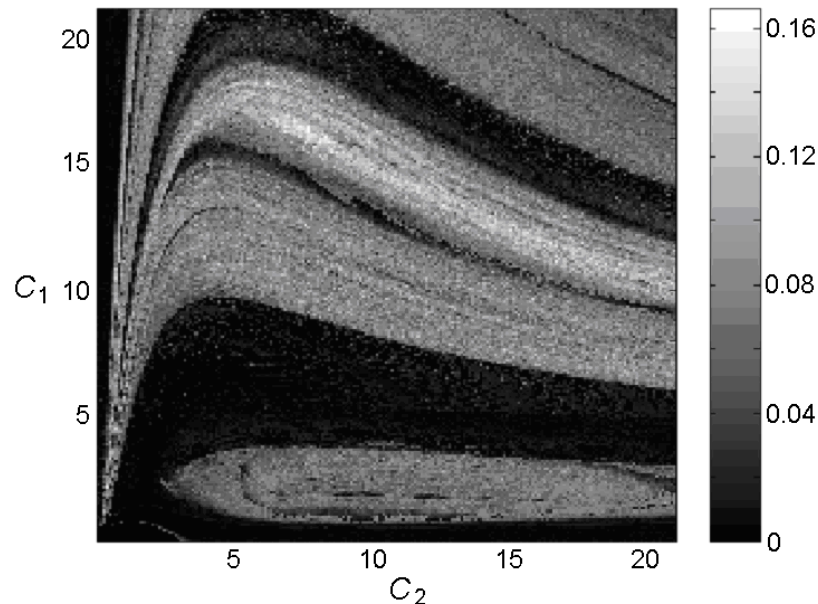


Рис. 2. Двумерная диаграмма показателей Ляпунова в плоскости (C_1, C_2) . Параметры: $V_E=2$ В, $V_C=7$ В, $L=30$ мкГн, $R_L=40$ Ом, $R_E=400$ Ом, $R_{BE}=200$ Ом, $\beta=300$.

Таким образом, установлено, что в транзисторном генераторе форма огибающей спектра мощности сигнала может быть приближена к форме амплитудно-частотной характеристики петли обратной связи. Гладкость спектра мощности зависит от величины показателя Ляпунова.

Сформулированы требования, выполнение которых необходимо для формирования спектра нужного вида в транзисторном генераторе хаоса:

1. Структура генератора должна включать в себя активный четырехполюсник (транзистор) и пассивный четырехполюсник, замкнутые в цепь обратной связи.
2. В генераторе должны возбуждаться хаотические колебания на основе разрушения одночастотного или двухчастотного регулярного автоколебательного режима.

3. Система фильтров в цепи обратной связи должна быть подобрана таким образом, чтобы амплитудно-частотная характеристика разомкнутой цепи (модуль комплексной передаточной функции петли обратной связи) совпадала с желаемой формой огибающей спектра.
4. Для корректировки изрезанности огибающей спектра необходимо обеспечить возможность изменения номиналов компонент для выбора режима с большим показателем Ляпунова.

Раздел 1.5 посвящен исследованию влияния формы вольт-амперной характеристики (ВАХ) биполярного транзистора на динамические режимы генератора хаоса. Для этого рассмотрены динамические режимы и бифуркационные явления в трехточечной схеме, в которой ВАХ транзистора описывается экспоненциальной функцией. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования режимов генератора для случаев кусочно-линейной и экспоненциальной характеристик транзистора.

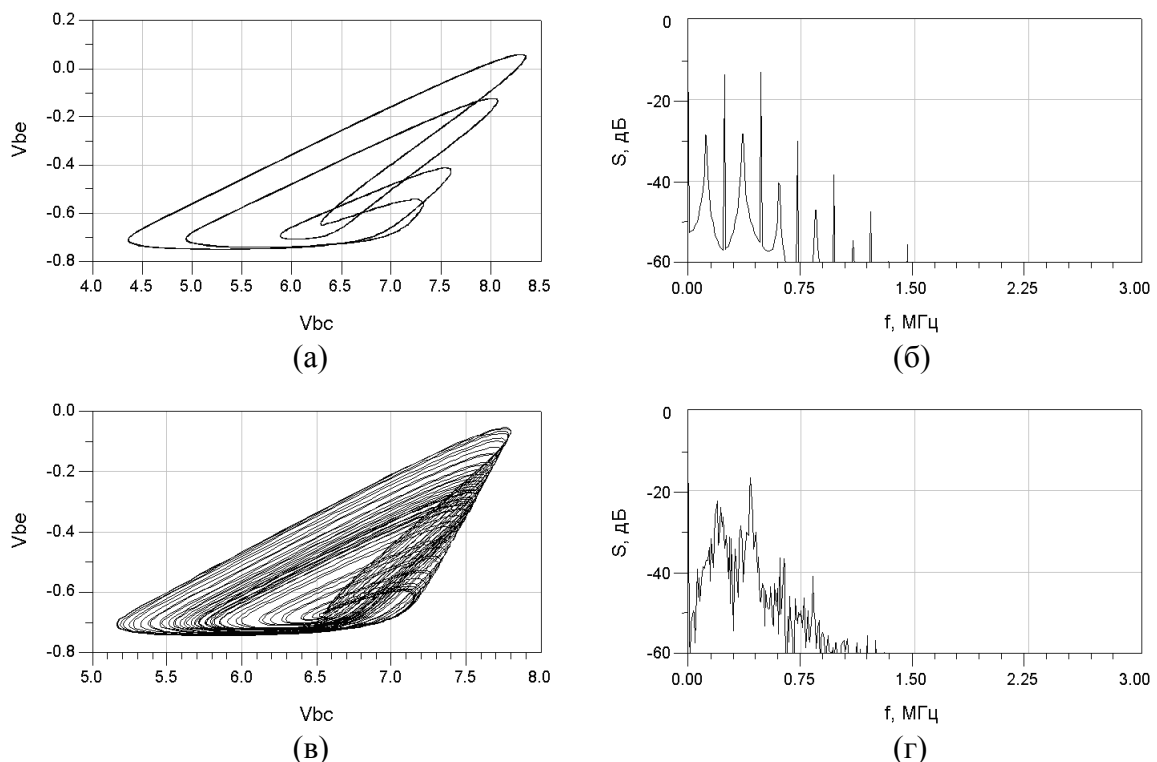


Рис. 3. Схемотехническое моделирование. Фазовые портреты (V_{BC} , V_{BE}) и спектры мощности сигнала (V_{BE}) на выходе трехточечной схемы при значениях параметров: (а, б) $V_E=2$ В, $V_C=7$ В, $L=30$ мкГн, $C_1=5$ нФ, $C_2=16.432$ нФ, $R_L=40$ Ом, $R_E=400$ Ом; (в, г) $V_E=2$ В, $V_C=7$ В, $L=30$ мкГн, $C_1=7.307$ нФ, $C_2=16.432$ нФ, $R_L=40$ Ом, $R_E=400$ Ом.

В разделе 1.6 приводятся результаты моделирования (рис. 3) трехточечной схемы генератора с помощью пакета схемотехнического моделирования «Advanced Design System 2002» (разработчик Agilent Technologies). Показано соответствие типичных режимов, полученных при численном интегрировании системы уравнений, описывающих систему и схемотехническом моделировании.

Глава 2 посвящена вопросам практического применения принципов, изложенных в главе 1, для разработки генераторов с заданным спектром мощности сигнала.

Анализ спектральных характеристик хаотических режимов трехточечной схемы показывает, что в ней могут быть получены хаотические колебания с относительно равномерной спектральной плотностью мощности в некотором диапазоне частот. Колебательные режимы обладают высокой чувствительностью к изменению параметров, но при этом варьирование параметров не позволяет обеспечить разнообразие видов формируемых спектров. Отмеченные спектральные особенности динамического хаоса в трехточечной схеме типичны не только для нее, но и для других хаотических систем с полутора степенями свободы.

Таким образом, для формирования спектра мощности желаемой формы необходимо повышать размерность источников хаоса.

В разделе 2.1 вводится модель генератора с 2.5 степенями свободы (рис. 4).

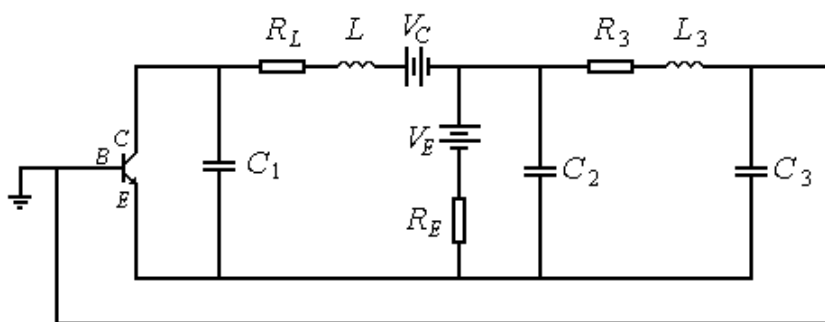


Рис. 4. Структура генератора с 2.5 степенями свободы.

Данный генератор получается из трехточечной схемы путем последовательного включения в цепь обратной связи дополнительного RLC звена, являющегося фильтром низких частот второго порядка. Этот дополнительный элемент дает возможность формирования АЧХ более сложной формы, по сравнению с обычной трехточкой.

Система дифференциальных уравнений, описывающих динамику системы, имеет вид:

$$\begin{aligned} C_1 \dot{V}_{CE} &= I_L - I_C; \\ C_3 \dot{V}_{BE} &= I_{L3} - I_B; \\ L \dot{I}_L &= V_C - V_{CE} - R_L I_L + V_{C2}; \\ C_2 \dot{V}_{C2} &= (V_E - V_{C2}) / R_E - I_L - I_{L3}; \\ L_3 \dot{I}_{L3} &= V_{C2} - V_{BE} - R_3 I_{L3}. \end{aligned}$$

где V_{CE} , V_{BE} - напряжения коллектор-эмиттер и база-эмиттер, V_{C2} - напряжение на емкости C_2 , I_L , I_{L3} , I_C , I_B - токи через индуктивность L , индуктивность L_3 , коллектор C и базу B . ВАХ транзистора описывается двухсегментной кусочно-линейной функцией.

Проведено исследование динамических режимов и бифуркационных явлений, характерных для этой системы.

Показано, что спектр мощности сигнала генератора с 2.5 степенями свободы определяется передаточной функцией цепи (рис. 5), что подтверждает возможность синтеза генераторов хаоса с заданным спектром, в рамках реализуемых амплитудно-частотных характеристик петли обратной связи.

В разделе 2.2 приводятся результаты схемотехнического моделирования генератора с 2.5 степенями свободы в пакете ADS. Показано, что результаты схемотехнического моделирования находятся в соответствии с результатами, полученными при численном моделировании.

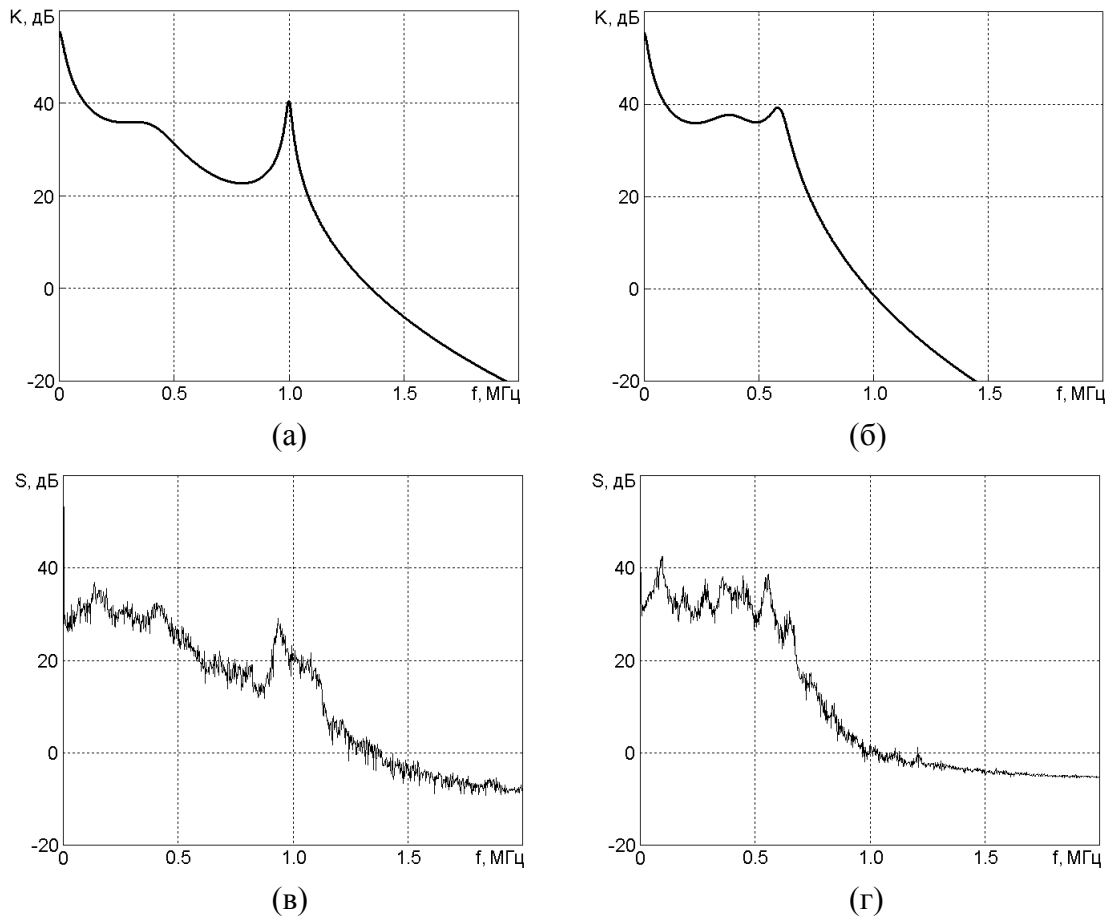


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика петли обратной связи (а, б) и спектр мощности сигнала (в, г) при значениях параметров $V_E=2$ В, $V_C=7$ В, $L=30$ мкГн, $L_3=30$ мкГн, $R_L=40$ Ом, $R_E=400$ Ом, $R_3=10$ Ом, $R_{BE}=200$ Ом, $\beta=300$; (а, в) $C_1=14$ нФ, $C_2=6.244$ нФ, $C_3=1$ нФ; (б, г) $C_1=7.307$ нФ, $C_2=16.432$ нФ, $C_3=2.9$ нФ.

Раздел 2.3 посвящен одностранзисторному генератору хаоса с 5.5 степенями свободы (рис. 6).

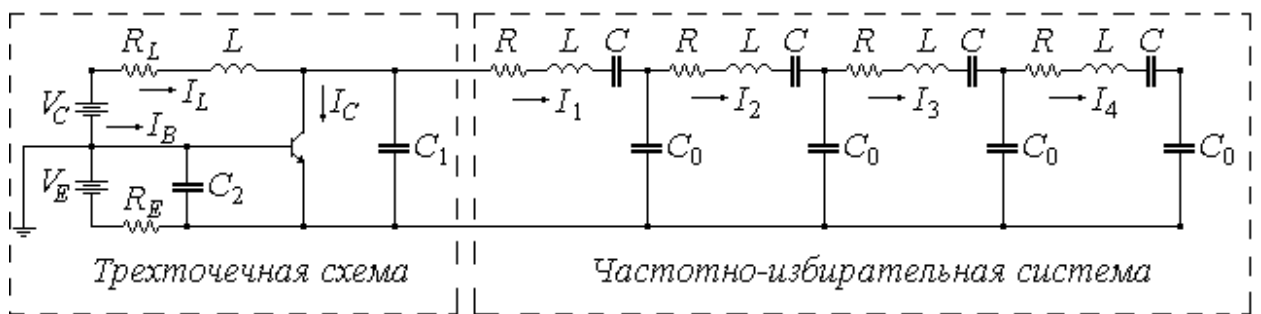


Рис. 6. Схема одностранзисторного полосового генератора хаотических колебаний с 5.5 степенями свободы.

Исследованы динамические режимы, имеющие место в генераторе.

Показана возможность управления формой спектра в таком генераторе. В частности, возможность формирования спектра в заданной полосе частот, с различной формой огибающей и степенью изрезанности спектра.

В ходе экспериментальных исследований генератора с 5.5 степенями свободы выяснилось, что он имеет низкую энергетическую эффективность. Представление генератора в виде структуры «активный элемент – четырехполюсник» показало, что частотно-избирательная система (ЧИС) не входит в основное кольцо обратной связи, а является ответвлением цепи и «откачивает» лишь часть энергии генерируемых хаотических колебаний.

Анализ спектральных характеристик генератора, полученных в разных точках схемы, позволил объяснить причину низкой выходной мощности генератора и выработать рекомендации по ее увеличению.

Показано, что энергетическая эффективность генератора увеличится, если изменить параметры цепи так, чтобы полоса генерации трехточечной схемы покрывала полосу пропускания ЧИС.

Третья глава посвящена проблеме разделения суммы хаотических сигналов на отдельные компоненты в присутствии внешнего шума.

Дается обзор существующих методов разделения регулярных сигналов: разделение по частоте, разделение по времени, кодовое разделение, «слепые» методы разделения сигналов, здесь же описывается разделение хаотических сигналов при помощи хаотической синхронизации*.

В разделе 3.1 обсуждается общая постановка задачи разделения суммы хаотических сигналов.

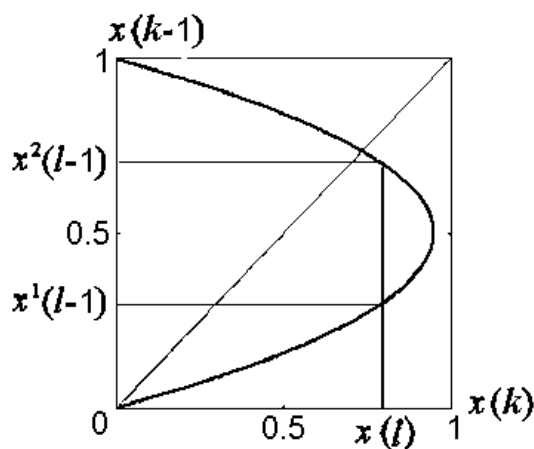


Рис. 7. Вид обратного отображения $f^{-1}(\cdot)$.

* *Tsimring L.S., Sushchik M.M. // Phys. Lett. A, 1996. V. 213. P. 155.*

В разделе 3.2 предлагается метод разделения суммы двух хаотических сигналов на основе итерирования хаотических отображений в обратном времени. Метод основан на сжимающих свойствах обратных отображений (рис. 7).

Показано, что метод характеризуется экспоненциальной сходимостью, и обеспечивает эффективное разделение хаотических сигналов не только при отсутствии шума, но и при наличии аддитивного гауссовского шума на пути суммарного сигнала от источников к наблюдателю.

Далее приводятся результаты компьютерного моделирования процесса разделения сигналов в отсутствие шума и при наличии внешнего шума в канале связи.

Показано, что предложенный метод разделения хаотических сигналов позволяет эффективно разделять два хаотических сигнала при отношении сигнал/шум в канале связи >63 дБ (рис. 8, кривая 1). Проводится сравнение эффективности предлагаемого метода с методом, основанным на использовании явления хаотической синхронизации.

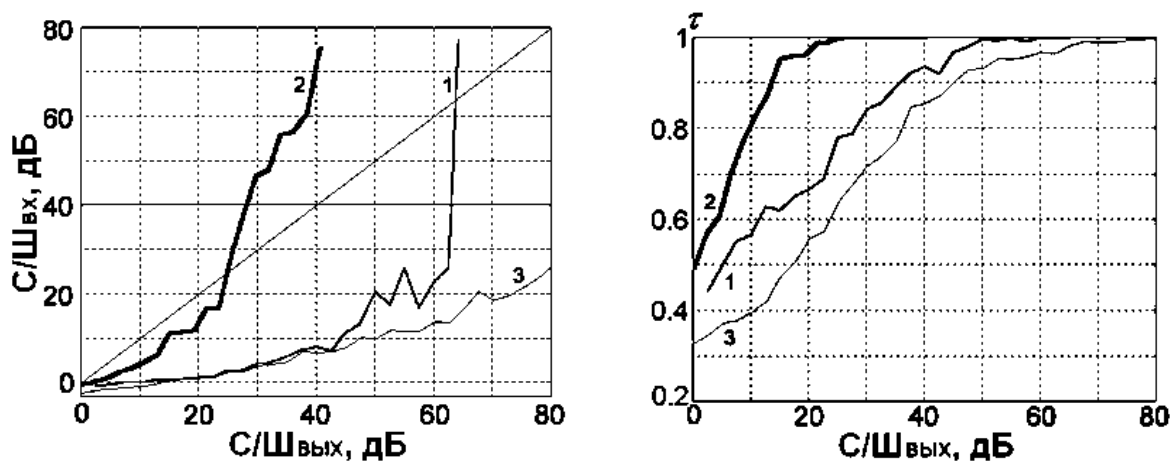


Рис. 8. Зависимость от $C/Ш_{вх}$ (отношение сигнал/шум на входе приемника) отношения $C/Ш_{вых}$ (сигнал/шум на выходе приемника). (а) и относительного времени синхронизации τ (б): 1 — алгоритм на основе итерирования обратных отображений с единственной ветвью; 2 — алгоритм с M ветвями ($M=16$); 3 — метод на основе хаотической синхронизации.

В разделе 3.4 обсуждается пороговый эффект, возникающий при разделении сигналов и состоящий в невозможности разделения хаотических сигналов при уровне внешнего шума, превышающем некоторое пороговое

значение. Показано, что это явление обусловлено информационными свойствами передаваемых сигналов. Приведена теоретическая оценка предельного порогового значения отношения сигнал/шум в канале $C/\text{Ш}_{\text{вх}} = 20$ дБ, которая может служить мерой эффективности методов разделения хаотических сигналов.

Хотя эффективность метода разделения хаотических сигналов, предложенного в **главе 3**, значительно превосходит эффективность разделения сигналов методом хаотической синхронизации, качество разделения далеко от теоретического предела в 20 дБ. Анализ показывает, что эта ситуация обусловлена тем, что решение о выборе ветви принимается на каждом шаге итерирования обратного отображения в отдельности. При этом не учитываются результаты, полученные для других точек интервала разделения сигналов. Для того, чтобы увеличить устойчивость метода по отношению к внешнему шуму, предлагается использовать многошаговый метод. Этому посвящена **глава 4**.

В разделе 4.1 обобщается постановка задачи, как задачи оптимизации оценки разделенных сигналов на интервале времени разделения.

В разделе 4.2 предлагается многошаговый (многоветочный) алгоритм разделения сигналов. Согласно этому алгоритму, при обратном итерировании хаотического отображения на каждом шаге сохраняются несколько ветвей (оценок разделяемых сигналов), из которых, впоследствии, выбирается лучшая. Проведено компьютерное моделирование, которое показывает, что разделение двух хаотических сигналов возможно при отношении $C/\text{Ш}_{\text{вх}}$ до $\sim 25 \dots 30$ дБ (рис. 8, кривая 2).

Раздел 4.3 посвящен описанию метода разделения хаотических сигналов в режиме реального времени.

В разделе 4.4 задача обобщается на случай произвольного числа источников, и приводятся результаты моделирования процесса разделения сигналов в случае 2-6 пар передатчиков и приемников. Показано, что

добавление каждого нового источника ужесточает требования на отношение сигнал/шум в канале ($C/Ш_{вх}$) в среднем на 6...7 дБ.

В заключении диссертационной работы изложены основные результаты, которые состоят в следующем:

1. Предложен метод построения транзисторных генераторов с заданным спектром. Исследован процесс формирования хаотического спектра в модели трехточечной схемы генератора. Показано, что форма огибающей спектра мощности генератора определяется формой амплитудно-частотной характеристики петли обратной связи. Гладкость спектра увеличивается с ростом показателя Ляпунова, соответствующего хаотическому режиму.
2. На основе метода разработана и исследована модель генератора хаоса с 2.5 степенями свободы. Продемонстрирована возможность формирования спектра и улучшения энергетических характеристик одностранзисторного полосового генератора хаоса с 5.5 степенями свободы. Результаты, полученные при компьютерном моделировании адекватны результатам, полученным в ходе физического эксперимента.
3. Разработан метод разделения суммы хаотических сигналов на отдельные компоненты в присутствии внешнего шума. Обнаружено существование порогового значения эффективности разделения сигналов и дано его теоретическое обоснование.
4. Для повышения устойчивости процедуры разделения сигналов к шуму предложен многошаговый алгоритм разделения сигналов. Установлено, что использование этого алгоритма обеспечивает высококачественное разделение суммы двух сигналов при отношении сигнал/шум в канале до ~ 25...30 дБ. Предложен метод разделения сигналов в режиме реального времени. Показано, что добавление каждого нового источника ужесточает требования на отношение сигнал/шум в канале в среднем на 6...7 дБ.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Dmitriev A., Panas A., Efremova E. and Kuzmin L.* Communication system with modulo summation of information and chaotic signals // Proc. NOLTA'98. 1998. Crans-Montana. Switzerland. V. 3. PP. 1081-1084.
2. *Efremova E.V.* Separation of Chaotic Signals in the Presence of Noise // Attractors, Signals and Synergetics. Proceedings of 1st European Interdisciplinary School on Nonlinear Dynamics for System and Signal Analysis. EUROATTRACTOR 2000. Warsaw. June 06-15. 2000. PABST Science Publisher 2002. PP. 316-325.
3. *Andreyev, Yu.V., Dmitriev, A.S. and Efremova E.V.* Multiplexing chaotic signals in the presence of noise // Proc. Int. IEEE Symp. Circuits and Systems (ISCAS-2000). Geneva. Switzerland. May 28-31. 2000. V. IV. PP. 441-444.
4. *Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Пустовойт В.И.* Разделение хаотических сигналов // Доклады РАН. 2000. Т. 372. № 1. С. 187-190.
5. *Andreyev, Yu.V., Dmitriev, A.S. and Efremova E.V.* Separation of chaotic signals using their inherent dynamic nature // Proc. Int. Conf. Control of Oscillations and Chaos (COC-2000). St.Petersburg. Russia. July 5-7. 2000. V. 3. PP. 418-422.
6. *Andreyev Yu.V. and Efremova E.V.* Noise threshold effect of chaotic signal separation // Proc. 9th Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES'2001). Delft. Netherlands. June 21-23. 2001. PP. 185-188.
7. *Yu.V. Andreyev, A.S. Dmitriev, and E.V. Efremova.* Dynamic Separation of Chaotic Signals in the Presence of Noise // Electronic NonLinear Science Preprint, nlin.CD/0107036.
8. *Yu.Andreyev, A.Dmitriev, and E.Efremova.* Chaotic signal processing. Information aspects // Abstracts Int. Conf. Applied Non-Linear Dynamics. Thessaloniki. Greece. August 27-30. 2001. P. 89.

9. *A. Dmitriev, E. Efremova, L. Kuzmin, and A. Anagnostopoulos* High dimensional RC-oscillators of chaos. // Proc. of Int. Symp. NOLTA'2001. Miyagi. Japan. October 28 - November 1. 2001. V. 1. PP. 139-142.
10. *Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В.* Разделение хаотических сигналов при наличии шума // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 12. С. 1346-1355.
11. *Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S. and Efremova E.V.* Dynamic separation of chaotic signals // Abstracts Int. Conf. Progress in Nonlinear Science/Nonlinear Oscillations. Control and Information. Nizhny Novgorod. Russia. July 2-6. 2001. P. 216.
12. *Andreyev, Yu.V., Dmitriev, A.S. and Efremova E.V.* // Dynamic separation of chaotic signals in the presence of noise. Phys. Rev. E. 2002. V. 65. P. 046220.
13. *Andreyev, Yu.V., Dmitriev, A.S. and Efremova E.V.* Information approach to separation of chaotic signals // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2002. V. 5. №. 1. PP. 59-70.
14. *E.V. Efremova and L.V. Kuzmin.* Broadband RC chaotic oscillators // Proc. 1st IEEE Int. Conf. Circuits and Systems for Communications (Circuits and Systems in Broadband Communication Technologies). St.Petersburg. Russia. June 26-28. 2002. PP. 300-303.
15. *A.S. Dmitriev, E.V. Efremova, N.A. Maksimov, and A.I. Panas.* Controlling spectrum of single-transistor band-limited chaotic oscillator // Proc. 10th Int. Workshop Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES-2002). June 21-23. 2002. Izmir. Turkey. PP. 2-65.
16. *Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S., Efremova E.V., and Anagnostopoulos A.N.* Chaotic signal processing. Information aspects // Chaos, Solitons and Fractals. 2003. V. 17. №. 2-3. PP. 531 - 544.
17. *Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S., Efremova E.V., and Anagnostopoulos A.N.* Separation of chaotic signal sum into components in the presence of noise // IEEE Trans. Circuits and Systems-I. 2003. V. 50. №. 5, PP. 613 - 618.

18. *Андреев Ю.В., Ефремова Е.В., Анагностопулос А.Н.* Разделение широкополосных хаотических сигналов на фоне случайной помехи // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации и акустике (СРСА–2003). 2003. 1-3 Июля. Муром. Россия. С. 348-352.
19. *Yu.V. Andreyev and E.V. Efremova.* Separation of Wideband Chaotic Signals // Proc. of Int. Symposium on Signals, Circuits and Systems (SCS-2003). July 10-11. 2003. Iasi. Romania. PP. 1-4.
20. *E.V. Efremova, N.A. Maksimov and A.I. Panas.* Control of Power Spectrum Envelope in Single-Transistor Chaotic Oscillator // Proc. of Int. Symposium on Signals, Circuits and Systems (SCS-2003). July 10-11. 2003. Iasi. Romania. PP. 17-20.
21. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А.* Управление огибающей спектра мощности в одностранзисторном генераторе хаотических колебаний // Радиотехника и электроника. (принято к публикации)