

*На правах рукописи*

ПРОХОРОВ Александр Андреевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СИНХРОНИЗАЦИИ  
СВЯЗАННЫХ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ  
С УЧЕТОМ ФИЛЬТРУЮЩИХ СВОЙСТВ КАНАЛА СВЯЗИ

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2008

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела  
Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
доцент Мчедлова Елена Сумбатовна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Астахов Владимир Владимирович

кандидат физико-математических наук,  
доцент Купцов Павел Владимирович

Ведущая организация: Саратовский филиал Института  
радиотехники и электроники  
Российской Академии Наук

Защита состоится «3» июля 2008 г. в 15:30 на заседании диссертационного  
совета Д212.243.01 по специальности 01.04.03 – Радиопизика при  
Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского по  
адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке  
Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Автореферат разослан “\_\_” мая 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



В.М. Аникин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность исследуемой проблемы**

Хаотическая динамика систем с небольшим числом степеней свободы привлекает внимание исследователей из различных областей знаний. Данный интерес вызван тем, что нетривиальное поведение относительно просто устроенных детерминированных систем во многих случаях позволяет объяснить различные феномены, ранее считавшиеся шумовыми. Открытие детерминированного хаоса дало значительный импульс развитию синергетики и нелинейной динамики<sup>1,2</sup>.

Одним из актуальных направлений исследований, связанных с анализом поведения систем, демонстрирующих хаотическое поведение, является изучение коллективной динамики двух или более элементов. В области радиопизики подобные исследования традиционно ведутся с позиций концепции синхронизации<sup>3,4,5</sup>, и полученные фундаментальные результаты позволяют все глубже понимать закономерности динамики связанных хаотических систем. Более того, такие исследования имеют интересные практические приложения, в частности в области создания коммуникационных систем, использующих динамический хаос для передачи информации<sup>6</sup>.

Основными можно назвать два направления данной деятельности: использование генераторов хаоса оптического диапазона для передачи информации, в том числе по широко используемым оптоволоконным линиям связи, а также создание радиотехнических решений, использующих хаотический сигнал в качестве несущей в высоко- и сверхвысокочастотном диапазонах.

С точки зрения передачи информации представляет интерес использование источников детерминированного хаотического сигнала как в передатчике, так и в приемнике. В этом случае важнейшим условием является наличие синхронизации между генераторами хаоса с обеих сторон канала связи.

Весьма широк круг работ, в которых авторы обращаются к изучению

---

<sup>1</sup> Странные аттракторы. Сборник статей под ред. Синая Я.Г. и Шильникова Л.П.–М.: Мир.1981. 253 С.

<sup>2</sup> Кузнецов С.П. Динамический хаос. –М.: Физматлит. 2001. 296 С.

<sup>3</sup> Анищенко В.С. Астахов В.В, Вадивасова Т.Е., Нейман А.Б., Стрелкова Г.И., Шиманский-Гайер Л. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2003.

<sup>4</sup> Пиковский А, Розенблум М., Куртс Ю. Синхронизация: фундаментальное нелинейное явление: пер. с английского. –М.: Техносфера. 2002. 496 С.

<sup>5</sup> Афраймович В.С., Некоркин В.И., Осипов Г.В., Шалфеев В.Д., Устойчивость, структуры и хаос в нелинейных сетях синхронизации / под ред. Гапонова-Грехова А.В., Рабиновича М.И. ИПФ АН СССР. Горький, 1989. 256 С.

<sup>6</sup> Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи.–М.: Физматлит. 2002. 252 С.

динамики модельных систем со связанными генераторами хаоса, исследуя синхронизацию в зависимости от параметров парциальных систем, силы связи между системами, интенсивности шума в канале связи, как численно, так и экспериментально. Число работ, учитывающих эффекты фильтрации при передаче хаотического сигнала, остается небольшим. Однако, фильтрацию следует отнести к наиболее существенным факторам, оказывающим влияние на качество передачи информации с использованием динамического хаоса. В общем случае, искажения сигнала в канале связи представляют собой совокупность амплитудно- и фазочастотных преобразований. Поэтому канал можно моделировать с помощью некоторого эквивалентного фильтра.

Тот факт, что фильтрация влияет на свойства и характеристики хаотического сигнала и структуру его аттрактора в фазовом пространстве отдельно взятой динамической системы, сегодня не вызывает сомнений. Так, например, известно, что при линейной фильтрации размерность хаотического аттрактора растет<sup>7</sup>, а топологическая энтропия остается инвариантной<sup>8</sup>.

Известен подход<sup>9</sup>, когда при изучении синхронизации связанных хаотических систем фильтр использовался для ограничения полосы в спектре сигнала, либо для исключения из спектра несущей нежелательных компонент.

С практической точки зрения выделяют методы<sup>10,11</sup>, позволяющие в разной степени компенсировать искажения сигнала в канале связи или бороться с последствиями фильтрации.

Таким образом, необходимость учитывать искажения, возникающие при передаче сигналов очевидна. При этом вопрос о том, как именно влияют фильтрующие свойства канала на динамику связанных систем, остается открытым.

**Цель диссертационной работы** состоит в определении основных закономерностей динамики автогенераторов хаотических колебаний, связанных через канал с ограниченной шириной полосы пропускания, используя в качестве модели канала фильтр нижних частот, в натурном радиофизическом и численном экспериментах.

---

<sup>7</sup> Badii R., Broggi G., Derighetti B., Ravani M., Ciliberto S., Politi A., Rubio M.A. Dimension Increase in Filtered Chaotic Signals // Phys. Rev. Lett., 1988. V. 60. N 11. P.979-982.

<sup>8</sup> Zhu L., Lai Y.-C., Hoppensteadt F.C., Bollt E.M. Numerical and experimental investigation of the effect of filtering on chaotic symbolic dynamics // Chaos, 2003. Vol. 13. N 1. P. 410-419.

<sup>9</sup> Caroll T.L. Synchronizing chaotic systems using filtered signals // Phys. Rev. E. 1994. Vol. 50. N 4. P.2580-2587

<sup>10</sup> Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Передача информации с использованием синхронного хаотического отклика при наличии фильтрации в канале связи // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 16. С. 71-77.

<sup>11</sup> Rulkov N.F., Tsimring L.S. Synchronization methods for communication with chaos over band-limited channels. // Int. J. Circ. Theor. Appl. 1997. No. 27. P.555-567.

## **Достоверность научных результатов**

Достоверность научных выводов работы подтверждается воспроизводимостью результатов натуральных экспериментов, соответствием экспериментальных данных результатам компьютерного моделирования, согласованностью результатов с общими закономерностями поведения неавтономных автоколебательных систем, а также с результатами, полученными другими авторами, использованием хорошо апробированных методик численного эксперимента.

## **Научная новизна**

Основные результаты диссертации являются новыми и получены впервые. В частности:

- При исследовании синхронизации генератора Чуа внешним периодическим сигналом впервые в эксперименте и численно детально исследовано влияние изменения наклона рабочего участка и асимметрии кусочно-линейной вольт-амперной характеристики нелинейного элемента схемы.

- Для неавтономной схемы Чуа выявлено изменение границ областей периодических колебаний и бифуркаций удвоения периода на плоскости управляющих параметров «основная частота – амплитуда» внешнего воздействия в зависимости от наличия в его спектре гармоник основной частоты.

- Проведено сравнение картины синхронизации автогенератора Чуа гармоническим и импульсным воздействием, выявлена зависимость структуры областей синхронизации от направления действия импульсов.

- Впервые экспериментально и численно исследована система связанных через фильтр нижних частот автогенераторов хаоса, изучена зависимость динамических режимов от характеристик канала связи.

- При рассмотрении однонаправлено связанных через фильтр нижних частот генераторов Чуа впервые обнаружено, что при определенных параметрах цепи связи в ведомой системе устойчиво реализуются колебания малой амплитуды, которые в конечном диапазоне изменения силы связи и частоты среза фильтра сосуществуют с колебаниями, типичными для парциального генератора.

- На примере генератора Чуа и системы Ресслера показано, что введение диссипативной связи может переводить автогенератор с фазокогерентным хаотическим аттрактором в режим жесткого возбуждения, а наличие фильтра нижних частот в цепи связи увеличивает вероятность реализации и степень устойчивости в ведомой системе режима вынужденных колебаний с малой амплитудой.

- Исследованы аспекты динамики взаимно связанных генераторов, взаимодействующих через канал, обладающий анизотропными свойствами, то есть различной пропускающей способностью в разных направлениях, в

частности, при различной ширине полосы пропускания и различных степенях ослабления сигнала.

### **Практическая значимость**

Практический интерес может представлять возможность управления мультистабильностью в автогенераторе Чуа с помощью внешнего многочастотного воздействия.

Результаты, полученные при рассмотрении динамики связанных через фильтр автоколебательных систем, представляют интерес для широкого круга исследователей, занимающихся вопросами создания коммуникационных систем, использующих динамический хаос, в условиях ограниченной полосы пропускания канала связи.

С практических позиций полезно знать общие закономерности взаимодействия нелинейных динамических систем, связанных через фильтр, в том числе в ситуациях, когда элемент с фильтрующими свойствами является неотъемлемой частью некоторой интегральной системы и несет в ней функциональную нагрузку, как, например, это происходит в нейрокompьютерах, реализующих модели распознавания или автолокализации образа по принципу Гроссберга<sup>12</sup>.

Результаты работы использованы при выполнении госбюджетной НИР (номер госрегистрации - 01.2003.15224). Исследования, проведенные в данной работе, поддержаны грантами Министерства образования РФ (Е02-3.5-149), научной программы "Университеты России" (УР.01.01.051), Американского Фонда Гражданских Исследований и Развития (CRDF REC-006).

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. В неавтономном генераторе Чуа при смещении вольт-амперной характеристики нелинейного элемента вдоль оси напряжения, а также при обогащении спектра внешнего периодического сигнала гармониками основной частоты проявляется мультистабильность, в результате которой границы областей синхронизации и линии бифуркаций на картах динамических режимов, построенных на плоскости управляющих параметров «основная частота – амплитуда» внешнего воздействия существенно отличаются для каждого из сосуществующих в фазовом пространстве предельных циклов, а сами карты приобретают гистерезисный характер.

2. В системе однонаправлено связанных генераторов Чуа и систем Ресслера, находящихся в режиме хаотических колебаний с ленточным, фазокогерентным аттрактором, в присутствии фильтра нижних частот в цепи связи в конечном диапазоне изменения параметра связи и частоты среза фильтра реализуется новый тип мультистабильности, не проявляющийся в

---

<sup>12</sup> Чернавский Д.С., Проблема происхождения жизни и мышления с точки зрения современной физики // УФН, 2000. Т.170. N.2. С.157-183

фазовом пространстве парциального генератора и состоящий в сосуществовании двух аттракторов, которым соответствуют колебания разных амплитуд: нормальной и малой. В режиме винтового хаоса мультистабильность указанного типа не наблюдается. Эффект, в целом, не зависит от типа и порядка ФНЧ.

3. В основе мультистабильности, обнаруженной в автогенераторах с 1.5 степенями свободы, однонаправлено связанных через фильтр, лежит диссипативный характер связи, изменяющий структуру фазового пространства парциальной системы. При определенных значениях управляющих параметров парциального генератора диссипативный механизм внешнего воздействия приводит к возможности жесткого возбуждения колебаний, что ведет к сосуществованию в фазовом пространстве ведомой системы двух устойчивых предельных множеств в окрестности отдельно взятой неподвижной точки.

4. В системе двух хаотических генераторов, взаимно связанных через ФНЧ, область синхронизации хаоса с высокой средней когерентностью фаз реализуется в весьма ограниченном диапазоне силы связи. При больших связях область фазовой синхронизации ограничена эффектом сосуществования синхронного хаотического аттрактора с периодическими режимами, а также эффектом гибели колебаний. При малых связях область синхронных хаотических режимов вытесняется различными режимами периодических и несинхронных хаотических колебаний. Существует также значение частоты среза, начиная с которого область синхронной хаотической динамики реализуется в конечных пределах изменения параметров связи, характеризующих ослабление сигнала в прямом и обратном направлениях.

#### **Апробация работы и публикации**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 11-й Всероссийской школе-конференции «Нелинейные волны – 2002» (г. Н.Новгород, 2002 г.), на 4-ой Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2002 г.), на VI научной конференции «Нелинейные колебания механических систем» (г. Н.Новгород, 2002 г.), на Международной конференции "Synchronization of Chaotic and Stochastic Oscillations - SYNCHRO-2002", на XLI международной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (г. Новосибирск, 2003 г.), на IX Всероссийской школе-семинаре «Физика и применение микроволн» (г. Звенигород, 2003 г.), на научных школах-конференциях «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (г. Саратов, 2003, 2004, 2006 гг.), на VII Всероссийской научной конференции студентов-радиофизиков (г. Санкт-Петербург, 2003 г.), на XII научной школе «Нелинейные волны – 2004» (г. Н.Новгород, 2004 г.), на IX Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» (г. Звенигород, 2004 г.), Всероссийских научно-технических конференциях молодых ученых и

студентов «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2006, 2007 гг.), на I и II Конференциях молодых ученых «Нанозлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (г. Саратов, 2006, 2007 гг.), на IX и XI International School for Young Scientists and Students on Optics, Laser Physics & Biophysics (2005, 2007 гг.), а также на научных семинарах НОЦ «Нелинейная динамика и биофизика» СГУ.

### Личный вклад автора

Автором были поставлены все описанные в работе натурные радиофизические эксперименты и проведены соответствующие измерения; разработаны компьютерные программы и проведено численное моделирование. Постановка задач, а также объяснение и интерпретация результатов проведены совместно с научным руководителем.

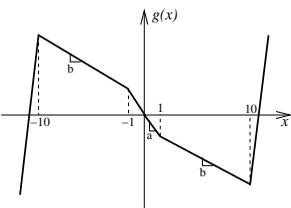
### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 126 страниц текста, включая иллюстрации. Список литературы на 11 страницах включает 160 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы и сформулированы ее цель, научная новизна и практическая значимость. Приводятся положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов.

В **первой главе** описан используемый в работе экспериментальный макет генератора Чуа<sup>13</sup> и его математическая модель, которая представляет собой систему трех обыкновенных дифференциальных уравнений:



$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha(y - x - g(x)), \\ \frac{dy}{dt} = x - y + z, \\ \frac{dz}{dt} = -\beta y, \end{cases} \quad (1)$$

**Рис.1.** Вид кусочно-линейной функции  $g(x)$ .

где  $x, y, z$  – переменные состояния;  $\alpha, \beta$  – управляющие параметры;  $g(x)$  – пятиотрезочная кусочно-линейная функция – безразмерный образ вольт-амперной характеристики нелинейного элемента в схеме Чуа. Вид  $g(x)$  представлен на рис.1, данная функция характеризуется двумя параметрами  $a$  и  $b$  – наклонами

<sup>13</sup> Matsumoto T., Chua L.O., Komuro M. The double scroll // IEEE Trans. Circuits and Syst. 1985. V.CAS-32, No.8. P.797-818; Мацумото Т. Хаос в электронных схемах // Хаотические системы. Тематический выпуск. ТИИЭР. 1987. Т.75, №8. С.66-87; Journal of circuits, systems and computers. Special Issue on Chua's Circuit: Paradigm for Chaos. 1993. V. 3, No 2.

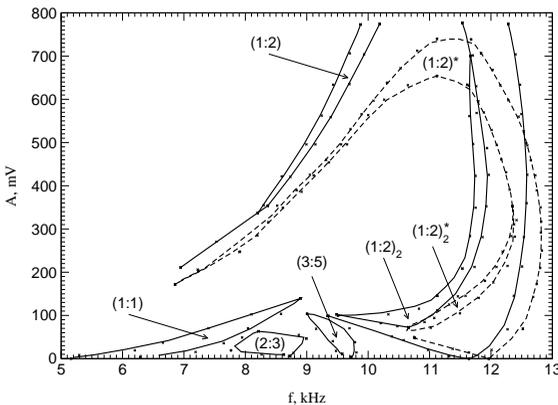
центральной и боковых ветвей рабочего участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, соответственно.

Проведено экспериментальное исследование синхронизации автогенератора внешним гармоническим сигналом для различных сочетаний параметров, управляющих автономной динамикой схемы Чуа. Для проверки корректности постановки радиофизического эксперимента исследованы сценарии разрушения режима синхронизации при малых амплитудах внешнего воздействия и установлено их соответствие известным теоретическим представлениям.

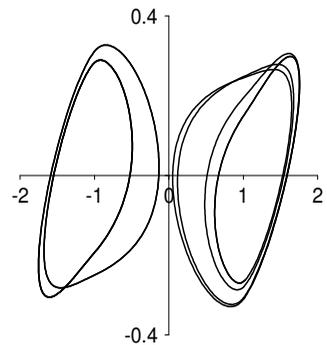
Изучена зависимость динамики неавтономного генератора Чуа от параметров вольт-амперной характеристики нелинейного элемента: наклона рабочего участка и степени симметрии.

Показано, что изменение наклона рабочего участка ВАХ приводит к существенному и закономерному изменению структуры областей синхронизации генератора периодическим сигналом на плоскости управляющих параметров «частота – амплитуда» внешнего воздействия. При увеличении наклона обнаружен переход от режима периодических колебаний к хаотической динамике через каскад бифуркаций удвоения периода, когда на карте динамических режимов внутри областей синхронизации открываются области хаоса. Все это позволяет рассматривать данный наклон как важный управляющий параметр в экспериментах с неавтономным генератором.

Отдельное внимание уделяется эффектам, обусловленным асимметрией ВАХ нелинейного элемента и наличием в спектре внешнего периодического сигнала дополнительных компонент, поскольку с практической точки зрения, как абсолютная симметрия, так и строго одночастотное воздействие являются идеализацией.



**Рис.2.** Экспериментально полученная карта динамических режимов генератора Чуа под внешним гармоническим воздействием.



**Рис.3.** Пример сосуществующих аттракторов в фазовом пространстве неавтономной системы Чуа.

Карты динамических режимов для аттракторов, одновременно реализующихся в фазовом пространстве генератора, идентичны только в случае полной симметрии ВАХ. Нарушение симметрии фазового пространства за счет сдвига ВАХ нелинейного элемента вдоль оси напряжений приводит к изменению бифуркационных значений управляющих параметров внешнего воздействия для каждого из аттракторов, одновременно реализующихся в автономной системе. Становится возможной ситуация, когда при одних и тех же значениях управляющих параметров вокруг одной из неподвижных точек в фазовом пространстве реализуется предельный цикл, а вокруг другой – хаотический аттрактор. В качестве примера на рис.2 приведена карта динамических режимов, полученная экспериментально, на ней пунктирной линией отмечена граница области синхронизации, построенная для аттрактора, реализующегося вокруг второй неподвижной точки. На рис.3 приведена проекция фазовых портретов, реализующихся в неавтономной системе, в случае, когда в системе сосуществуют аттракторы разных типов.

В численном эксперименте показано, что к подобной же мультистабильности приводит и обогащение спектра внешнего сигнала гармониками основной частоты. Если на генератор Чуа, находившийся в режиме периодических колебаний, подействовать таким сигналом, то карта динамических режимов, построенная на плоскости «основная частота – амплитуда» воздействия, приобретает гистерезисный характер. В этом случае она будет состоять, как минимум, из двух листов, соответствующих двум симметричным предельным циклам, исходно присутствующим в фазовом пространстве системы. Границы областей периодических колебаний и линии бифуркаций, построенные на разных листах для каждого базового предельного цикла, совпадают только в области малых амплитуд внешней силы и существенно отличаются при любых других значениях амплитуды.

Экспериментально и численно продемонстрирована возможность синхронизации автогенератора хаотических колебаний униполярным импульсным периодическим воздействием через подавление хаоса. Сравнивая результаты синхронизации периодических колебаний генератора одночастотным сигналом со случаем, когда воздействие представляет собой последовательность униполярных импульсов конечной длительности, можно сделать выводы о влиянии направления, в котором оказывается воздействие, на динамику генератора. Численные эксперименты показали, что внесение гармонического воздействия в разные уравнения, описывающие автономный генератор, не приводит к качественному изменению общей структуры границ основных динамических режимов при изменении параметров внешней силы. Напротив, когда воздействие носит импульсный характер, структура языков синхронизации и областей нерегулярных колебаний на картах динамических режимов существенно зависит от направления вектора внешнего воздействия по отношению к предельному циклу в фазовом пространстве системы.

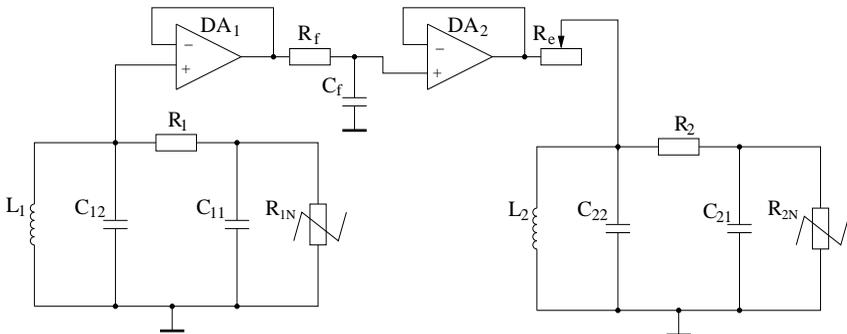
**Вторая глава** посвящена исследованию динамики однонаправлено связанных автогенераторов хаоса. Прежде всего, экспериментально показано, что в случае, когда канал связи не ограничен по полосе пропускания, в системе связанных генераторов Чуа устанавливается режим полной хаотической синхронизации.

Далее рассматривается модель канала связи с ограниченной полосой пропускания, построенная на основе фильтра нижних частот, в присутствии которого полная синхронизация ведущей и ведомой систем невозможна. Принципиальная схема исследуемой в этом разделе системы представлена на рис.4. Динамику данной схемы можно описать с помощью следующей системы уравнений в безразмерных переменных:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= \alpha_1 (y_1 - x_1 - g(x_1)), & \frac{dy_1}{dt} &= x_1 - y_1 + z_1, & \frac{dz_1}{dt} &= -\beta_1 y_1, & \frac{du}{dt} &= \mu (y_1 - u), \\ \frac{dx_2}{dt} &= \alpha_2 (y_2 - x_2 - g(x_2)), & \frac{dy_2}{dt} &= x_2 - y_2 + z_2 + \varepsilon (u - y_2), & \frac{dz_2}{dt} &= -\beta_2 y_2, \end{aligned} \quad (2)$$

Обнаружено, что в фазовом пространстве однонаправлено связанных через ФНЧ генераторов Чуа в конечном диапазоне изменения параметра связи  $\varepsilon$  и частоты среза фильтра  $\mu$  в ведомой системе реализуется новый тип мультистабильности, не наблюдавшийся в автономном генераторе и состоящий в одновременном сосуществовании двух аттракторов разных характерных геометрических размеров. На рис.5 представлена диаграмма зависимости максимальной амплитуды колебаний ведомого генератора от частоты среза фильтра и силы связи, полученная в натурном радиофизическом эксперименте. Серым цветом выделена область мультистабильности, в которой сосуществуют режимы, представленные на рис.5 справа. Также видно, что в определенном диапазоне изменения силы связи в ведомой системе не реализуется аттрактор, размеры которого соответствуют размерам аттрактора автономной системы.

В численном эксперименте показано, что данный тип



**Рис.4.** Принципиальная схема генераторов Чуа, однонаправлено связанных через фильтр нижних частот.

мультистабильности демонстрируют и системы Ресслера, находящиеся в режиме ленточного хаоса и связанные через ФНЧ. Отмечено, что эффект не зависит от типа и порядка ФНЧ.

Для объяснения обнаруженного эффекта в численном эксперименте был рассмотрен более простой случай, когда ведущая система генерирует гармонический сигнал с частотой, близкой к основной частоте колебаний ведомой системы. Тогда динамика ведомой системы описывается следующими уравнениями:

$$\dot{x} = \alpha(y - x - g(x)), \quad \dot{y} = x - y + z + \varepsilon(F \sin(\omega t) - y), \quad \dot{z} = -\beta y. \quad (3)$$

Если амплитуда внешнего сигнала  $F = 0$ , то исходная автономная система (1) приобретает дополнительный управляющий параметр  $\varepsilon$ . На рис.6 приведены бифуркационные диаграммы для различных значений параметра  $\varepsilon$  при  $\beta = 16$ . Для  $\varepsilon = 0$  система совпадает с исходной системой (1), и при  $\alpha \approx 7.0$  происходит бифуркация Андронова-Хопфа. Так как модель – кусочно-линейная, бифуркация является нетипичной в том смысле, что в системе сразу возникают колебания конечной амплитуды. Иная ситуация складывается при  $\varepsilon > 0$ . Как видно из рис.6, в области бифуркации Андронова-Хопфа возникает гистерезис, который свидетельствует о сосуществовании двух устойчивых предельных множеств в фазовом пространстве. То есть система (3) при  $F = 0$  и  $\varepsilon > 0$  становится системой с жестким возбуждением. На рис.7 приведена проекция фазового пространства системы вблизи одной из неподвижных точек при  $\varepsilon = 0.3$ ,  $\alpha = 9.32$ . Серым цветом на данном рисунке отмечены переходные процессы из разных начальных условий, черным цветом отмечены аттракторы: предельный цикл и устойчивая неподвижная точка. Также на рисунке можно выделить область,

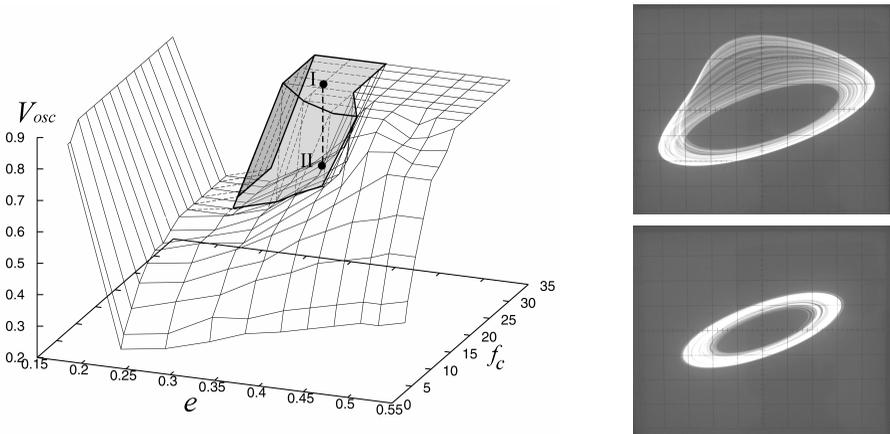


Рис.5. Экспериментальная диаграмма зависимости максимального значения амплитуды колебаний  $V_{osc}$ , В, возникающих в ведомой системе, от линейной частоты среза  $f_c$ , кГц фильтра и параметра связи  $\varepsilon$ . Справа приведены проекции фазовых портретов сосуществующих режимов из области мультистабильности в точках I (сверху) и II (снизу).

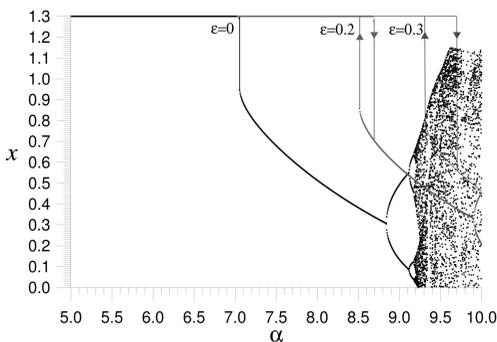
не заполненную траекториями, которая является окрестностью неустойчивого предельного цикла. Вследствие того, что увеличение значения параметра  $\epsilon$  ведет к росту диссипации в системе, режимы сложной динамики смещаются в область больших значений  $\alpha$ , кроме того, увеличение  $\epsilon$  ведет к расширению области гистерезиса. При увеличении амплитуды воздействия  $F$  неподвижная точка теряет устойчивость и вокруг нее образуется устойчивый предельный цикл малой амплитуды.

Описанные исследования позволили заключить, что в основе обнаруженной мультистабильности лежит диссипативный характер связи, изменяющий структуру фазового пространства парциальной системы. Оказалось, что диссипативный механизм внешнего воздействия может приводить к жесткому возбуждению колебаний ведомой системы, что ведет к сосуществованию в ее фазовом пространстве двух устойчивых предельных множеств в окрестности отдельно взятой неподвижной точки.

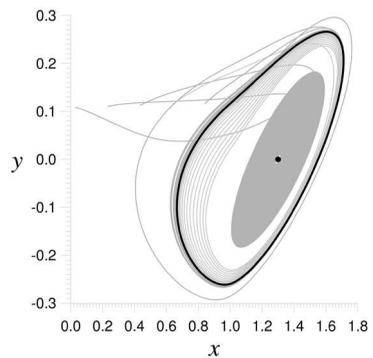
**Третью главу** составляют исследования системы взаимно связанных автогенераторов с фильтрами нижних частот в прямой и обратной цепях связи, каждая из которых характеризуется своими полосой пропускания и величиной параметра связи.

В численном эксперименте было проведено сравнение некоторых характеристик синхронизации применительно к системам с фильтром в цепи связи. Наиболее продуктивными оказались индекс синхронизации, рассчитанный как средняя когерентность фаз, минимум функции подобия, а также, в ряде случаев, функция когерентности и вычисляемая на ее основе степень синхронизации.

При моделировании динамики идентичных взаимно связанных через ФНЧ генераторов были рассмотрены два варианта анизотропии канала связи: по ширине полосы пропускания (частотная) и по степени ослабления сигнала



**Рис.6.** Бифуркационная диаграмма автономного генератора Чуа при различных значениях  $\epsilon$ .



**Рис.7.** Устройство фазового пространства системы вблизи одной из неподвижных точек при  $\epsilon=0.3$ ,  $\alpha=9.32$ .

(амплитудная). В обоих случаях исследование проводилось на основе карт динамических режимов, построенных на плоскости управляющих параметров, характеризующих связь.

Показано, что область фазовой синхронизации с высокой средней когерентностью фаз реализуется в весьма ограниченном диапазоне изменения параметра связи. При большой величине последнего данная область ограничена эффектом сосуществования синхронного хаотического аттрактора с периодическими режимами, а также эффектом гибели колебаний. При малых связях область синхронных хаотических режимов вытесняется различными режимами периодических и несинхронных хаотических колебаний. На рис.8 приведена зависимость минимума  $K$  функции подобия от частот среза фильтров, в случае, когда область синхронных режимов занимает максимально возможную часть карты. На рисунке вблизи диагонали  $\mu_1 = \mu_2$  четко выделяются области, отмеченные черным цветом, в которых величина  $K$  близка к нулю. В первой области (при малых  $\mu_i$ ) в связанных системах наблюдается противофазная синхронизация периодических колебаний, а во второй области (при  $4 < \mu_i < 8$ ) реализуется режим *lag*-синхронизации, который на диагонали переходит в режим полной синхронизации.

Кроме того, выявлено значение частоты среза, начиная с которого область синхронной хаотической динамики существует в заметных пределах изменения параметров связи, характеризующих ослабление сигнала в прямом и обратном направлениях.

С учетом закономерностей, полученных при численном моделировании, был поставлен натурный радиофизический эксперимент, в результате которого на плоскость управляющих параметров, характеризующих канал связи, были нанесены границы основных колебательных режимов и линии бифуркаций (рис.9). На плоскости частот среза фильтров в прямой и обратной цепях связи линиями различной толщины отмечены границы основных типов колебаний связанных генераторов с различной средней когерентностью фаз. На рис.9 также приведены фазовые портреты первого генератора и проекции совместного фазового пространства в характерных случаях. На карте литерой «Т» отмечены области периодических колебаний, индекс при которой соответствует длине периода колебаний по отношению к базовому  $T_1$ ,

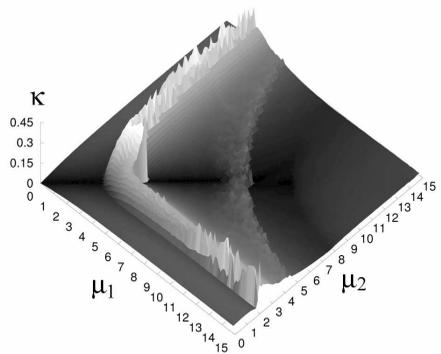


Рис.8. Зависимость минимума функции подобия  $K$  от частот среза фильтров в случае взаимной связи между генераторами, когда  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.2$ .

причем серия областей режимов  $T_1$ – $T_2$ – $T_4$  формирует каскад бифуркаций удвоения периода. Область колебаний «NP» соответствует области, в которой существуют как квазипериодические, так и хаотические режимы. Области «Chaos» соответствуют хаотической динамике, развившейся через каскады бифуркации удвоения периода.

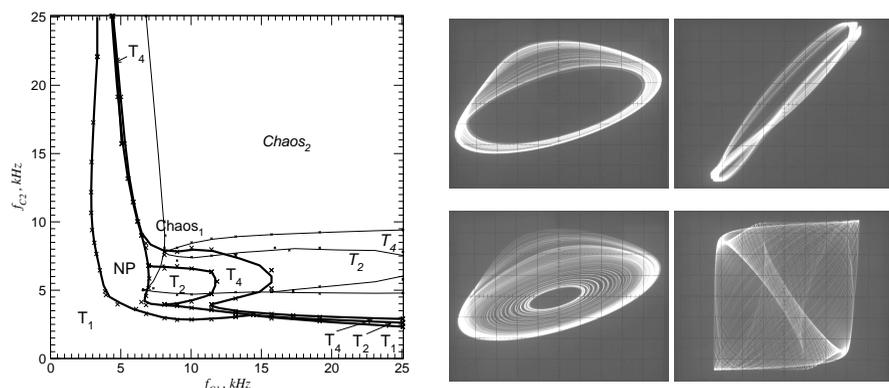
Сравнение результатов численного и натурального экспериментов выявило их качественное соответствие с учетом слабой неидентичности парциальных генераторов.

В **заклучении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

### Основные результаты и выводы

1. В эксперименте и численно исследовано влияние изменения наклона рабочего участка кусочно-линейной вольт-амперной характеристики нелинейного элемента схемы Чуа на ее неавтономную динамику. Выявлены значения наклона рабочего участка ВАХ, при которых генератор, изначально находившийся в режиме периодических колебаний, под действием внешнего гармонического сигнала при определенных сочетаниях амплитуды и частоты последнего переходит в режим хаотических колебаний.

2. Изучены эффекты, возникающие при нарушении симметрии ВАХ нелинейного элемента генератора Чуа, находящегося под внешним гармоническим воздействием. Обнаружено, что смещение характеристики вдоль оси напряжения, так же как и добавление в спектр внешнего воздействия гармоник основной частоты, приводят к гистерезисной структуре карт динамических режимов, построенных на плоскости управляющих параметров «основная частота - амплитуда» внешнего воздействия. Практически это означает, что при фиксированных значениях управляющих параметров в фазовом пространстве генератора в окрестностях



**Рис.9.** Экспериментально полученная карта динамических режимов взаимно связанных генераторов Чуа. Характерные аттракторы из области «Chaos<sub>2</sub>» и «NP» – в левом столбце, соответствующие проекции аттракторов в совместном фазовом пространстве – в правом.

двух неподвижных особых точек одновременно могут реализовываться аттракторы разных типов.

3. В случае синхронизации автогенератора Чуа периодической последовательностью униполярных импульсов конечной длительности была выявлена зависимость структуры областей синхронизации и нерегулярных колебаний на плоскости управляющих параметров от направления действия импульсов по отношению к предельному циклу в фазовом пространстве системы.

4. Экспериментально и в ходе численного моделирования исследована система связанных через фильтр нижних частот автогенераторов хаоса, изучена зависимость динамических режимов от характеристик канала связи. При рассмотрении однонаправлено связанных через ФНЧ генераторов Чуа в натурном эксперименте было обнаружено, что при определенных параметрах цепи связи в ведомой системе устойчиво реализуются колебания малой амплитуды, которые в конечном диапазоне изменения силы связи и частоты среза фильтра сосуществуют с колебаниями, типичными для парциального генератора. Выявленная мультистабильность была подтверждена численно на примере однонаправлено связанных через фильтр генераторов Чуа и систем Ресслера, находящихся в режиме хаотических колебаний с ленточным, фазокогерентным аттрактором.

5. Дополнительные численные исследования показали, что в основе мультистабильности, обнаруженной в автогенераторах с 1.5 степенями свободы, однонаправлено связанных через фильтр, лежит диссипативный характер связи, изменяющий структуру фазового пространства парциальной системы. При определенных значениях управляющих параметров парциального генератора диссипативный механизм внешнего воздействия приводит к возможности жесткого возбуждения колебаний, что ведет к сосуществованию в фазовом пространстве ведомой системы двух устойчивых предельных множеств в окрестности отдельно взятой неподвижной точки. Наличие фильтра нижних частот в цепи связи увеличивает вероятность реализации и степень устойчивости в ведомой системе режима вынужденных колебаний с малой амплитудой.

6. Проведено сравнение различных количественных характеристик синхронизации колебаний нелинейных, в том числе, хаотических систем для анализа динамики автогенераторов, связанных через канал, ограниченный по ширине полосы пропускания. Так, применительно к анализу динамики систем с фильтром в цепи связи, наиболее эффективным представляется расчет средней когерентности фаз, минимума функции подобия, а также функции когерентности и вычисляемого на ее основе индекса синхронизации. Результаты численных экспериментов показали целесообразность совместного использования нескольких характеристик одновременно.

7. Основным результатом при моделировании взаимно связанных генераторов хаотических колебаний с учетом ограниченной полосы пропускания прямого и обратного каналов связи стало выявление диапазонов изменения управляющих параметров, характеризующих связь, в которых реализуются хаотические, либо периодические колебания с разной степенью синхронизации парциальных систем. Оказалось, что синхронная хаотическая динамика существует в весьма ограниченном диапазоне изменения величины связи, при этом частоты среза фильтров должны, как минимум, вдвое превышать основную частоту колебаний парциальных генераторов. Результаты моделирования подтверждены в натурном радиофизическом эксперименте при исследовании взаимной динамики связанных генераторов на плоскости частот среза фильтров в прямой и обратной цепях связи.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. Прохоров А.А., Мчедлова Е.С. Синхронизация и хаос в неавтономном генераторе с кусочно-линейной вольт-амперной характеристикой: эксперимент и численное моделирование // Известия РАН: Серия Физическая. 2003. Т.67. N.12. С.1693-1696.
2. Прохоров А.А., Мчедлова Е.С., Сложная динамика генератора с кусочно-линейной вольт-амперной характеристикой под внешним периодическим многочастотным воздействием // Радиотехника и электроника, 2006. Т.51. N.4. С. 445-449.
3. Прохоров А.А., Мчедлова Е.С. Эффекты синхронизации генераторов хаотических колебаний в присутствии фильтра нижних частот в канале связи // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 4. С. 66-72.
4. Прохоров А.А., Мчедлова Е.С. Исследование особенностей поведения генератора Double Scroll под внешним периодическим воздействием // Сборник научных трудов "Современные проблемы радиоэлектроники". Красноярск: ИПЦ КГТУ. 2002. С.51-53.
5. Прохоров А.А. Особенности динамики генератора Double Scroll под внешним гармоническим воздействием // "Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2002". Материалы научной школы-конференции. Саратов: Изд-во ГосУНЦ "Колледж". 2002. С.18-21.
6. Прохоров А.А. Синхронизация и хаос в неавтономном генераторе с кусочно-линейной вольт-амперной характеристикой // Материалы XLI международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс». Новосибирск. 2003. С.116.
7. Прохоров А.А., Мчедлова Е.С. Синхронизация и хаос в неавтономном генераторе с кусочно-линейной вольт-амперной характеристикой: эксперимент и численное моделирование // Труды IX Всероссийской школы-семинара "Физика и применение микроволн" (Звенигород, Московская область, 26-30 мая 2003). 2003. Ч.2. С.90-91.
8. Прохоров А.А. Особенности синхронизации автогенератора с кусочно-

- линейной ВАХ внешним гармоническим сигналом // "Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2003". Сборник материалов научной школы конференции. Саратов: Изд-во ГосУНЦ "Колледж". 2003. С.147-150.
9. Прохоров А.А., Мчедлова Е.С. Сложная динамика генератора с кусочно-линейной вольт-амперной характеристикой под внешним периодическим многочастотным воздействием // Труды X Всероссийской школы-семинара "Физика и применение микроволн" (Звенигород, Московская область, 24-29 мая 2004). 2004. С.12.
  10. Прохоров А.А. Особенности динамики системы Чуа под внешним многочастотным воздействием: эксперимент и численное моделирование // "Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2004". Материалы школы-конференции. Саратов: Изд-во ГосУНЦ "Колледж". 2005. С.62-65.
  11. Прохоров А. А., Мчедлова Е.С. Экспериментальное исследование синхронизации автогенераторов при наличии фильтра в канале связи // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. научн. тр. / ред.: А. И. Громыко, А. В. Сарафанов. - М.: "Радио и связь", 2006.-629 с. С.47-48.
  12. Прохоров А.А., Влияние фильтрующих свойств канала связи на синхронизацию хаотических систем: эксперимент и численное моделирование // Материалы I Конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 28-30 сентября 2006 г. – Саратов: Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН. 76 с.
  13. Прохоров А.А., Мчедлова Е.С. Эффекты мультистабильности при синхронизации хаотических автогенераторов, связанных через фильтр нижних частот // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. ст. / ред.: А. И. Громыко, А. В. Сарафанов; отв. за вып.: В. В. Сухотин, С. И. Трегубов. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т; Политехнический ин-т, 2007. – 690 с. С.41-43.
  14. Прохоров А.А., Особенности динамики связанных генераторов хаоса в присутствии фильтра нижних частот в канале связи // II Конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 14-17 мая 2007, Саратов. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2007. 128 с.
  15. Прохоров А.А., Мчедлова Е.С. Влияние вида кусочно-линейной характеристики на особенности поведения неавтономного генератора Double Scroll // 6-я научная конференция "Нелинейные колебания механических систем", Тезисы докладов (Нижний Новгород, 16-19 сентября 2002), С.131-132.
  16. Prokhorov A.A., Mchedlova E.S. Peculiarities of synchronization and complex dynamics in the nonautonomous Double Scroll oscillator // The international conference on Synchronization of chaotic and stochastic oscillations (SYNCHRO-2002) (Saratov, Russia, September 22-28, 2002), P.47.

17. Прохоров А.А. Экспериментальное и численное исследование особенностей синхронизации автогенератора с кусочно-линейной ВАХ гармоническим сигналом // 7-я Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков. Тезисы докладов. (Санкт-Петербург, 9-10 декабря 2003). С.62-65.
  18. Прохоров А.А., Мчедлова Е.С. Синхронизация автогенератора с кусочно-линейной ВАХ внешним периодическим сигналом: эксперимент и численное моделирование // Нелинейные волновые процессы. Тезисы докладов. 12-я научная школа "Нелинейные волны - 2004" (Нижний Новгород, 29 февраля-7 марта 2004) С.93.
- 

ПРОХОРОВ Александр Андреевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СИНХРОНИЗАЦИИ  
СВЯЗАННЫХ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ  
С УЧЕТОМ ФИЛЬТРУЮЩИХ СВОЙСТВ КАНАЛА СВЯЗИ

Автореферат

---

Подписано к печати 23.05.2008. Формат 60 × 84 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура «Times».  
Усл. печ. л. 1,16 (1,25). Тираж 120 экз. Заказ 103-Т.

---

Типография Саратовского государственного университета  
410012, Саратов, ул. Большая Казачья, 112а, корпус 8.