

На правах рукописи

СТАРОДУБОВ Андрей Викторович

ХАОС И ХАОТИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ
В СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРАХ
НА ОСНОВЕ КЛИСТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ
(ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ)

01.04.03 – Радиофизика
01.04.04 – Физическая электроника

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико–математических наук

Саратов – 2008

Работа выполнена на кафедре электроники, колебаний и волн и в Отделении физики нелинейных систем Научно-исследовательского института Естественных наук Саратовского государственного университета.

Научные руководители: член–корреспондент РАН,
доктор физико–математических наук,
профессор **Трубецков Дмитрий Иванович**,

доктор физико–математических наук,
доцент **Короновский Алексей Александрович**

Официальные оппоненты: доктор физико–математических наук,
профессор **Григорьев Юрий Алексеевич**,

доктор физико–математических наук,
Казанцев Виктор Борисович

Ведущая организация: ФГУП “НПП “Алмаз”, г. Саратов

Защита состоится “14” ноября 2008 г. в 15 часов 30 минут в 34 ауд. III корпуса СГУ на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 в Саратовском государственном университете (410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Саратовского государственного университета (Саратов, ул. Университетская, 42).

Автореферат разослан “10” октября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



В.М. Аникин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследуемой проблемы. Исследование сложного, неавтономного поведения нелинейных динамических систем находится в центре внимания исследователей уже в течении достаточно долгого времени. С развитием теории динамического хаоса и хаотической синхронизации было выявлено достаточно большое число различных типов хаотического синхронного поведения связанных динамических систем с потоковым временем: *полная синхронизация, синхронизация с запаздыванием* (лаг-синхронизация), *обобщенная синхронизация, частотная синхронизация, фазовая синхронизация* и *частичная синхронизация*¹.

Особый интерес вызывает явление обобщенной хаотической синхронизации (Н.Ф. Рульков, Л. Косареv и др.), имеющее место в однонаправленно связанных автоколебательных системах. Данный тип синхронного поведения явным образом выделяется среди других типов хаотической синхронизации как по типу синхронного поведения, так и по способам диагностики. Важно отметить, что режим обобщенной синхронизации может возникать между двумя *совершенно различными* хаотическим автоколебательными системами, например, между системами с разной размерностью фазового пространства, в том числе и между системами с сосредоточенными и распределенными параметрами. Данное явление достаточно подробно изучено для динамических систем с малым числом степеней свободы: в литературе подробно описаны методы диагностики явления обобщенной синхронизации, а также механизмы, приводящие к его установлению, обсуждаются вопросы о взаимосвязи этого типа хаотического поведения с другими режимами хаотической синхронизации. В то же самое время, для распределенных систем и систем с запаздыванием (системы с бесконечным числом степеней свободы) подобных исследований крайне мало, а экспериментальные исследования вследствие их сложности практически не проводились, несмотря на то, что эти системы являются распространенным классом моделей реальных физических систем — в частности, систем электронной природы, в том числе, устройств и систем электроники сверхвысоких частот (СВЧ) и радиофизики. Отметим, что явление синхронизации периодических колебаний в таких системах изучено достаточно подробно. Одновременно, подобные системы характеризуются и сложными нестационарными режимами работы, они могут демонстрировать

¹Различные аспекты синхронизации автоколебательных систем рассмотрены в работах В.С. Анищенко, В.В. Астахова, В.С. Афраймовича, Б.П. Безручко, В.Н. Бельх, Т.Е. Вадивасовой, А.С. Дмитриева, В.Б. Казанцева, А.А. Короновского, С.П. Кузнецова, П.С. Ланда, В. Линдсея, В.В. Матросова, В.И. Некоркина, Г.В. Осипова, А.Н. Павлова, А.И. Паназа, В.И. Пономаренко, В.П. Пономаренко, Д.Э. Постнова, М.Д. Прохорова, М.И. Рабиновича, Н.Ф. Рулькова, Д.И. Трубецкова, А.Е. Храмова, В.Д. Шалфеева, Н.Д. Abarbanel, S. Boccaletti, T.L. Carroll, L.O. Chua, P. Grassberger, L. Kocarev, J. Kurths, U. Parlitz, L.M. Pecora, A.S. Pikovsky, K. Pyragas, M.G. Rosenblum, C.T. Zhou и др.

хаотические колебания и, соответственно, в них могут наблюдаться различные типы хаотической синхронизации. К числу последних относится и явление обобщенной хаотической синхронизации. Данное явление в системах СВЧ электроники и радиофизики мало изучено и практически не исследовано экспериментально. Одной из причин этого является то, что разработанные ранее, прежде всего, при проведении теоретических исследований на основе численного моделирования методы и способы диагностики хаотической синхронизации (расчет ляпуновских экспонент, метод вспомогательной системы, метод ближайших соседей) оказываются трудно применимыми в случае проведения экспериментальных исследований на сверхвысоких частотах. Поэтому требуется как разработка совершенно новых методов и способов диагностики явления хаотической синхронизации систем СВЧ электроники и радиофизики, которые могут быть применимы при проведении экспериментальных исследований, так и модификация ранее известных методов.

В рамках настоящей диссертационной работы впервые описаны результаты экспериментального изучения явления обобщенной хаотической синхронизации в диапазоне сверхвысоких частот. В качестве основного объекта исследования настоящей диссертационной работы выбрана одна из базовых систем сверхвысококачастотной электроники — клистронный автогенератор с запаздывающей обратной связью. Актуальность и необходимость проведения научно-исследовательских работ в данном направлении наряду с теоретическим интересом обусловлена тем, что системы сверхвысококачастотной электроники, как правило, широко используются в качестве источников мощного СВЧ излучения, вследствие чего выступают базовыми элементами практически любых информационно-телекоммуникационных систем и находят широкое применение при передаче и обработке информации, а также в технологических процессах и научных исследованиях. Таким образом, оказывается чрезвычайно важным, как с фундаментальной, так и практической точек зрения, выявить основные механизмы, приводящие к хаотической синхронизации в подобных системах. Круг практических задач в данном направлении весьма обширен: это и передача информации (в том числе скрытой) с помощью хаотических сигналов, и радиолокация на основе хаотических сигналов, и задачи радиопротиводействия и т.д.

Положительной особенностью настоящей диссертационной работы является органическое сочетание экспериментальных и теоретических исследований. Совместное проведение экспериментальных и теоретических исследований, сопоставление экспериментально и теоретически полученных результатов позволило, как представляется автору, наилучшим образом выбрать стратегию проводимых исследований, усовершенствовать существующие и разработать новые методы диагностики, что в итоге привело к наиболее целост-

ному представлению об исследуемом явлении обобщенной хаотической синхронизации в рассматриваемых системах радиофизики и СВЧ-электроники. Центральным моментом диссертационной работы является экспериментальное и теоретическое изучение сложного хаотического (включая неавтономное) поведения одной из базовых систем сверхвысокочастотной электроники — клистронного автогенератора с помощью методов и подходов радиофизики и нелинейной динамики. Подобное сочетание объектов физической электроники и методов радиофизики обуславливает представление настоящей диссертационной работы по двум специальностям: “01.04.03 — радиофизика” и “01.04.04 — физическая электроника”.

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования сложного поведения и хаотической синхронизации в системах сверхвысокочастотной электроники (в частности, в сверхвысокочастотных автогенераторах, созданных на основе клистронных усилителей с обратной связью) представляются важными и актуальными как с прикладной, так и фундаментальной точек зрения, что позволяет считать тему диссертационной работы, посвященной решению этой задачи, актуальной и важной для современных радиофизики, физической электроники и теории нелинейных динамических систем.

Цель диссертационной работы. Целью настоящей диссертационной работы является экспериментальное и теоретическое изучение сложного хаотического автономного и неавтономного поведения (включая явление обобщенной хаотической синхронизации) автоколебательных систем СВЧ электроники и радиофизики, демонстрирующих хаотическую динамику и выявление основных механизмов, приводящих к установлению синхронного поведения рассматриваемых систем, а также создание методов диагностики синхронных режимов.

В качестве объектов исследований в данной диссертационной работе выбраны автоколебательные системы СВЧ электроники и радиофизики - автогенераторы на основе клистронных усилителей с запаздывающей обратной связью. При проведении численного моделирования использована известная модель автономного автогенератора на основе клистронного усилителя с запаздывающей обратной связью². При проведении экспериментальных исследований использовались автогенераторы, построенные на основе промышленных пятирезонаторных пролетных клистронных усилителей *KУ-134Е*.

Научная новизна. Научная новизна результатов, представленных в диссертационной работе, заключается в установлении факта существования режима обобщенной синхронизации в автоколебательных системах СВЧ электроники и радиофизики, разработке метода диагностики явления обобщенной

²Рыскин Н.М., Шигаев А.М. Журнал Технической Физики. 10 (1) (2006) 72-81; Shigaev A.M., Dmitriev B.S., Zharkov Yu.D., Ryskin N.M. IEEE Transactions on Electron Devices 52 (5) (2005) 790-797

синхронизации, основанной на анализе динамики изменения спектрального состава сигнала ведомого СВЧ автогенератора, выявлении механизма, приводящего к установлению обобщенной хаотической синхронизации в связанных клистронных автогенераторах. Впервые получены следующие основные результаты:

- На основе численного моделирования показана возможность существования режима обобщенной синхронизации в СВЧ автогенераторах на основе клистронных усилителей с запаздывающей обратной связью; выявлен механизм установления обобщенной синхронизации в клистронных автогенераторах.
- Создана многофункциональная измерительная экспериментальная установка по исследованию синхронного поведения систем СВЧ электроники и радиофизики. Установка включает в себя современное контрольно-измерительное оборудование и позволяет одновременно наблюдать за спектральным составом связанных систем, проводить аналого-цифровое преобразование СВЧ сигналов связанных систем, осуществлять контроль за мощностью сигналов, генерируемых связанными системами. Кроме того, созданная экспериментальная установка позволяет реализовать в СВЧ диапазоне два типа связи между СВЧ автогенераторами: недиссипативную и диссипативную.
- С помощью широкополосного цифрового запоминающего СВЧ осциллографа реального времени выявлена и объяснена тонкая структура хаотического сигнала, генерируемого СВЧ автогенератором на основе клистронного усилителя с запаздывающей обратной связью.
- Одновременное аналого-цифровое преобразование сигналов двух однонаправленно связанных СВЧ автогенераторов на основе клистронных усилителей с запаздывающей обратной связью и применение модифицированного для систем с запаздыванием метода ближайших соседей позволило экспериментально диагностировать явление обобщенной хаотической синхронизации в связанных системах СВЧ электроники, подтвердив тем самым результаты численного моделирования.
- Создан оригинальный метод диагностики явления обобщенной хаотической синхронизации, основанный на анализе динамики изменения спектрального состава сигнала ведомой автоколебательной системы. Разработанный метод применен как к теоретическим модельным системам (связанные системы Ресслера, Лоренца) и модели связанных клистронных автогенераторов с запаздывающей обратной связью, так и к данным,

полученным в результате проведения экспериментальных исследований. Получено хорошее качественное соответствие достигнутых результатов.

Научная и практическая значимость работы. Диссертационная работа включает в себя как теоретическое (на основе численного моделирования), так и экспериментальное изучение хаотического поведения СВЧ систем физической электроники и радиофизики. Фундаментальное значение имеет установление факта существования режима обобщенной хаотической синхронизации, выявление механизма установления хаотической синхронизации и управления хаосом в таких системах. Результаты экспериментальных исследований получены на СВЧ автогенераторах, основным элементом которых выступает промышленный клистронный усилитель КУ-134Е. Подобные приборы являются базовыми элементами систем теле и радиовещания, спутниковой и наземной связи, систем радиолокации и т.д. С практической точки зрения важно установление хаотических особенностей функционирования подобных приборов, в том числе в контексте проблем (скрытой) передачи информации с помощью хаотических сигналов, радиолокация на основе хаотических сигналов, задачи радиопротиводействия и т.д.

Достоверность полученных результатов Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием строго обоснованных математических процедур; твердо установленных физических уравнений; методов и подходов, описанных в научной литературе, апробированных и хорошо себя зарекомендовавших при проведении научных исследований; обоснованным выбором параметров численных расчетов. Достоверность результатов, полученных при проведении экспериментальных исследований обеспечивается использованием высокоточного контрольно-измерительного оборудования (цифровые широкополосные СВЧ анализаторы спектра, цифровой анализатор СВЧ цепей, широкополосный цифровой запоминающий СВЧ осциллограф реального времени) производства компании Agilent Technologies, являющейся одним из лидеров в отрасли по производству контрольно-измерительного и метрологического оборудования. Достоверность полученных результатов подтверждается также их воспроизводимостью, совпадением результатов численного моделирования и экспериментального изучения, а также отсутствием противоречий с известными в научной литературе достоверными общепризнанными результатами.

Личный вклад. Большинство представленных в диссертации результатов получено автором лично. Из работ, выполненных в соавторстве и посвященных решению вышеперечисленных задач, в диссертацию включены положения и результаты, принадлежащие лично соискателю, либо полученные при его непосредственном участии. Выбор направления исследований, фор-

мулировка и постановка задач, проведение теоретических, на основе численного моделирования и экспериментальных исследований, разработка идеологии проведения экспериментальных исследований в СВЧ диапазоне, создание, отладка и настройка уникальной измерительной экспериментальной установки, анализ возможностей применения современного цифрового контрольно-измерительного оборудования, непосредственное проведение экспериментальных исследований в СВЧ диапазоне, расчеты, обработка и интерпретация полученных результатов выполнены либо лично автором, либо совместно с научными руководителями и соавторами научных работ, опубликованных соискателем. Экспериментальные исследования были выполнены совместно с научной группой профессора Жаркова Ю.Д. и профессора Дмитриева Б.С.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы использовались при выполнении госбюджетных и хоздоговорных НИР, проводимых в Научно-образовательном институте “Открытые системы” СГУ, отделении физики нелинейных систем научно-исследовательского института Естественных наук СГУ, проектов Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 01-02-17392-а, 06-02-16451-а, 06-02-81013-Бел_а, 06-02-72007-МНТИ_а, 07-02-12071-офи, 08-02-90002-Бел_а), были поддержаны программой “Университеты России – Фундаментальные исследования” (проекты УР.01.01.371, УР.01.01.051), Федеральной целевой научно-технической программой “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники” на 2002-2006 годы (темы РИ-112/001/240, РИ-19.0/002/224, 2006-РИ-19.0/001/053, 2006-РИ-19.0/001/054, 2006-РИ-112.0/001/228), Президентской Программой поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (2003-2005 и 2006-2007 гг, 2008 год, руководитель ведущей научной школы — чл.-корр. РАН, профессор Д.И. Трубецков), Программой Минобразования Российской Федерации “Развитие научного потенциала высшей школы” (2005 г., подпрограмма 3.3, проект 333), научно-образовательным центром “Нелинейная динамика и биофизика” при Саратовском госуниверситете (грант REC-006 of U.S. Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (CRDF)), Фондом некоммерческих программ “Династия” и Московским Международным Центром Фундаментальной Физики.

Представленные результаты неоднократно докладывались на различных семинарах и конференциях и отражены в тезисах докладов: XII Зимней школе-семинаре по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, январь-февраль 2003 года), I Конференции молодых ученых “Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика” (Саратов, СФ ИРЭ РАН, сентябрь 2006 года), Всероссийской школы-конференции “Нелинейные дни в Саратове для

молодых - 2006” (Саратов, октябрь 2006 года), 16-й Международной Крымской конференции “СВЧ-техника” (Украина, Крым, Севастополь, сентябрь 2006 года), XI Всероссийской научной школе-семинаре “Физика и применение микроволн” (Звенигород, Московская область, 21–26 мая 2007 года), 17-й Международной Крымской конференции “СВЧ-техника” (Украина, Крым, Севастополь, сентябрь 2007 года).

Результаты также неоднократно обсуждались на научном семинаре кафедры электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 статей в реферируемых научных журналах “Известия РАН, Серия физическая”, “Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика”, “Письма в Журнал Технической Физики”, рекомендованных ВАК для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Результаты, полученные в рамках выполнения настоящей диссертационной работы, частично вошли также в материал двухтомной монографии “Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот” (под редакцией Д.И. Трубецкого и А.А. Кураева). Также, по теме диссертации имеется 7 публикаций в трудах конференций.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Каждая глава включает в себя как теоретическую часть, основанную на проведении численных расчетов, так и экспериментальную, основанную на постановке и проведении экспериментальных исследований. Идеология построения каждой главы подчиняется следующей логике. В начале каждой главы кратко описывается современное состояние проблемы, которой посвящена та или иная глава, указываются основные известные результаты, необходимые для понимания дальнейшего материала, указываются ссылки на соответствующие работы и, на основании этого материала, формулируются вопросы и проблемы, решению которых посвящаются остальные разделы главы. Далее следует описание основных численных результатов, полученных в ходе проведения расчетов. После этого следует описание проведенных экспериментальных исследований, которое включает в себя описание экспериментальной установки и основных ее узлов и компонентов, а также используемого контрольно-измерительного оборудования. Приводятся результаты экспериментальных исследований и проводится их сопоставление с численно полученными результатами. В конце каждой главы приводятся основные выводы по изложенному материалу и полученным результатам.

Общий объем диссертации составляет 161 страницу текста, включая 64 рисунка и список использованных источников, содержащий 98 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель работы, описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Введение содержит также положения и результаты, выносимые на защиту и сведения об апробации результатов.

Первая глава диссертационной работы посвящена изложению результатов рассмотрения (как теоретического, на основе численного моделирования, так и экспериментального) автономной динамики СВЧ автогенератора на основе клистронного усилителя с запаздывающей обратной связью. Часть материала, приведенного в настоящей главе была в некоторой степени известна и ранее. Это касается, в первую очередь, теоретической модели автогенератора. Эти данные включены в диссертацию в качестве сведений, необходимых для дальнейшего рассмотрения. При этом доля подобного материала в общем объеме главы относительно невелика. В то же самое время, важно отметить, что, несмотря на то, что клистронный автогенератор с запаздывающей обратной связью уже изучался, использование нового современного контрольно-измерительного оборудования (цифровой анализатор спектра E4402B ESA-E Series Spectrum Analyzers Agilent Technologies (до 3 ГГц), цифровой анализатор СВЧ цепей E5062A ENA Series RF Network Analyzers (Agilent Technologies), цифровой широкополосный запоминающий осциллограф реального времени DSO81004B 80000B Series Infiniium High Performance Oscilloscope (Agilent Technologies) и цифровой широкополосный запоминающий осциллограф реального времени DPO72004 (Tektronix)) позволило осуществить измерения, проведение которых несколько лет назад было просто невозможно. Первый раздел настоящей главы посвящен описанию известной модели клистронного автогенератора³. В частности, приведены уравнения, описывающие динамику двухрезонаторного пролетного клистронного автогенератора с запаздывающей обратной связью.

Второй раздел посвящен экспериментальному исследованию автономной динамики СВЧ автогенератора на основе пятирезонаторного пролетного клистронного усилителя КУ-134Е с запаздывающей обратной связью. Приводится описание экспериментальной установки и используемого контрольно-измерительного оборудования. Далее изложены результаты экспериментального исследования перехода к хаотическим автоколебаниям через каскад бифуркаций удвоения периода клистронного автогенератора. Проведено сопоставление результатов, полученных при численном моделировании и при проведении натурального эксперимента. Отдельно рассмотрена хаотическая динамика клистронного автогенератора. Выявлена и объяснена тонкая структура

³Рыскин Н.М., Шигаев А.М. Журнал Технической Физики. 10 (1) (2006) 72-81; Shigaev A.M., Dmitriev B.S., Zharkov Yu.D., Ryskin N.M. IEEE Transactions on Electron Devices 52 (5) (2005) 790-797

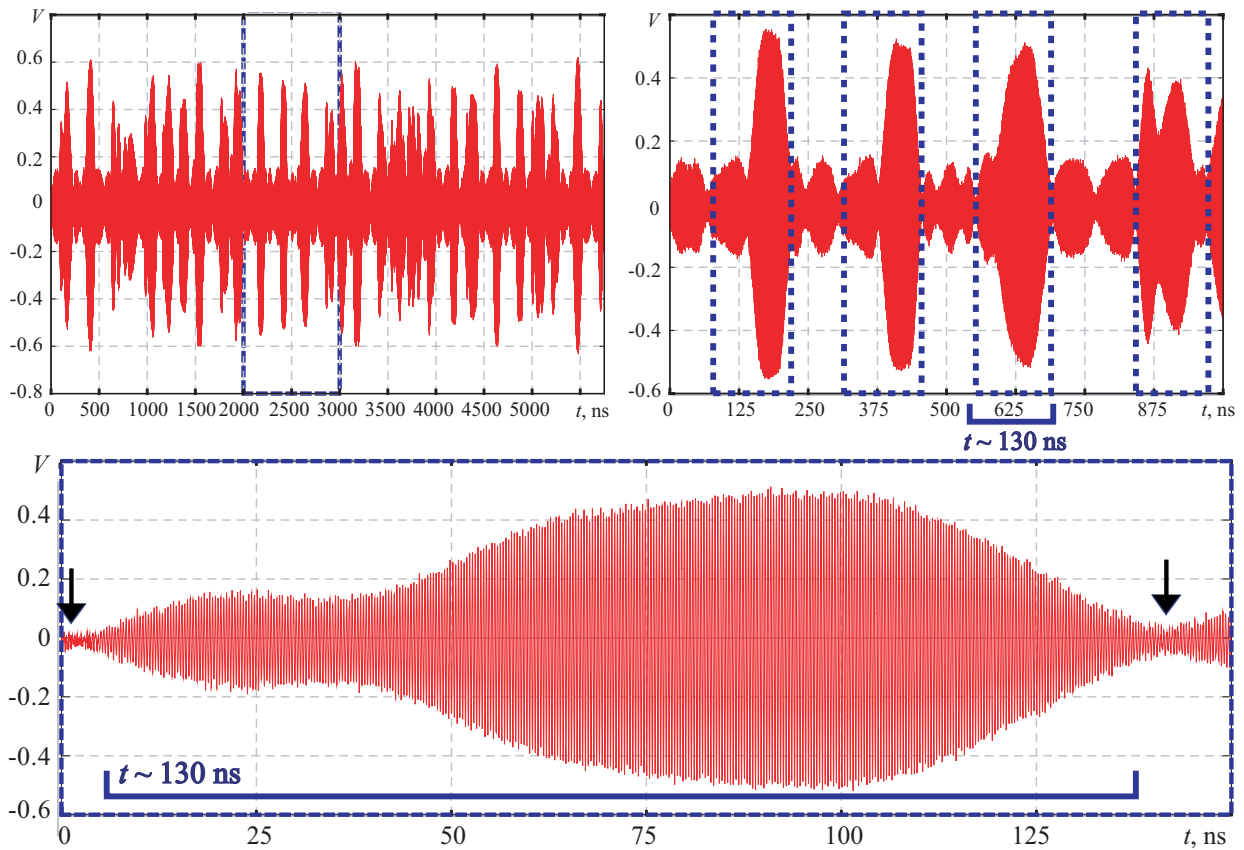


Рис. 1: Хаотическая реализация сигнала клистронного автогенератора, полученная в результате проведения экспериментальных исследований. На рисунке представлены несколько отрезков, которые представляют собой увеличенные фрагменты друг друга. Пунктирными рамками обозначены отрезки временной реализации, длительность которой совпадает с длительностью распространения сигнала по цепи обратной связи клистронного автогенератора.

хаотического сигнала клистронного автогенератора (см. хаотическую реализацию на рисунке 1).

Установлено, что длительность чередующихся резко выраженных всплесков амплитуды сигнала совпадает с длительностью времени запаздывания в цепи обратной связи клистронного автогенератора. Предложен и описан механизм, который объясняет вид полученной хаотической временной реализации сигнала клистронного автогенератора. Установлено, что данный механизм связан с наличием внешней обратной связи и особенностями амплитудной характеристики используемого клистронного усилителя.

Во **второй** главе диссертационной работы рассматривается синхронная динамика клистронных автогенераторов — режим обобщенной синхронизации⁴. Приводится определение режима обобщенной синхронизации и описываются его основные особенности и отличия от других режимов синхронного

⁴Rulkov N.F., Sushchik M.M., Tsimring L.S., Abarbanel H.D.I. Phys. Rev. E. 51 (2) (1995) 980-994

поведения. Далее кратко излагаются известные и хорошо зарекомендовавшие себя методы диагностики режима обобщенной синхронизации, используемые при численном исследовании и при экспериментальном изучении синхронизации низкочастотных радиофизических схем: метод вспомогательной системы⁵, метод расчета условных ляпуновских экспонент⁶, метод ближайших соседей⁷. Обсуждаются возможные трудности диагностики режима обобщенной хаотической синхронизации при проведении экспериментальных исследований в СВЧ диапазоне.

В этой главе приводятся также результаты построения модели системы однонаправленно связанных клистронных автогенераторов на основе модели автономного клистронного усилителя с запаздывающей обратной связью, описанной в первой главе диссертационной работы. С помощью метода вспомогательной системы осуществляется диагностика режима обобщенной хаотической синхронизации. На основе рассмотрения динамики величины амплитуды первой гармоники сгруппированного тока в ведомом клистронном автогенераторе в зависимости от параметра связи между ведущим и ведомым автогенераторами выявлен механизм установления режима обобщенной синхронизации. Детально рассматриваются два типа связи между однонаправленно связанными клистронными автогенераторами: недиссипативная и диссипативная.

В этой же главе приведены результаты экспериментального исследования явления обобщенной синхронизации. Описана экспериментальная установка по исследованию синхронных режимов связанных клистронных автогенераторов и используемое контрольно-измерительное оборудование. Приведено описание экспериментальной реализации диссипативной связи в СВЧ диапазоне между СВЧ автогенераторами. Для диагностики режима обобщенной синхронизации использован метод ближайших соседей. Приведено описание метода ближайших соседей. Поскольку клистронный автогенератор вследствие наличия запаздывающей обратной связи представляет собой систему с запаздыванием, то состояние клистронного автогенератора характеризует не точка на оцифрованной временной реализации, а временная реализация с длительностью, равной времени запаздывания в цепи обратной связи. Последнее потребовало модифицировать метод ближайших соседей. Для наиболее эффективного использования метода ближайших соседей в качестве опорного участка (относительно которого производится поиск ближайших участков — “ближайших соседей”) на аттракторе желательно выбрать наиболее часто посещаемый участок на аттракторе⁸. Приведены результаты при-

⁵Abarbanel H.D.I., Rulkov N.F., Sushchik M.M. Phys. Rev. E. 53 (5) (1996) 4528-4535

⁶Pyragas K. Phys. Rev. E. 56 (5) (1997) 5183-5188

⁷Pecora L.M., Carroll T.L., Heagy J.F. Phys. Rev. E. 52 (4) (1995) 3420-3439

⁸Как показали исследования, проведенные на примере двумерной динамической системы с дискрет-

менения метода ближайших соседей для диагностики явления обобщенной синхронизации в однонаправленно связанных клистронных автогенераторах с запаздывающей обратной связью. Показано, что полученные результаты находятся в хорошем качественном соотношении с результатами, полученными ранее при проведении экспериментальных исследований с радиотехническими автогенераторами и общепринятыми теоретическими представлениями об особенностях режима обобщенной хаотической синхронизации и механизмах, приводящих к его установлению.

Третья глава диссертации посвящена разработке оригинального метода диагностики явления обобщенной синхронизации, который может быть использован для анализа режимов колебаний в диапазоне сверхвысоких частот, поскольку стандартные методы диагностики этого синхронного режима обладают рядом недостатков и становятся критичными при проведении исследований в этом сверхвысокочастотном диапазоне. Предложенный метод основан на анализе динамики изменения спектрального состава ведомой системы при изменении параметра связи между взаимодействующими хаотическими автогенераторами.

В первом разделе главы рассматриваются предпосылки к разработке данного метода и формулируется сам метод, который заключается в следующем. Известно, что одной из важнейших и неотъемлемых характеристик сигнала является его спектральный состав. По спектральному составу сигнала можно определить характер динамики исследуемой системы, выявить момент смены режимов, судить о мощности анализируемого сигнала и т.д. При проведении экспериментальных исследований одним из важнейших элементов контрольно-измерительной схемы выступает анализатор спектра. В настоящее время существует достаточно широкий выбор цифровых анализаторов спектра (Tektronix, Agilent Technologies и т.д.), которые легко позволяют исследовать спектральный состав сигналов (производить оцифровку спектра мощности исследуемого сигнала и его передачу на персональный компьютер) в широком диапазоне частот, в том числе и в СВЧ диапазоне. С другой стороны, известно, что спектральный состав сигнала также может быть использован как эффективное средство при исследовании и диагностики явления хаотической синхронизации⁹. Можно предположить, что поскольку динамика ведомой системы при установлении режима обобщенной синхронизации

ным временем, существуют участки хаотического аттрактора, которые посещаются наиболее часто, и существуют участки аттрактора, которые статистически посещаются редко. Полученные выводы были использованы при разработке модификации метода ближайших соседей для случая исследования систем с запаздывающей обратной связью.

⁹Shabunin A., Astakhov V., Kurths J. Phys. Rev. E. 72 (1) (2005) 016218; Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K., Moskalenko O.I. Phys. Rev. E. 71 (5) (2005) 056204

изменяется кардинально¹⁰, то подобное изменение должно наблюдаться и в спектральном составе сигнала ведомой системы. Именно на анализе изменений происходящих в спектре мощности ведомой системы при изменении параметра связи и основан предлагаемый метод диагностики явления обобщенной хаотической синхронизации. Для диагностики изменений в спектральном составе динамики ведомой системы (ведомого СВЧ автогенератора) при изменении величины связи ε между ведущей и ведомой системами предлагается анализировать изменения спектрального состава при изменении параметра связи между системами:

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{1}{P^d} \int_0^{\infty} \left(\frac{\partial S^r(f, \varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right)^2 df, \quad (1)$$

где $P^d = \int_0^{\infty} (S^d(f))^2 df$, где $S^d(f)$ — амплитудный спектр сигнала ведущей системы.

Предложенная безразмерная величина характеризует изменение спектрального состава сигнала ведомой системы при варьировании параметра связи между системами. Можно ожидать, что пока динамика системы не меняется кардинально, предложенная характеристика не будет претерпевать резких изменений. При наступлении режима обобщенной синхронизации динамика ведомой системы претерпевает значительные изменения¹¹, которые, несомненно, сказываются и на спектральном составе сигнала ведомой системы. Следовательно, можно ожидать, что и поведение предложенной характеристики в момент наступления режима обобщенной синхронизации резко изменится.

Апробация разработанного метода была осуществлена сначала на хорошо изученных модельных и эталонных системах нелинейной динамики — связанных системах Ресслера и Лоренца. Полученные результаты применения разработанного метода находятся в хорошем качественном и количественном соответствии с полученными результатами во второй главе диссертационной работы. После того, как доказана работоспособность разработанного метода, он применен к модели системы однонаправленно связанных клистронных автогенераторов, которая была построена во второй главе. Рассматривались два типа связи: недиссипативная и диссипативная. Показано, что результат диагностики режима обобщенной синхронизации в модели системы однонаправленно связанных клистронных автогенераторах с использованием разработанной методики находится в хорошем качественном и количественном

¹⁰Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. ЖТФ 76 (2) (2006) 1-9

¹¹Нграмов А.Е., Koronovskii A.A. Phys. Rev. E. 71 (6) (2005) 067201

соответствии с результатом, полученным во второй главе, где диагностика производилась с использованием метода ближайших соседей, модифицированного для систем с запаздыванием.

Далее приведены результаты применения разработанного метода к данным, полученным в результате экспериментального исследования явления обобщенной синхронизации в системе однонаправленно связанных СВЧ автогенераторов на основе пятирезонаторных пролетных клистронных усилителей с запаздывающей обратной связью. В главе приводится описание экспериментальной установки, используемого контрольно-измерительного оборудования и метода проведения эксперимента. Показано, что результаты применения разработанного метода к экспериментальным данным находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными на основе численного моделирования, а также с результатами экспериментального исследования режима обобщенной синхронизации с помощью метода ближайших соседей, изложенными во второй главе настоящей диссертационной работы. Подчеркнуто, что достоинством разработанного метода является легкость его применения при проведении экспериментальных исследований и диагностики явления хаотической синхронизации в СВЧ диапазоне, хотя данный метод может быть с успехом применен и для низкочастотных колебаний. Указано также, что предложенный метод может быть использован и для анализа поведения дискретных динамических систем, полученных из динамических систем с потоковым временем путем проведения процедуры сечения Пуанкаре.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации и намечены направления дальнейших исследований в данном направлении.

Основные выводы, результаты и положения, выносимые на защиту.

1. В однонаправленно связанных клистронных автогенераторах (ведомом и ведущем) в результате реализации механизма подавления собственной хаотической динамики в ведомом клистронном автогенераторе имеет место обобщенная хаотическая синхронизация, которая заключается в установлении функциональной зависимости между состояниями связанных клистронных автогенераторов.
2. Экспериментально выявлена тонкая структура хаотического сигнала клистронного автогенератора (под тонкой структурой понимается последовательность всплесков амплитуды сверхвысокочастотного сигнала, длительность которых определяется временем запаздывания в цепи обратной связи). Вид и структура экспериментально полученного хаотического сигнала объясняется наличием внешней обратной связи клистрон-

ного автогенератора, а также особенностями амплитудной характеристики клистронного усилителя.

3. Создана многофункциональная экспериментальная установка, которая включает в себя современное контрольно-измерительное оборудование и позволяет детально исследовать явления синхронизации в связанных клистронных автогенераторах с запаздывающей обратной связью. Экспериментально в СВЧ диапазоне реализованы два типа связи: недиссипативная и диссипативная.
4. Экспериментально, с использованием метода ближайших соседей доказано существование явления обобщенной синхронизации в однонаправленно связанных СВЧ автогенераторах на основе клистронных усилителей с запаздывающей обратной связью.
5. Изменение спектрального состава ведомой колебательной системы может быть использовано для диагностики явления обобщенной хаотической синхронизации и, в частности, для определения величины параметра связи между автогенераторами, соответствующего возникновению синхронизации.
6. На основе положения 5 предложен и разработан оригинальный метод диагностики явления обобщенной хаотической синхронизации, основанный на анализе динамики изменения спектрального состава сигнала ведомой автоколебательной системы. Продемонстрировано применение разработанного метода как к модельным эталонным системам нелинейной динамики (связанные системы Ресслера, Лоренца) и к численной модели однонаправленно связанных клистронных автогенераторов, так и к данным, полученным в результате проведения натуральных экспериментов. Показано хорошее качественное соответствие полученных результатов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] А. А. Короновский, А. Е. Храмов, О. И. Москаленко, П. В. Попов, Р. А. Филатов, А. В. Стародубов, Б. С. Дмитриев, Ю. Д. Жарков, Обобщенная хаотическая синхронизация в диапазоне сверхвысоких частот, Гл. 9 коллективной двухтомной монографии “Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот” Т. 2 (под редакцией Д.И. Трубецкого, А.Е. Храмова, А.А. Короновского). Физматлит. Москва. 2008.
- [2] Стародубов А.В. Явление обобщенной синхронизации в клистронных генераторах хаоса с запаздывающей обратной связью (эксперимент и численное моделирование) / А.В. Стародубов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Ю.Д. Жарков, Б.С. Дмитриев, В.Н. Скороходов // Известия РАН. Серия физическая. 2008.— Т.72.— N.1.— с. 148—152.
- [3] Стародубов А.В. Исследование обобщенной синхронизации в системе двух связанных клистронных автогенераторов хаоса / А.В. Стародубов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Ю.Д. Жарков, Б.С. Дмитриев // Письма в ЖТФ. 2007.— Т.33.— N.14.— с. 58—66.
- [4] Короновский А.А. Взаимосвязь спектров, полученных по временным реализациям системы с потоковым временем и её отображениям возврата / А.А. Короновский, А.Е. Храмова, А.В. Стародубов // Письма в ЖТФ. 2006.— Т.32.— N.19.— с. 86—94.
- [5] Короновский А.А. Методика определения длительности переходного процесса для динамических систем, находящихся в режиме хаотических колебаний / А.А. Короновский, А.В. Стародубов, А.Е. Храмов // Письма в ЖТФ. 2003.— Т.29.— N.8.— с. 32—40.
- [6] Короновский А.А. Методика определения длительности переходного процесса для динамической системы с дискретным временем, находящейся в режиме хаотических колебаний / А.А. Короновский, А.В. Стародубов, А.Е. Храмов // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2002.— Т.10.— N.5.— с. 25—31.
- [7] Стародубов А.В. Исследование обобщенной хаотической синхронизации в автогенераторах СВЧ диапазона на основе клистронных усилителей / А.В. Стародубов // VIII Международная школа “Хаотические автоколебания и образование структур” ХАОС-2007. Материалы школы. 2007.— с. 91—92.
- [8] Короновский А.А. Экспериментальное и теоретическое исследование явления обобщенной синхронизации в клистронных автогенераторах хаоса / А.А. Короновский, А.В. Стародубов, А.Е. Храмов, Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков // 17-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. Украина. Севастополь, 10–14 сентября 2007 г.: Материалы конференции, Севастополь: “Вебер”. 2007.— с. 609—611.
- [9] Стародубов А.В. Явление обобщенной синхронизации в автогенераторах хаоса свч диапазона (эксперимент и теория) / А.А. Короновский, А.В. Стародубов, А.Е. Храмов, Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков // Труды школы-семинара “Волны 2007”. МГУ. 2007.— с. 8–11.

- [10] Стародубов А.В. Явление обобщенной синхронизации в системе однонаправленно связанных клистронных генераторов хаоса / А.В. Стародубов // Сборник докладов конференции “Нелинейные дни в Саратове для молодых - 2006”. РИО журнала “Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика”. 2007. — с. 174—178.
- [11] Стародубов А.В. Обобщенная хаотическая синхронизация в системе связанных клистронных автогенераторов / А.В. Стародубов // I Конференция молодых ученых “Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика”. Материалы конференции. Саратовский филиал ИРЭ РАН. 2006.— с. 71—72.
- [12] Стародубов А.В. Явление обобщенной синхронизации в моделях клистронных генераторов хаоса СВЧ-диапазона / А.А. Короновский, А.В. Стародубов, А.Е. Храмов, Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков // 16-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. Украина. Севастополь. 11–15 сентября 2006 г.: Материалы конференции, Севастополь: “Вебер”, 2006.— с. 699—700.
- [13] Астафьев Г.Б. Анализ мультистабильности и переходных процессов в эталонных моделях нелинейной динамики и некоторых распределенных системах электронно-плазменной природы со сверхкритическим током. / Г.Б. Астафьев, Е.Н. Егоров, А.А. Короновский, А.В. Стародубов, А.Е. Храмов и др. // Материалы XII зимней школы-семинара по СВЧ электронике и радиофизике. Саратов, Изд-во ГосУНЦ “Колледж”. 2003.— с. 50—51.

СТАРОДУБОВ Андрей Викторович

ХАОС И ХАОТИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ
В СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРАХ
НА ОСНОВЕ КЛИСТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ
(ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ)

Автореферат

Подписано к печати 03.10.2008 Формат 60 × 84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура “Times”
Усл. печ. л. 1,39 (1,5). Тираж 120 экз. Заказ 193-Т.

Отпечатано с готового оригинал-макета
Типография СГУ.
410012, Саратов, Большая Казачья, 112а, корпус 8.