

На правах рукописи

МОСКАЛЕНКО Ольга Игоревна

ХАОТИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ (РАЗЛИЧНЫЕ
МЕХАНИЗМЫ И ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ СКРЫТОЙ
ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ)

01.04.03 – Радиофизика

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 кафедре нелинейной физики факультета нелинейных процессов и в отделении физики нелинейных систем научно-исследовательского института естественных наук Саратовского государственного университета.

Научный руководитель: д.ф.–м.н., доцент
Короновский Алексей Александрович

Официальные оппоненты: д.ф.–м.н., профессор
Пономаренко Валерий Павлович,
к.ф.–м.н., доцент
Павлов Алексей Николаевич,

Ведущая организация: Саратовский филиал института
радиотехники и электроники
Российской Академии Наук, г. Саратов

Защита состоится “22” мая 2008 г. в 15 часов 30 минут в 34 ауд. III корпуса СГУ на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 по специальности 01.04.03 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 “15” апреля 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



В.М. Аникин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследуемой проблемы. Изучение сложного поведения сосредоточенных и распределенных систем различной природы представляет собой актуальную задачу современных исследований в области радиофизики, нелинейной динамики и теории колебаний и волн. Одним из центральных моментов при этом является анализ неавтономной динамики нелинейных систем, способных демонстрировать сложное поведение, прежде всего, проблем, связанных с исследованием синхронизации, берущих свое начало еще с работ Христиана Гюйгенса.

Трудами многих исследователей (В.И. Гапонова, Б. Ван дер Поля, А.А. Андропова, А.А. Витта, К.К. Теодорчика, Р.В. Хохлова, И.И. Блехмана и многих других) была создана стройная теория синхронизации периодических автоколебаний. С появлением и бурным развитием теории динамического хаоса, изучение синхронного поведения автоколебательных систем получило новое развитие. Начиная с 90-х годов XX века синхронизация нелинейных систем, находящихся в режимах динамического хаоса, привлекает к себе пристальное внимание все большего числа исследователей (В.С. Анищенко, В.В. Астахов, В.С. Афраймович, Б.П. Безручко, В.Н. Белых, Т.Е. Вадивасова, А.С. Дмитриев, В.Б. Казанцев, А.А. Короновский, С.П. Кузнецов, П.С. Ланда, В. Линдсей, В.В. Матросов, В.И. Некоркин, Г.В. Осипов, А.Н. Павлов, А.И. Панас, В.И. Пономаренко, В.П. Пономаренко, Д.Э. Постнов, М.Д. Прохоров, М.И. Рабинович, Н.Ф. Рульков, Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, В.Д. Шалфеев, H.D. 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.), работающих в области радиофизики, о чем свидетельствует значительный рост научных публикаций по данной тематике.

Интерес к этой проблеме связан как с большим фундаментальным значением ее исследования¹, так и широкими практическими приложениями, например, при скрытой передаче информации², в биологических, физиологических и химических задачах³, при управлении хаосом, в том числе в системах СВЧ электроники⁴ и т.д.

¹А.С. Пиковский, М.Г. Розенблюм, Ю. Куртс, Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление, М.: Техносфера, 2003.

²А.С. Дмитриев, А.И. Панас, Динамический хаос: новые носители информации для систем связи, М.: Физматлит, 2002.

³L. Glass, Nature (London) 410 (2001) 277-284; O.V. Sosnovtseva, A.N. Pavlov, E. Mosekilde, N.-H. Holstein-Rathlou, Phys. Rev. E 66 (6) (2002) 061909; M.D. Prokhorov, V.I. Ponomarenko, V.I. Gridnev, M.V. Bodrov, A.V. Bespyatov, Phys. Rev. E 68 (2003) 041913.

⁴С.М. Тисос, Е. Роза, W.B. Пардо, J.A. Walkenstein, М. Монти, Phys. Rev. Lett. 85 (14) (2000) 2929; Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, Радиотехника и электроника 48 (1) (2003) 116-124.

В то же самое время, несмотря на обширное число публикаций как в отечественной, так и зарубежной литературе, ряд вопросов, связанных с исследованием синхронного поведения до сих пор остается открытым. Изложению результатов исследования некоторых из них и посвящена настоящая диссертационная работа.

Одной из задач, требующих серьезного изучения, является выявление взаимосвязи между известными типами хаотической синхронизации. Этой проблеме в последнее время уделяется значительное внимание исследователей. В частности, установлено, что связанные хаотические системы с увеличением силы связи между ними способны переходить от режима фазовой синхронизации к режиму синхронизации с запаздыванием с последующей тенденцией к режиму полной синхронизации⁵. Предложен также общий подход к анализу различных типов синхронного поведения с точки зрения синхронизации временных масштабов⁶. Согласно этому подходу характер синхронного режима определяется количеством синхронизованных временных масштабов, вводимых в рассмотрение при помощи непрерывного вейвлетного преобразования.

При описании поведения нелинейных автоколебательных систем также широко используется спектральный подход, основанный на преобразовании Фурье. Поскольку существует взаимосвязь между вейвлетным и фурье-преобразованиями, можно ожидать, что в случае хаотической синхронизации должна происходить синхронизация спектральных компонент фурье-спектров взаимодействующих автоколебательных систем. Поэтому весьма интересным представляется вопрос об исследовании различных типов хаотической синхронизации на языке спектральных компонент и выявлении взаимосвязи между ними.

Следует отметить, что при исследовании отдельных типов синхронного поведения, ряд вопросов также остается невыясненным. Например, такие вопросы существуют для обобщенной синхронизации однонаправленно связанных хаотических систем. Этот тип синхронного поведения явным образом выделяется среди других типов хаотической синхронизации. В частности, он может наблюдаться как в одинаковых системах со слегка различающимися параметрами, так и в совершенно разных системах, даже с различной размерностью фазового пространства⁷.

В литературе обсуждается вопрос о взаимосвязи режима обобщенной синхронизации с другими типами синхронного поведения. В частности,

⁵М.Г. Rosenblum, А.С. Pikovsky, J. Kurths, Phys. Rev. Lett. 78 (22) (1997) 4193-4196

⁶А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Письма в ЖЭТФ 79 (7) (2004) 391-395; А.Е. Храмов, А.А. Koronovskii, Physica D 206 (3-4) (2005) 252-264.

⁷К. Pyragas, Phys. Rev. E 54 (5) (1996) R4508-R4511.

установлено, что режимы полной синхронизации и синхронизации с запаздыванием однонаправленно связанных хаотических систем являются частными случаями обобщенной синхронизации. В то же самое время, вопрос о ее взаимосвязи с фазовой синхронизацией является далеко не очевидным. Изначально полагалось, что режим обобщенной синхронизации является более сильным типом синхронного поведения нежели фазовая, то есть если в системе имеет место режим обобщенной синхронизации, обязательно должна наблюдаться и фазовая синхронизация⁸. Позднее было установлено, что обобщенная синхронизация может возникать как до, так и после установления режима фазовой синхронизации, в зависимости от расстройки управляющих параметров взаимодействующих хаотических систем⁹. Более того, для ряда систем значение параметра связи, соответствующее порогу возникновения режима обобщенной синхронизации, при малых расстройках значительно превосходит аналогичный параметр в случае больших расстройек взаимодействующих систем, в то время как для всех остальных типов синхронного поведения ситуация диаметрально противоположная. Выявление причин аномального поведения порога возникновения обобщенной синхронизации, а также физических механизмов, приводящих к установлению синхронного режима, требует дальнейшего рассмотрения.

Наконец, важной задачей является практическое использование явления хаотической синхронизации, в частности, для скрытой передачи информации². Однако, все известные в настоящее время способы характеризуются рядом существенных недостатков и трудностей при технической реализации¹⁰. Поэтому разработка новых методов скрытой передачи данных, позволяющих избавиться от ряда недостатков, свойственных известным схемам и устройствам, является актуальной задачей радиофизики. Разработке новых методов скрытой передачи информации на основе обобщенной синхронизации также посвящена часть настоящей диссертационной работы.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что круг вопросов, требующих дальнейших исследований в области хаотической синхронизации и ее возможных приложений, достаточно широк, а тема диссертационной работы является актуальной и важной для радиофизики, нелинейной динамики и современной теории нелинейных колебаний.

Цель диссертационной работы. Целью настоящей диссертационной

⁸U. Parlitz, L. Junge, W. Lauterborn, Phys. Rev. E 54 (2) (1996) 2115-2117.

⁹Z. Zheng, G. Hu, Phys. Rev. E 62 (6) (2000) 7882-7885.

¹⁰T. Yang, International Journal of Computational Cognition 2 (2) (2004) 81-130

работы является детальное изучение различных типов синхронного поведения нелинейных автоколебательных систем, демонстрирующих хаотическую динамику, выявление их характерных особенностей, механизмов возникновения и взаимосвязи между ними, а также исследование возможности их применения для скрытой передачи информации.

Основными вопросами, подробно рассмотренными в диссертационной работе, являются следующие:

- выявление взаимосвязи между различными типами синхронного поведения в однонаправленно и взаимно связанных автоколебательных системах с малым числом степеней свободы с позиций синхронизации спектральных компонент фурье–спектров взаимодействующих хаотических систем;
- исследование фазовых соотношений между гармониками автоколебательных систем (в частности, между первой и второй гармониками автоколебаний) при переходе от асинхронного режима к синхронному;
- рассмотрение особенностей возникновения режима фазовой синхронизации в случае воздействия внешнего хаотического сигнала на систему с периодической динамикой;
- механизмы возникновения режима обобщенной синхронизации в системах с непрерывным и дискретным временем;
- взаимосвязь обобщенной синхронизации с другими типами синхронного поведения;
- использование режимов обобщенной синхронизации и синхронизации, индуцированной шумом, для скрытой передачи информации.

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, позволяют понять общие закономерности синхронного поведения нелинейных динамических систем, демонстрирующих хаотическую динамику, что делает возможным рассмотрение различных типов хаотической синхронизации с единой точки зрения.

Научная новизна. Научная новизна результатов, представленных в диссертационной работе, заключается в установлении общих закономерностей различных типов синхронного поведения связанных хаотических систем, выявлении механизмов их возникновения в автоколебательных системах с малым числом степеней свободы и выработке универсальных подходов к их анализу.

Впервые получены следующие научные результаты:

- предложен новый подход к рассмотрению различных типов синхронного поведения, связанный с синхронизацией спектральных компонент фурье–спектров взаимодействующих систем;
- обнаружен универсальный степенной закон зависимости временного сдвига между основными частотными компонентами от параметра связи;
- аналитически выявлена роль учета второй гармоники автоколебаний при исследовании синхронизации, показано, что переход из несинхронной области в область синхронизации связан с изменением поведения разности фаз между первой и второй гармониками автоколебаний;
- исследован переход к режиму фазовой синхронизации в случае воздействия внешнего хаотического сигнала на систему с периодической динамикой; установлено, что в этом случае имеет место тот же самый сценарий, что и в случае взаимодействия двух связанных хаотических осцилляторов;
- предложен метод модифицированной системы для выявления механизмов возникновения режима обобщенной синхронизации в диссипативно связанных динамических системах; при помощи этого метода объяснены причины “аномального” поведения границы обобщенной синхронизации на плоскости параметров “частота расстройки — интенсивность связи” и выявлены физические механизмы установления синхронного режима при больших и малых значениях частотной расстройки;
- исследована взаимосвязь режимов обобщенной синхронизации и синхронизации, индуцированной шумом; показано, что эти два типа синхронного поведения обусловлены одной и той же причиной, связанной с подавлением собственной хаотической динамики при помощи дополнительного введения диссипации, и могут быть рассмотрены как единый тип синхронного поведения связанных хаотических систем;
- предложены способы скрытой передачи информации, основанные на режимах обобщенной синхронизации и синхронизации, индуцированной шумом, обладающие рядом принципиальных достоинств по сравнению с известными аналогами.

Личный вклад. Основная часть представленных в диссертации результатов получена лично автором. В большинстве совместных работ автором выполнены все численные и аналитические расчеты. Постановка задач,

разработка методов их решения, объяснение и интерпретация результатов были осуществлены либо лично автором, либо совместно с научным руководителем и другими соавторами научных работ, опубликованных соискателем.

Научная и практическая значимость работы. Диссертационная работа решает научную задачу, имеющую существенное значение для радиопизики, нелинейной динамики и современной теории колебаний и волн, связанную с выявлением общих закономерностей синхронного поведения в нелинейных автоколебательных системах. В большинстве случаев исследование проводилось на примере эталонных моделей нелинейной динамики, демонстрирующих периодическую (автогенератор Ван дер Поля) и хаотическую (системы Ресслера, Лоренца, Ван дер Поля–Дуффинга с 1.5 степенями свободы, логистические отображения) динамику. Так как все рассмотренные модели по своей сути являются базовыми, результаты, полученные в рамках диссертационной работы, имеют общий характер и могут быть распространены на системы различной природы (радиофизической, биологической, физиологической и т.д.). Полученные результаты позволяют продвинуться в понимании общих закономерностей синхронного поведения связанных динамических систем, выявить механизмы их возникновения и обнаружить тесную взаимосвязь между ними. В частности, предложенная концепция синхронизации спектральных компонент, позволяющая адекватно диагностировать синхронный режим в то время, когда традиционными методами сделать это не представляется возможным (системы с фазово–некогерентным аттрактором), может найти широкое применение в науке и технике.

Правильное понимание механизмов установления различных типов синхронного поведения (в частности, обобщенной и полной синхронизации), позволило объяснить причины возникновения различного рода недостатков и трудностей при технической реализации разных способов скрытой передачи информации. Более того, выявленные в рамках диссертационной работы механизмы возникновения режимов обобщенной синхронизации и синхронизации, индуцированной шумом, сходство между ними, а также возможность диагностирования одинаковыми способами, позволило предложить на их основе новые способы скрытой передачи информации, лишенные ряда недостатков, присущих известным схемам и устройствам аналогичного назначения. В частности, предложенные способы позволяют избавиться от необходимости наличия в высокой степени идентичных генераторов на различных сторонах канала связи, повысить их устойчивость к шумам и флуктуациям, неизбежно присутствующим в каналах связи реальных устройств, увеличить конфиденциальность. Последнее достигается

благодаря впервые выявленной в рамках настоящей диссертационной работы конструктивной роли шума при передаче информации. По результатам проведенных исследований получены патенты Российской Федерации, а также подана заявка на изобретение.

Результаты, изложенные в диссертационной работе, внедрены в учебный процесс по подготовке специалистов по специальностям “Радиофизика и электроника”, “Физика открытых нелинейных систем”, а также по направлению подготовки бакалавров и магистров “Радиофизика” в ГОУ ВПО “Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского”. Результаты, полученные в рамках выполнения настоящей диссертационной работы, частично вошли в главу монографии “Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот”, принятой к печати издательством “Физматлит” (Москва) в 2008 году.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием строгих математических процедур; твердо установленных уравнений, описывающих физические процессы; общепризнанных методов и подходов, апробированных на различных системах и хорошо зарекомендовавших себя при проведении научных исследований; обоснованным выбором параметров численных методов. Достоверность полученных результатов подтверждается их воспроизводимостью, сопоставлением аналитически и численно полученных результатов, совпадением результатов при использовании различных методов диагностики колебательных режимов, а также отсутствием противоречий с известными в научной литературе достоверными общепризнанными результатами.

Апробация результатов и публикации. Диссертационная работа выполнена на кафедре электроники, колебаний и волн и кафедре нелинейной физики факультета нелинейных процессов, а также в лаборатории “Физика нелинейных явлений” отделения физики нелинейных систем научно-исследовательского института естественных наук (ОФНС НИИ ЕН СГУ) ГОУ ВПО “Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”.

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении научно-исследовательских работ по грантам Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проекты 05-02-16273-а, 06-02-81013-Бел_а, 07-02-00639-а, 08-02-00102-а), Федеральной целевой научно-технической программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники” на 2005-2006 годы (2006-РИ-19.0/001/053, 2006-РИ-19.0/001/054, 2006-РИ-112.0/001/228), Президентской Программы поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (2003-2005 и 2006-2007 гг, руководитель ведущей научной

школы — чл.-корр. РАН, профессор Д.И. Трубецков), Программы Минобразования Российской Федерации “Развитие научного потенциала высшей школы” (2005 г., проекты 332, 333), научно-образовательного центра “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)), Фонда некоммерческих программ “Династия” и Московского Международного Центра Фундаментальной Физики (среди студентов — 2005–2006 гг., среди аспирантов и молодых ученых без степени — с 2007 г.), Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (программа У.М.Н.И.К. Государственный контракт №5346 р/7763 от 16 августа 2007 г.).

Представленные результаты неоднократно докладывались на различных научных конференциях и семинарах и отражены в тезисах докладов: IX Всероссийской научной школе–семинаре “Волновые явления в неоднородных средах (Волны–2004)” (Звенигород, май 2004), VII Международной школе–семинаре “Хаотические автоколебания и образование структур (ХАОС–2004)” (Саратов, октябрь 2004), XII Всероссийской научной школе–конференции “Нелинейные дни в Саратове для молодых — 2004” (Саратов, ноябрь 2004), Международной школе–семинаре по фундаментальной физике для молодых ученых “Квантовые измерения и физика мезоскопических систем” (Владимир, февраль 2005), X Всероссийской школе–семинаре “Физика и применение микроволн (Волны–2005)” (Звенигород, май 2005), III Международной конференции “Фундментальные проблемы физики” (Казань, июнь 2005), Второй летней научной школе Фонда некоммерческих программ “Династия” (Москва, июль 2005), International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics (NWP-2005)”, Nonlinear Dynamics: Theory and Applications (St.-Petersburg — Nizhny Novgorod, August 2005), XV Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные системы” (Севастополь, сентябрь 2005), VII Всероссийской научной конференции “Нелинейные колебания механических систем” (Нижний Новгород, сентябрь 2005), XIII Всероссийской научной школе–конференции “Нелинейные дни в Саратове для молодых — 2005” (Саратов, ноябрь 2005), XIII зимней школе–семинаре по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, февраль 2006), XIII научной школе “Нелинейные волны — 2006” (Нижний Новгород, март 2006), X Всероссийской научной школе–семинаре “Волновые явления в неоднородных средах (Волны–2006)” (Звенигород, май 2006), International Seminar and Workshop on Constructive Role of Noise in Complex Systems (Dresden, Germany, June–July 2006), I конференции молодых ученых “Наноэлектро-

ника, нанофотоника и нелинейная физика” (Саратов, сентябрь 2006), XIV Всероссийской научной школе–конференции “Нелинейные дни в Саратове для молодых — 2006” (Саратов, ноябрь 2006), XI Всероссийской научной школе–семинаре “Физика и применение микроволн (Волны–2007)” (Звенигород, май 2007), Второй международной научной школе “Наука и инновации — 2007” (Йошкар–Ола, июль 2007), XVII Международной Крымской конференции “СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии” (Севастополь, сентябрь 2007), VII Международной школе “Хаотические автоколебания и образование структур (ХАОС–2007)” (Саратов, октябрь 2007), XIV научной школе “Нелинейные волны — 2008” (Нижний Новгород, март 2008). Всего 24 публикации в трудах конференций. Результаты, изложенные в диссертационной работе, неоднократно обсуждались на научных семинарах кафедры электроники, колебаний и волн и нелинейной физики факультета нелинейных процессов СГУ.

Результаты работы опубликованы в центральных реферируемых научных журналах, таких как “Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики”, “Радиотехника и электроника”, “Доклады Академии Наук”, “Журнал технической физики”, “Письма в журнал технической физики”, “Известия РАН. Серия физическая”, “Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика”, “Электромагнитные волны и электронные системы”, “Physical Review E”, “Europhysics Letters”, “Physics Letters A” (всего 15 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук). По материалам диссертации получено 2 патента Российской Федерации и подана одна заявка на изобретение. Результаты третьей главы частично вошли в девятую главу второго тома коллективной двухтомной монографии “Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот”.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Она содержит 214 страниц текста, включая 54 иллюстрации и 1 таблицу. Список литературы содержит 266 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава диссертационной работы посвящена изложению результатов исследования известных типов хаотической синхронизации с позиции

синхронизации спектральных компонент фурье–спектров взаимодействующих систем. В начале главы дается подробное описание известных типов синхронного поведения и способов их диагностики, обсуждаются вопросы и проблемы, возникающие при исследовании каждого из них в отдельности, излагаются основы предложенной ранее концепции синхронизации временных масштабов, позволяющей описывать различные типы хаотической синхронизации с единых позиций. Дальнейшее изложение главы посвящено новому подходу к анализу хаотической синхронизации, тесно связанному с синхронизацией временных масштабов и, по сути дела, “вытекающему” из нее — синхронизации спектральных компонент.

Согласно этому подходу, для каждой спектральной компоненты f фурье–спектров $S_{1,2}(f)$ взаимодействующих динамических систем, характеризующихся векторами состояния $\mathbf{x}_{1,2}(t)$, вводятся в рассмотрение мгновенные фазы

$$\phi_{f1,2}(t) = \phi_{f01,2} + 2\pi ft. \quad (1)$$

В режиме синхронизации с запаздыванием фурье–спектры этих систем связаны между собой соотношением $S_2(f) \simeq S_1(f)e^{i2\pi\tau f}$, где τ — временной сдвиг между их состояниями, а для разности фаз $\Delta\phi_f$ выполняется следующая закономерность:

$$\Delta\phi_f = \phi_{f1}(t) - \phi_{f2}(t) = 2\pi\tau f. \quad (2)$$

Таким образом, на плоскости $(f, \Delta\phi_f)$ точки, отвечающие разности фаз спектральных компонент хаотических осцилляторов, находящихся в режиме синхронизации с запаздыванием, располагаются вдоль прямой, имеющей угловой коэффициент $k = 2\pi\tau$. Понятно, что в режиме полной синхронизации угловой коэффициент k прямой линии на плоскости $(f, \Delta\phi_f)$ равен нулю.

При разрушении режима синхронизации с запаздыванием (например, с уменьшением параметра связи между осцилляторами), часть спектральных компонент фурье–спектров выходит из режима синхронизма, что проявляется в отклонении точек на плоскости $(f, \Delta\phi_f)$ от прямой линии. При этом, в первую очередь выходят из синхронизма те спектральные компоненты, на которые приходится малая доля энергии, тогда как спектральные компоненты в фурье–спектрах, характеризующиеся большей долей энергии, остаются синхронизованными, и соответствующие им точки на плоскости $(f, \Delta\phi_f)$ по–прежнему располагаются вдоль прямой линии. По мере дальнейшего уменьшения параметра связи, все большая часть спектральных компонент выходит из состояния синхронизма, но до тех пор, пока наиболее “энергетические” компоненты являются синхронизованными, связанные

системы демонстрируют синхронный режим (в частности, фазовую синхронизацию)¹¹.

В первой главе также вводится в рассмотрение количественная характеристика степени хаотической синхронизации — доля энергии, приходящейся на синхронизованные спектральные компоненты f_{j_s} :

$$\rho = \frac{\sum_{j_s} S(f_{j_s}) \Delta f}{\sum_j S(f_j) \Delta f}, \quad (3)$$

где Δf — шаг дискретизации по частоте. В отсутствие хаотической синхронизации $\rho = 0$ (все спектральные компоненты рассинхронизованы). Затем, при установлении режима хаотической синхронизации, по мере увеличения параметра связи, увеличивается число синхронизованных спектральных компонент, и, соответственно, растет доля энергии ρ , приходящейся на эти спектральные компоненты. В тот момент, когда все спектральные компоненты синхронизируются (устанавливается режим синхронизации с запаздыванием), $\rho = 1$.

Обсуждается вопрос о критерии возникновения синхронизации спектральных компонент. Если взаимодействующие системы связаны друг с другом таким образом, что могут демонстрировать режим синхронизации с запаздыванием, в роли такого критерия может выступать соотношение (2). Однако, более общим критерием является установление постоянного сдвига фаз между синхронизованными компонентами

$$\Delta\phi_f = \phi_{f01} - \phi_{f02} = \text{const}, \quad (4)$$

не зависящего от начальных условий.

Впервые получены аналитические соотношения, находящиеся в хорошем соответствии с результатами численного моделирования, характеризующие поведение близких частотных компонент двух связанных осцилляторов при увеличении интенсивности связи ε между ними. Показано, что, если взаимодействующие системы демонстрируют режим синхронизации с запаздыванием, временной сдвиг между спектральными компонентами

$$\tau = \frac{\Delta\phi}{\omega} \sim \varepsilon^{-1} \quad (5)$$

не зависит от частоты ω , а следовательно, оказывается одинаковым для всех спектральных компонент. Закономерность (5) имеет место для целого

¹¹Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с работами V.S. Anishchenko, T.E. Vadivasova, D.E. Postnov, M.A. Safonova, *Int. J. Bifurcation and Chaos* 2 (3) (1992) 633-644; A. Shabunin, V. Astakhov, J. Kurths, *Phys. Rev. E* 72 (2005) 016218

ряда динамических систем (однонаправленно и взаимно связанные системы Ресслера в режимах спирального и винтового хаоса, автогенераторы Ван дер Поля — Дуффинга с 1.5 степенями свободы и др.), и по всей видимости, носит универсальный характер.

В этой главе рассмотрена также синхронизация между гармониками автоколебательных систем при переходе от асинхронного режима к синхронному. На примере асимметричного автогенератора Ван дер Поля под внешним гармоническим воздействием аналитически выявлена роль учета второй гармоники автоколебаний при изучении синхронизации. Показано, что при возникновении синхронизации спектральных компонент устанавливается определенное фазовое соотношение между первой и второй гармониками автоколебаний.

Изложены результаты исследования синхронизации спектральных компонент в случае воздействия внешнего хаотического сигнала на систему с периодической динамикой. В качестве объекта исследования выбран классический автогенератор Ван дер Поля, находящийся под воздействием системы Ресслера. В этом случае при малых расстройках параметров взаимодействующих систем возможен захват основных спектральных компонент, а следовательно, и возникновение фазовой синхронизации. Показано, что переход к этому режиму, как и в случае двух связанных хаотических систем (при относительно слабых расстройках), сопровождается последовательностью двух типов перемежающегося поведения: перемежаемость типа I наблюдается вдали от точки перехода к режиму фазовой синхронизации, в то время как вблизи нее имеет место перемежаемость “игольного ушка”.

Во **второй главе** диссертационной работы обсуждаются особенности одного из типов синхронного поведения однонаправленно связанных динамических систем — обобщенной хаотической синхронизации и ее взаимосвязь с другими типами синхронного поведения. В этой главе рассмотрены механизмы, обуславливающие возникновение режима обобщенной синхронизации в системах с различным типом связи между ними. Для диссипативно связанных динамических систем предложен новый подход, названный методом модифицированной системы.

Согласно методу модифицированной системы, ведомая система рассматривается как некоторая модифицированная система с дополнительной диссипацией под внешним воздействием со стороны ведущей системы¹². Режим обобщенной синхронизации, возникающий в исследуемой системе, может быть рассмотрен как следствие двух взаимосвязанных процессов, протекающих одновременно: увеличения диссипации в модифицированной системе и возрастания амплитуды внешнего сигнала. Оба процесса связа-

¹²А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, ЖТФ. 76 (2) (2006) 1–2.

ны друг с другом посредством параметра и не могут быть реализованы в ведомой системе отдельно. Однако, увеличение диссипации в модифицированной системе приводит к упрощению ее поведения и переходу от хаотических колебаний к периодическим (или к стационарному состоянию). Внешнее воздействие, наоборот, стремится усложнить поведение модифицированной системы и навязать ей свою динамику. Очевидно, что возникновение режима обобщенной синхронизации возможно только тогда, когда собственная хаотическая динамика в ведомой системе оказывается подавленной за счет диссипации.

Эффективность предложенного метода проверена путем численного моделирования систем с непрерывным (системы Ресслера) и дискретным (логистические отображения) временем. При помощи предложенного подхода объяснены причины “аномального поведения” границы обобщенной синхронизации на плоскости управляющих параметров “частота расстройки — интенсивность связи” двух однонаправленно связанных систем Ресслера, а именно:

- слабая зависимость порога возникновения обобщенной синхронизации от параметров расстройки в случае, если взаимодействующие системы расстроены достаточно сильно;
- возникновение синхронного режима в области малых значений частотной расстройки при величинах интенсивности связи, примерно в два раза превышающих последние для больших расстроек управляющих параметров взаимодействующих систем.

Впервые показано, что механизмы установления синхронного режима различны в области больших и малых значений расстройки частот. В случае относительно больших расстроек возникновение обобщенной синхронизации обусловлено свойствами самой модифицированной системы, а следовательно, ее порог не зависит от параметров ведущей системы. В этом случае синхронизация возникает, в первую очередь, за счет захвата двух частотных компонент с различными частотами, соответствующих основной частоте ведущей системы и собственной частоте ведомой системы. Механизмы, приводящие к установлению режима обобщенной синхронизации при относительно слабых расстройках взаимодействующих систем, целиком определяются синхронизацией основной спектральной компоненты ведомой системы и ее субгармоник. Сдвиг границы возникновения обобщенной синхронизации в этом случае в сторону больших значений параметра связи обусловлен возбуждением собственной хаотической динамики модифицированной системы, рождающейся в области синхронизации неав-

тономной модифицированной системы через каскад бифуркаций удвоения периода.

Рассмотрен вопрос о механизмах возникновения режима обобщенной синхронизации в случае недиссипативной связи между системами. Путем рассмотрения однонаправленно связанных систем Ресслера (ведущая система) и Лоренца (ведомая система) показано, что возникновение синхронного режима в этом случае обусловлено перемещением изображающей точки в фазовом пространстве ведомой системы в области с сильной диссипацией при помощи внешнего сигнала большой амплитуды.

Изложены результаты исследования влияния шума на порог возникновения режима обобщенной синхронизации. Показано, что в системах с диссипативным типом связи шум малой интенсивности практически не оказывает влияния на порог возникновения синхронного режима. В то же самое время, для ряда систем (например, однонаправленно связанных осцилляторов Ресслера) устойчивость режима обобщенной синхронизации к шумам является достаточно высокой.

Подробно изучен вопрос о взаимосвязи обобщенной синхронизации и синхронизации, индуцированной шумом. Выявленные в рамках диссертационной работы механизмы возникновения режима обобщенной синхронизации, позволили заключить, что оба типа синхронного поведения обусловлены одной и той же причиной, характеризуются сходными механизмами возникновения (связанными с дополнительным введением диссипации) и могут быть рассмотрены как единый тип синхронного поведения связанных динамических систем.

Исследована также взаимосвязь обобщенной синхронизации с другими типами синхронного поведения. Выявленные механизмы возникновения режима обобщенной синхронизации в совокупности с механизмами возникновения фазовой синхронизации¹³ позволили впервые объяснить различия в расположении границ этих режимов на плоскости параметров “частота расстройки — интенсивность связи” в области больших и малых значений расстройки частот.

В **третьей главе** диссертационной работы описаны возможности практического приложения явления хаотической синхронизации — ее использование для скрытой передачи информации. В этой главе подробно рассмотрены как известные ранее способы скрытой передачи данных, основанные на различных типах синхронного поведения (полной, фазовой, обобщенной синхронизации), а также использующие несколько типов хаотической синхронизации одновременно (например, обобщенную и полную синхронизации), так и предложенные в настоящей диссертационной работе ме-

¹³ А.А. Короновский, М.К. Куровская, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, ЖТФ. 77 (1) (2007) 21–29.

тоды скрытой передачи информации. Анализ известных схем и устройств показал, что, несмотря на использование различных типов хаотической синхронизации для скрытой передачи данных, специфические особенности каждого из них, их характерные различия, достоинства и недостатки, ряд общих недостатков в той или иной степени присущ всем известным в настоящее время схемам. Это

- требование высокой степени идентичности хаотических генераторов на различных сторонах канала связи;
- низкая устойчивость к шумам и флуктуациям в канале связи;
- низкая конфиденциальность, то есть возможность в ряде случаев реконструкции параметров передающего генератора по сигналу, передаваемому по каналу связи (особенно для схем на основе полной хаотической синхронизации).

Предложен новый способ скрытой передачи информации, лишенный всех вышеупомянутых недостатков. Он основан на явлении обобщенной хаотической синхронизации и заключается в следующем. На передающей стороне канала связи находится генератор хаотических автоколебаний, один или несколько управляющих параметров которого модулируются полезным цифровым сигналом таким образом, чтобы в зависимости от передаваемого бинарного бита 0/1 характеристики сформированного таким образом сигнала менялись незначительно, но при этом оставалась возможность возникновения/разрушения режима обобщенной синхронизации между передающим и принимающими генераторами в зависимости от передаваемого бинарного бита. Сформированный таким образом сигнал поступает в канал связи, где он подвергается влиянию шумов и флуктуаций, и с определенной мощностью передается принимающей стороне. На принимающем конце канала связи находится приемник. Принцип работы приемника основан на детектировании обобщенной хаотической синхронизации при помощи метода вспомогательной системы. Для этого, на принимающей стороне сигнал, снятый с канала связи, подается на два идентичных генератора хаотических автоколебаний, способных находиться с передающим генератором в режиме обобщенной хаотической синхронизации. Сигналы, снимаемые с выходов генераторов принимающей стороны, подаются на вычитающее устройство, и по отсутствию/наличию хаотических колебаний диагностируется бинарный бит 0/1.

С целью сопоставления предложенного способа с известными аналогами проведено численное моделирование как предложенной схемы, так и

известных схем аналогичного назначения. В качестве генераторов передающего и принимающего устройств во всех случаях выбраны однонаправленно связанные системы Ресслера. Показано, что в отсутствие шумов и флуктуаций в канале связи предложенный метод работает также эффективно, как и известные аналоги, в то время как его техническая реализация существенно упрощается. Введены в рассмотрение количественные характеристики работоспособности схем и устройств: отношение сигнал/шум, при котором схема становится неработоспособной, максимальное значение расстройки управляющих параметров изначально идентичных хаотических генераторов и максимальный уровень нелинейных искажений в канале связи, при котором схема работает. Показано, что предложенный способ скрытой передачи данных превосходит известные ранее по всем характеристикам. Более того, он обладает значительной устойчивостью к шумам, в то время как устойчивость известных схем и устройств является ограниченной. Описан усовершенствованный способ скрытой передачи информации, реализация которого подразумевает наличие дополнительного генератора шума на передающей стороне канала связи, что повышает степень конфиденциальности передаваемой информации.

В **Заключении** подведены итоги диссертационной работы, сформулированы основные результаты и намечены направления возможных дальнейших исследований в данном направлении.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Предложенная концепция синхронизации спектральных компонент позволяет описывать различные типы хаотической синхронизации с единых позиций. Для режима синхронизации с запаздыванием, зависимость временного сдвига между основными частотными компонентами этих систем от силы связи между ними подчиняется универсальному степенному закону с показателем степени “минус единица”.
2. Переход взаимодействующих систем от асинхронного состояния в область синхронизации сопровождается изменением поведения разности фаз между гармониками автоколебаний, при этом, между ними устанавливается фазовое соотношение, зависящее от величины расстройки частот и параметра связи.
3. В случае воздействия внешнего хаотического сигнала на систему с периодической динамикой возникновение режима фазовой синхронизации при малых значениях расстройки частот сопровождается после-

довательностью двух типов перемежающегося поведения — перемежаемости типа I и перемежаемости “игольного ушка”, имеющих место при синхронизации двух связанных хаотических систем, а также в случае синхронизации системы с хаотической динамикой внешним гармоническим сигналом.

4. Предложенный метод модифицированной системы для анализа обобщенной синхронизации позволяет выявить механизмы возникновения этого режима в диссипативно связанных динамических системах, объяснить причины “аномального” поведения границы обобщенной синхронизации на плоскости параметров “частота расстройки — интенсивность связи”, исследовать ее взаимосвязь с другими типами синхронного поведения. Согласно этому методу, поведение ведомой системы эквивалентно поведению модифицированной системы с дополнительно введенной диссипацией под внешним хаотическим воздействием со стороны ведущей системы, а порог возникновения синхронного режима определяется балансом между подавлением собственной хаотической динамики при помощи дополнительного введения диссипации и возбуждением хаотических колебаний в ней под действием ведущей системы.
5. Предложенный на основе режима обобщенной синхронизации способ скрытой передачи информации обладает рядом принципиальных достоинств по сравнению с известными аналогами, позволяя избавиться от требования идентичности генераторов, располагаемых на различных сторонах канала связи, значительно повысить его устойчивость к шумам и увеличить конфиденциальность.

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] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, П.В. Попов, А.Е. Храмов, Способ скрытой передачи информации, основанный на явлении обобщенной синхронизации, Известия РАН. Серия физическая 72 (1) (2008) 143–147.
- [3] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, П.В. Попов, А.Е. Храмов, Устойчивый к шумам способ скрытой передачи информации, Первая Миля 1 (2008) 14–16.

- [4] О.И. Москаленко, Переход к фазовой синхронизации в случае воздействия внешнего хаотического сигнала на систему с периодической динамикой, Письма в ЖТФ 33 (19) (2007) 72–79.
- [5] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, Граница возникновения режима обобщенной синхронизации хаотических осцилляторов, Радиотехника и электроника 52 (8) (2007) 949–960.
- [6] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, Аналитическое исследование асимметричного автогенератора Ван дер Поля при помощи метода медленноменяющихся амплитуд, Электромагнитные волны и электронные системы 12 (3) (2007) 22–25.
- [7] А.А. Короновский, М.К. Куровская, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, Два сценария разрушения режима хаотической фазовой синхронизации, ЖТФ 77 (1) (2007) 21–29.
- [8] A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, O.I. Moskalenko, Are generalized synchronization and noise-induced synchronization identical types of synchronous behavior of chaotic oscillators?, Phys. Lett. A 354 (5–6) (2006) 423–427.
- [9] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, Обобщенная синхронизация и синхронизация, индуцированная шумом, - единый тип поведения связанных хаотических систем, Доклады Академии Наук 407 (6) (2006) 761–765.
- [10] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, Об установлении режима обобщенной синхронизации в хаотических осцилляторах, Письма в ЖТФ 32 (3)(2006) 40–48.
- [11] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, О механизмах, приводящих к установлению режима обобщенной синхронизации, ЖТФ 76 (2) (2006) 1–9.
- [12] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, Р.А. Филатов, А.Е. Храмов, Исследование обобщенной синхронизации хаотических систем, Изв. РАН, сер. физич. 69 (12) (2005) 1741–1745.
- [13] A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, O.I. Moskalenko, Generalized synchronization onset, Europhysics Letters 72 (6) (2005) 901–907.
- [14] A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, M.K. Kurovskaya, O.I. Moskalenko, Synchronization of spectral components and its regularities in chaotic dynamical systems, Phys. Rev. E 71 (5) (2005) 056204.
- [15] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, П.В. Попов, А.Е. Храмов, Некоторые общие подходы к анализу хаотической синхронизации в связанных динамических системах, Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика 12 (6) (2004) 159–190.
- [16] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, Новый тип универсальности при хаотической синхронизации динамических систем, Письма в ЖЭТФ 80 (1)(2004) 25–28.
- [17] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, Синхронизация спектральных компонент связанных хаотических осцилляторов, Письма в ЖТФ 30 (18) (2004) 56–64.

- [18] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, Способ скрытой передачи информации, Заявка на патент 2007132422 (август 2007).
- [19] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, П.В. Попов, А.Е. Храмов, Способ секретной передачи информации: Патент на изобретение № 2295835. Изобретения. Полезные модели: Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Москва: ФИПС. (2007).
- [20] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, П.В. Попов, А.Е. Храмов, Устройство для секретной передачи информации: Патент на полезную модель п 57538. Изобретения. Полезные модели: Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Москва: ФИПС. 10.10.2006. № 28. (2006).
- [21] О.И. Москаленко, О влиянии шума на различные способы скрытой передачи информации. Тезисы докладов XIV научной школы “Нелинейные волны — 2008”, 2008.
- [22] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, О конструктивной роли шума при передаче информации. Материалы VIII Международной школы “Хаотические автоколебания и образование структур (ХАОС–2007)” (9–14 октября 2007 года, Саратов, Россия), 2007, с. 41–42.
- [23] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, П.В. Попов, А.Е. Храмов, Способ скрытой передачи информации на основе хаотической синхронизации, обладающий сверхвысокой устойчивостью к шумам и флуктуациям в канале связи. Материалы 17–ой Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (10–14 сентября 2007 года, Севастополь, Крым, Украина), 2007, с. 231–232.
- [24] О.И. Москаленко, А.А. Короновский, П.В. Попов, А.Е. Храмов, Метод скрытой передачи информации, обладающий устойчивостью к шумам, Материалы Второй Международной Научной Школы “Наука и инновации — 2007” (г. Йошкар-Ола, 5-11 июля 2007 г.), 2007, с. 143–147.
- [25] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, П.В. Попов, А.Е. Храмов, Метод скрытой передачи информации на основе обобщенной синхронизации, обладающий устойчивостью к шумам в канале связи. Труды X Всероссийской школы-семинара “Физика и применение микроволн” (21–26 мая 2007 года, Звенигород, Московская область, Россия), секция 6, 2007, с. 54–56.
- [26] С. Боккалетти, А.А. Короновский, М.К. Куровская, О.И. Москаленко, А.А. Овчинников, А.Е. Храмов, Перемежаемость типа I в присутствии шума. Труды X Всероссийской школы-семинара “Физика и применение микроволн” (21–26 мая 2007 года, Звенигород, Московская область, Россия), секция 5, 2007, с. 7.
- [27] О.И. Москаленко, Исследование фазового соотношения между первой и второй гармониками автоколебаний при переходе от асинхронного режима к синхронному. Материалы научной школы конференции “Нелинейные дни в Саратове для молодых — 2006”, РИО журнала “Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика”, 2006, с. 146–149.

- [28] О.И. Москаленко, Исследование фазового соотношения между первой и второй гармониками автогенератора под внешним воздействием. Материалы I конференции молодых ученых “Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика”, 2006, с. 73–74.
- [29] О.И. Москаленко, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Аналитическое исследование несимметричного генератора Ван дер Поля. Труды школы-семинара “Волны–2006”. Московская область, пансионат “Университетский”, 22–27 мая 2006 г., 2006, с. 12–13.
- [30] О.И. Москаленко, Граница возникновения обобщенной синхронизации. Тезисы докладов XIII научной школы “Нелинейные волны — 2006”, 2006, с. 106–107.
- [31] О.И. Москаленко, Р.А. Филатов, Исследование обобщенной хаотической синхронизации в системах с малым числом степеней свободы и распределенных пучково-плазменных системах. Материалы XIII зимней школы-семинара по СВЧ электронике и радиофизике, 2006, с. 96–97.
- [32] О.И. Москаленко, Порог возникновения режима обобщенной синхронизации в связанных системах Ресслера. Материалы научной школы–конференции “Нелинейные дни в Саратове для молодых — 2005”, ГосУНЦ “Колледж”, 2005, с. 138–141.
- [33] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, И.А. Попов, О механизме возникновения режима обобщенной синхронизации. Труды VII Всероссийской научной конференции “Нелинейные колебания механических систем” (19–22 сентября 2005 года, Нижний Новгород), 2005, с. 112–113.
- [34] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, Р.А. Филатов, А.Е. Храмов, Использование модифицированной системы для объяснения механизмов, приводящих к установлению режима обобщенной синхронизации. Труды VII Всероссийской научной конференции “Нелинейные колебания механических систем” (19–22 сентября 2005 года, Нижний Новгород), 2005, с. 110–111.
- [35] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, Р.А. Филатов, А.Е. Храмов, Исследование хаотической синхронизации в пучково–плазменных системах со сверхкритическим током. Материалы 15–ой Международной Крымской конференции “СВЧ–техника и телекоммуникационные системы” (12–16 сентября 2005 года, Севастополь, Крым, Украина), 2005, с. 675–676.
- [36] A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, M.K. Kurovskaya, O.I. Moskalenko, Regularities appearing in Fourier spectra of coupled chaotic oscillators at transition from time scale synchronization to lag synchronization. Proceedings of International Symposium "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics (NWP-2005) Nonlinear Dynamics: Theory and Applications (2-9 August 2005, Nizhny Novgorod, Russia), 2005, pp. 50–51.
- [37] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, О механизме возникновения режима обобщенной синхронизации в однонаправлено связанных хаотических системах. Сборник тезисов III Международной конференции “Фундаментальные проблемы физики” (13–18 июня 2005 года, Казань, Россия), 2005, с. 177.
- [38] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, Обобщенная синхронизация хаотических осцилляторов: метод модифицированной системы. Сборник тезисов III

Международной конференции “Фундментальные проблемы физики” (13–18 июня 2005 года, Казань, Россия), 2005, с. 84.

- [39] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, И.А. Петров, О явлении обобщенной синхронизации в однонаправлено связанных хаотических системах. Труды X Всероссийской школы-семинара “Физика и применение микроволн” (23–28 мая 2005 года, Звенигород, Московская область, Россия), секция 3, 2005, с. 15.
- [40] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, О факторах, влияющих на порог возникновения режима обобщенной синхронизации двух однонаправлено связанных хаотических осцилляторов. Труды X Всероссийской школы-семинара “Физика и применение микроволн” (23–28 мая 2005 года, Звенигород, Московская область, Россия), секция 3, 2005, с. 6.
- [41] О.И. Москаленко, Синхронизация спектральных компонент как следствие синхронизации временных масштабов. Международная школа-семинар по фундаментальной физике для молодых ученых «Квантовые измерения и физика мезоскопических систем». Программа и тезисы докладов, Владимирский государственный университет, 2005, с. 59.
- [42] О.И. Москаленко, Исследование явления хаотической синхронизации в связанных системах со слегка различающимися параметрами. Материалы научной школы-конференции “Нелинейные дни в Саратове для молодых - 2004”, ГосУНЦ “Колледж”, 2004, с. 139–142.
- [43] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, О переходе от фазовой к лаг-синхронизации в хаотических системах с непрерывным временем. Материалы VII Международной школы “Хаотические автоколебания и образование структур (ХАОС–2004)” (1–6 октября 2004 года, Саратов, Россия), 2004, с. 75–76.
- [44] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, Универсальный характер поведения хаотических систем при переходе от фазовой к лаг синхронизации. Труды IX Всероссийской школы-семинара “Волновые явления в неоднородных средах (Волны – 2004)”. Москва, 24-29 мая 2004 г., секция 3, 2004, с. 5.

МОСКАЛЕНКО Ольга Игоревна

ХАОТИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ (РАЗЛИЧНЫЕ
МЕХАНИЗМЫ И ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ СКРЫТОЙ
ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ)

Автореферат

Подписано к печати 03.04.2008. Формат 60 × 84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура “Times”
Усл. печ. л. 1,39 (1,5). Тираж 120 экз. Заказ 55Т.

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