

На правах рукописи

ФИЛАТОВА Анастасия Евгеньевна

РЕЖИМЫ ПОЛНОЙ ХАОТИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ И
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В НЕКОТОРЫХ СЕТЯХ
СО СЛОЖНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ,
СОДЕРЖАЩИХ НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

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

Научные руководители: чл.–корр. РАН,
доктор физико–математических наук,
профессор **Трубецков Дмитрий Иванович**,
доктор физико–математических наук,
доцент **Короновский Алексей Александрович**

Официальные оппоненты: доктор физико–математических наук,
профессор **Шалфеев Владимир Дмитриевич**,
кандидат физико–математических наук,
доцент, старший научный сотрудник
Пономаренко Владимир Иванович

Ведущая организация: Саратовский государственный
технический университет

Защита состоится “22” мая 2008 г. в 17 часов 30 минут в 34 ауд. III корпуса СГУ на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 по специальностям 01.04.03 – радиофизика и 01.04.04 – физическая электроника 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. Одной из обширных областей исследования в нелинейной динамике является изучение коллективного поведения взаимодействующих хаотических нелинейных систем, а также проблем, связанных с исследованиями явления синхронизации в коллективной динамике. Интерес к изучению этого явления не ослабевает и в настоящее время, что определяется его важным фундаментальным и практическим значением для естествознания (например, в биологических и физиологических задачах¹, при скрытой передаче информации с помощью хаотических сигналов², при управлении системами сверхвысокочастотной электроники³ и т.п.). С развитием теории хаотической синхронизации было выявлено достаточно большое число различных типов хаотического синхронного поведения связанных динамических систем (В.С. Анищенко, В.В. Астахов, В.С. Афраймович, Б.П. Безручко, Т.Е. Вадивасова, М. Закс, С.П. Кузнецов, П.С. Ланда, Ю. Майстренко, В.И. Некоркин, Г.В. Осипов, А.С. Пиковский, В.И. Пономаренко, Д.Э. Постнов, М.Д. Прохоров, М.И. Рабинович, М.Г. Розенблюм, Н.Ф. Рульков, М.М. Сущик, Д.И. Трубецков, Л.С. Цимринг, В.Д. Шалфеев, Н.Д. Abarbanel, P. Ashwin, S. Boccaletti, T.L. Carroll, B.R. Hunt, H. Fujisaka, C. Grebogi, L. Kocarev, J. Kurths, Y.C. Lai, E. Mosekilde, E. Ott, P. Paoli, U. Parlitz, L.M. Pecora, A.V. Taborov, J.A. Yorke и др.). Интенсивное развитие данной области нелинейной динамики привело к выходу исследований хаотической синхронизации за рамки рассмотрения двух взаимодействующих систем, и в последние годы акцент наиболее активно ведущихся исследований синхронизации хаоса смещается в сторону изучения больших ансамблей связанных хаотических динамических систем. Исследование особенностей коллективной динамики больших ансамблей связанных хаотических осцилляторов началось с изучения динамики цепочек и решеток взаимодействующих элементов и постепенно перешло к изучению сетей нелинейных элементов со сложной топологией связей между элементами. В настоящее время именно эти объекты – сети хаотических нелинейных элементов со сложной топологией – привлекают наибольшее внимание исследователей, что во многом определяется большим числом объектов в природе и технике, которые можно описать с по-

¹L. Glass. Synchronization and rhythmic processes in physiology (London). 2001. Vol. 410. Pp. 277–284; V.S. Anishchenko, A.G. Balanov, N.B. Janson et al. Int. J. Bifurcation and Chaos 10 (2000) 2339.

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

³Д.И. Трубецков, А.А. Короновский, А.Е. Храмов. Изв. вузов. Радиофизика XLVII(5-6) (2004) 343.

мощью сетей. Необходимо отметить, что проблема синхронного поведения элементов сложной сети является хотя и далеко не единственной, связанной со сложными сетями, но одной из центральных и активно изучаемых. В таких ансамблях нелинейных элементов возможны различные режимы коллективного поведения, демонстрирующего признаки синхронизма – *полная синхронизация, кластерная синхронизация, фазовая синхронизация*.

В то же самое время, несмотря на значительный интерес к проблеме синхронной динамики нелинейных систем и большое число публикаций по данному направлению, утверждать, что в рассматриваемой области все проблемы уже решены, было бы явно преждевременно. Существует большое число вопросов, ответы на которые еще не найдены и решение которых могло бы способствовать значительному продвижению вперед в понимании основных закономерностей и особенностей неавтономного поведения динамических систем, способных демонстрировать сложное поведение.

В первую очередь, необходимо отметить направление исследований устойчивости режима полной синхронизации сетей, состоящих из элементов с малым числом степеней свободы. Уже проведенные исследования в данном направлении в большей степени относились к сетям идентичных конечномерных элементов с непрерывным типом времени. В ряде работ⁴ для подобных объектов представлен простой метод определения диапазона устойчивости режима полной синхронизации в пространстве управляющих параметров. Однако, идентичность взаимодействующих элементов является весьма сильным ограничением применимости полученных результатов: очевидно, что ни одна реальная сеть не может быть построена состоящей из абсолютно идентичных элементов. Одновременно, незаслуженно обойденными вниманием оказываются сети, состоящие из систем с дискретным временем (отображений), также являющиеся важными объектами исследований.

Во-вторых, представляет интерес проблема исследования переходных процессов, приводящих сложную сеть к режиму полной синхронизации. Как правило, при изучении сложного поведения нелинейных динамических систем с дискретным или непрерывным временем, со сосредоточенными или распределенными параметрами, основной интерес исследователей вызывают установившиеся режимы колебаний и то, каким образом происходит смена этих режимов при изменении управляющих параметров системы. При этом переходные процессы в большинстве случаев рассмат-

⁴M. Chavez, D.-U. Hwang, A. Amann et al. Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 218701; D.-U. Hwang, M. Chavez, A. Amann et al. Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 138701.

риваются как нечто второстепенное, не вызывающее особого интереса. В то же самое время следует отметить, что переходный процесс несет информацию о системе и в ряде случаев оказывается более целесообразным рассматривать поведение системы, находящейся именно в стадии переходного процесса⁵, а не тогда, когда система вышла на аттрактор.

Кроме того, важным и интересным вопросом является возникновение режима полной синхронизации в сети бесконечномерных распределенных систем. Очевидным фактом представляется, что именно бесконечномерные распределенные системы являются наиболее полными и адекватными моделями реальных объектов природы и техники⁶. Однако, хаотическая синхронизация в сетях распределенных элементов практически не изучалась, за исключением предельного случая двух взаимодействующих систем. Однако, поскольку конечномерные системы зачастую являются аппроксимациями бесконечномерных распределенных систем, можно предположить, что и в коллективной динамике сети распределенных элементов можно найти некоторые общие закономерности с сетями потоков и отображений.

Исследования сложных сетей, состоящих из сосредоточенных и распределенных систем представляются весьма важными и актуальными как с прикладной, так и фундаментальной точек зрения, что позволяет считать тему диссертации, посвященной исследованию режимов полной хаотической синхронизации и переходных процессов в сетях со сложной топологией, содержащих нелинейные динамические системы актуальной и важной для современной радиофизики и физической электроники.

Цель диссертационной работы. Целью настоящей диссертационной работы является детальное изучение возникновения синхронизма в коллективной динамике нелинейных автоколебательных систем, демонстрирующих хаотическое поведение, разработка универсального метода диагностики режима полной синхронизации произвольной сети со сложной топологией связей, состоящей из нелинейных хаотических конечно- и бесконечномерных элементов различной природы.

Достижение этой цели в диссертационной работе реализуется решением следующих задач.

- Исследование режима полной синхронизации в сети произвольной топологии взаимодействующих хаотических отображений; разработка метода главного ляпуновского показателя для рассматриваемой сети.

⁵В.Р. Bezruchko, Т.У. Dikaney, D.A. Smirnov. Phys. Rev. E 64 (2001) 036210.

⁶П.С. Ланда. Автоколебания в распределенных системах. М.: Наука, 1983.

- Выявление связи предложенного метода главного ляпуновского показателя системы взаимодействующих элементов и классической теории трансверсальной устойчивости синхронного состояния.
- Сопоставление слабосинхронизированных режимов неавтономной динамики в системах двух связанных нелинейных хаотических осцилляторов с дискретным и потоковым временем.
- Изучение режимов полной синхронизации в сложной сети произвольной топологии, состоящей из диссипативно связанных слабо неидентичных хаотических элементов с дискретным и непрерывным временем.
- Исследование переходных процессов в эталонных моделях нелинейной динамики, определение времени, необходимого для установления устойчивого синхронного режима в больших ансамблях взаимодействующих систем при фиксированных значениях управляющих параметров и величинах мощности межэлементной связи.
- Изучение режима полной синхронизации в сети произвольной топологии бесконечномерных распределенных систем с различными типами межэлементной связи. Создание для сложной сети пространственно распределенных систем метода определения диапазона устойчивости режима полной хаотической синхронизации, аналогичного методу главного ляпуновского показателя сети для сети со сложной топологией, состоящей из сосредоточенных систем.

Решение данных задач позволяет выявить общие закономерности коллективной динамики и синхронных режимов в сложных сетях, а также предложить единый метод анализа произвольных сложных сетей, состоящих из как конечно-, так и бесконечномерных элементов, что, как уже отмечалось выше, и является основной целью настоящей диссертационной работы.

В качестве объектов исследований в данной диссертационной работе выбраны динамические системы, являющиеся эталонными в нелинейной динамике (в частности, логистическое отображение, система Рёсслера), а также классические системы радиофизики и физической электроники (генератор “Torus”, диод Пирса).

Научная новизна. Научная новизна результатов, представленных в диссертационной работе, заключается в установлении основных закономерностей, присущих синхронной динамике больших ансамблей связанных

хаотических систем, выработке универсального подхода для диагностики устойчивости режима полной синхронизации произвольных сетей со сложной топологией, состоящих из хаотических бесконечно- и конечномерных элементов, разработке методик по определению длительности переходных процессов систем, находящихся в периодических и хаотических режимах колебаний. В диссертации получены следующие новые результаты.

- Разработана методика определения границ диапазона устойчивости режима полной синхронизации сети со сложной топологией, состоящих из хаотических отображений. Впервые показано, что предложенный метод главного ляпуновского показателя хорошо соотносится с классической теорией трансверсальной устойчивости синхронного состояния (для системы двух взаимодействующих отображений главный ляпуновский и старший поперечный трансверсальный ляпуновский показатели совпадают).
- Выявлена взаимосвязь между различными типами синхронной динамики хаотических систем с непрерывным (поток) и дискретным (отображения) временем. Впервые показано, что при слабой расстройке управляющих параметров тип поведения связанных отображений, возникающий с уменьшением параметра связи при разрушении полной синхронизации, который считался раньше асинхронным, соответствует фазовой синхронизации потоковых систем и должен рассматриваться как синхронный режим.
- Впервые предложена методика, основанная на расчете главного ляпуновского показателя сети, позволяющая диагностировать диапазон устойчивости режима полной хаотической синхронизации в пространстве управляющих параметров сети и величин мощности межэлементной связи.
- Для сложных сетей, состоящих из конечномерных хаотических элементов с непрерывным и дискретным типами времени, впервые показано, что слабая неидентичность элементов так же, как и введение шума небольшой интенсивности в систему, приводит к уменьшению границ диапазона устойчивости режима полной синхронизации сети. При этом существуют некоторые предельные значения границ области устойчивости режима полной синхронизации, при достижении которых дальнейшее увеличение уровня неидентичности элементов (или

вводимого в систему шума) не приводит к дальнейшему уменьшению диапазона устойчивости полной синхронизации.

- Впервые разработаны методики определения длительности переходных процессов в автономных динамических системах (отображениях) и в больших ансамблях хаотических элементов. Выявлен ряд скейлинговых закономерностей (свойств самоподобия), характерных для зависимости длительности переходных процессов от начальных условий в одномерных и двумерных отображениях.
- Исследованы основные закономерности, присущие переходным процессам больших ансамблей хаотических элементов, находящихся в режиме полной хаотической синхронизации. Впервые показано, что в большой сети со сложной топологией, состоящей из одномерных отображений, переходные процессы демонстрируют один глобальный минимум, определяемый топологией сети при варьировании управляющего параметра в рамках одного динамического режима системы.
- Впервые исследована полная синхронизация сетей сложной топологии распределенных пучково-плазменных систем сверхвысокочастотного диапазона – диодов Пирса. Разработана аналитическая методика определения диапазона устойчивости полной синхронизации, основанная на расчете старшего пространственного ляпуновского показателя исследуемой сети взаимодействующих через граничные условия элементов. Показано, что режим полной синхронизации произвольной сети, состоящей из элементов сосредоточенной или распределенной природы может быть описан с помощью одного и того же подхода, основанного на рассмотрении главного ляпуновского показателя.

Научная и практическая значимость работы.

Научная и практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что полученные в ней результаты выявляют одну из важных закономерностей коллективной динамики нелинейных хаотических систем. Исследование проводилось, прежде всего, на основе моделей, являющихся базовыми для нелинейной теории колебаний и волн, радиофизики и физической электроники. Поэтому полученные в диссертационной работе результаты имеют общий характер и могут быть перенесены на другие радиофизические (и не только радиофизические, но и иные) системы. Результаты, полученные в рамках диссертационной работы, позволяют продвинуться в понимании общих закономерностей, присущих режиму пол-

ной хаотической синхронизации больших ансамблей нелинейных систем, выявить общие характерные черты синхронизации в конечно- и бесконечномерных динамических системах с непрерывным и дискретным временем. Таким образом, результаты проведенных исследований важны для общей теории колебаний и волн, как в сосредоточенных, так и распределенных автоколебательных системах.

Вместе с тем, применение предложенного подхода к описанию синхронного поведения взаимодействующих нелинейных систем на основе методики старшего ляпуновского показателя сети позволяет эффективно и с малыми затратами времени численного счета диагностировать режим полной хаотической синхронизации и осуществлять поиск диапазона устойчивости режима полной синхронизации с единых позиций в сети произвольных элементов, что имеет весьма широкую область потенциального применения в различных областях науки и техники. В частности, разработанные методики расчета устойчивости синхронного состояния сети элементов и систем физической электроники могут быть применены для расчета оптимальной конфигурации активных модулей нелинейных антенн.

Результаты диссертации были использованы при выполнении ряда НИР и научных грантов, а также внедрены в учебный процесс в Саратовском государственном университете на факультете нелинейных процессов и физическом факультете по специальностям “Физика открытых нелинейных систем”, “Радиофизика и электроника” и направлению подготовки бакалавров и магистров “Радиофизика”.

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 методов. Достоверность полученных результатов подтверждается их воспроизводимостью, сопоставлением результатов, полученных аналитическими и численными методами, а также отсутствием противоречий с известными в научной литературе достоверными общепризнанными результатами.

Личный вклад. Основные результаты диссертации получены автором лично. В совместных работах автором выполнены все численные и аналитические расчеты. Постановка задач, разработка методов их решения, объяснение и интерпретация результатов были осуществлены совместно с научными руководителями и другими соавторами научных работ, опубли-

кованных соискателем.

Апробация работы.

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении госбюджетных НИР, осуществлявшихся в Научно-образовательном институте “Открытые системы” СГУ, отделении физики нелинейных систем научно-исследовательского института Естественных наук СГУ, при выполнении проектов Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 02-02-16351, 05-02-16273, 05-02-16286, 05-02-30062-э_д, 06-02-81013-Бел_а, 06-02-72007-МНТИ_а, 07-02-00044). Исследования также были поддержаны программой “Университеты России – Фундаментальные исследования” (проекты УР.01.01.371 и УР.01.01.052), Федеральной целевой научно-технической программой “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники” на 2002-2006 годы (темы 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, руководитель ведущей научной школы – чл.-корр. РАН, профессор Д.И. Трубецков), Программой Минобразования Российской Федерации “Развитие научного потенциала высшей школы” (2005 г., проекты 332, 333), Саратовским учебно-научным центром “Волновая электроника, микроэлектроника и нелинейная динамика” на базе Саратовского государственного университета, Саратовского филиала Института радиотехники и электроники РАН и Государственного учебно-научного центра “Колледж” (поддерживаемым Федеральной целевой программой “Интеграция” (проекты А0057 и Б0057)); 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: 6th International School on Chaotic Oscillations and Pattern Formation (CHAOS'2001) (Saratov, October 2001), Всероссийской научной школе-конференции “Нелинейные дни для молодых - 2001”, (Саратов, ноябрь 2001), XII Зимней школе-семинаре по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, январь-февраль 2003), Всероссийской научной школе-конференции “Нелинейные дни для молодых - 2003”, (Саратов, ноябрь 2003), IX Всероссийской школе-семинаре “Волновые явления в неоднородных средах” (Краснови-

дово, 24–29 мая 2004), VII Международной школе “Хаотические автоколебания и образование структур (ХАОС-2004)” (Саратов, 1–6 октября 2004), Первой летней научной школе Фонда Дмитрия Зимина “Династия” (Москва, 24–30 июля 2004), Всероссийской научной школе-конференции “Нелинейные дни для молодых - 2004”, (Саратов, ноябрь 2004), Международной школе-семинаре по фундаментальной физике для молодых ученых “Квантовые измерения и физика мезоскопических систем” (Владимир/Суздаль, февраль 2005), Научной конференции молодых ученых Фонда “Династия” (Москва, 16–17 апреля 2005), X Всероссийской школе-семинаре “Физика и применение микроволн” (Звенигород, Московская область, 23–28 мая 2005), VII Всероссийской научной конференции “Нелинейные колебания механических систем” (Нижний Новгород, 19–22 сентября 2005), III Международной конференции “Фундаментальные проблемы физики” (Казань, 13–18 июня 2005), XIII школе “Нелинейные волны–2006” (Нижний Новгород, 1–7 марта 2006), XIII Зимней школе–семинаре по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, январь 2006), 16-ой Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2006) (Севастополь, сентябрь 2006), VIII Международной школе “Хаотические автоколебания и образование структур (ХАОС-2007)” (Саратов, 9–14 октября 2007), XIV школе “Нелинейные волны–2008” (Нижний Новгород, 1–7 марта 2008). Результаты также неоднократно обсуждались на научном семинаре кафедры электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов Саратовского госуниверситета.

Публикации. Результаты работы опубликованы в реферируемых отечественных и зарубежных научных журналах (всего 12 статей), в том числе 10 статей в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук).

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Она содержит 179 страниц текста и 40 иллюстраций. Библиографический список содержит 303 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Во **введении** обоснована актуальность тематики проведенных исследований, их новизна и практическая значимость, сформулирована цель исследования и приведены основные результаты, выводы и положения диссертационной работы, выносимые на защиту, дано краткое изложение содержания работы.

В первой главе диссертационной работы приведены результаты аналитических и численных исследований коллективной динамики нелинейных хаотических сосредоточенных систем с непрерывным и дискретным временем.

В разделе 1.1 проводится анализ устойчивости режима полной синхронизации сети сложной топологии, состоящей из хаотических систем с дискретным временем (отображений). Аналитически разработана методика главного ляпуновского показателя сети для определения границ устойчивости диапазона режима полной хаотической синхронизации рассматриваемой сети. Формализм главного ляпуновского показателя расширен для случая сети произвольной топологии слабо неидентичных нелинейных хаотических отображений. Показано, что слабая неидентичность элементов сложной сети соответствует введению шума слабой интенсивности в систему и приводит к уменьшению диапазона устойчивости режима полной синхронизации. При этом существуют некоторые предельные значения границ области устойчивости режима полной синхронизации, при достижении которых дальнейшее увеличение уровня неидентичности элементов (или вводимого в систему шума) не приводит к дальнейшему уменьшению диапазона устойчивости полной синхронизации. Результаты численного моделирования, проведенного для сложной сети логистических отображений, приведены в разделе 1.2. Сравнение результатов численного и аналитического анализа устойчивости режима полной синхронизации изучаемой сети показывает хорошее соответствие между прямым численным моделированием и предлагаемой методикой главного ляпуновского показателя.

В разделе 1.3 исследуется взаимосвязь между методом старшего ляпуновского показателя сети и теорией трансверсальной устойчивости синхронного аттрактора. Показано, что для пары взаимодействующих отображений методы определения границ диапазона устойчивости дают идентичные результаты, что может рассматриваться в качестве дополнительной апробации предлагаемой методики.

В разделе 1.4 изучается взаимосвязь между различными типами синхронного поведения в динамических системах с непрерывным и дискретным временем. Для этого сопоставляется друг с другом поведение связанных отображений, потоковых систем и отображений, полученных из потоковых систем с помощью процедуры сечения Пуанкаре. На основании полученных результатов впервые показано, что тип поведения связанных отображений, который до сих пор считался асинхронным, следует рассматривать как синхронное поведение, соответствующее режиму фазовой

синхронизации потоковых систем. В разделе 1.5 исследуется взаимосвязь спектров исходной системы с непрерывным временем и полученным отображением. Проводится сравнение теоретических результатов и результатов численного эксперимента для эталонных моделей нелинейной динамики.

С учетом полученных результатов, демонстрирующих близость хаотических синхронных режимов в потоках и отображениях, в разделах 1.6, 1.7 описаны результаты теоретического и численного исследования сети слабо неидентичных нелинейных хаотических конечномерных осцилляторов с непрерывным временем. Проведенное аналитическое исследование позволило использовать метод главного ляпуновского показателя для сети слабо неидентичных потоковых систем (система Рёсслера).

Вторая глава диссертационной работы посвящена изложению результатов исследования переходных процессов в сетях со сложной топологией, состоящих из нелинейных хаотических элементов. Описание полученных результатов начинается с анализа переходных процессов в автономных системах (одномерных и двумерных отображениях с периодической динамикой), затем рассматриваются переходные процессы в сетях со сложной топологией, состоящих из взаимодействующих хаотических элементов (одномерных отображений).

В разделе 2.1 описаны предложенные и апробированные методы определения длительности переходных процессов для отображений, демонстрирующих периодическую динамику. В разделе 2.2 на основе проведенных исследований показан ряд универсальных скейлинговых закономерностей (свойств самоподобия), присущих одномерным отображениям, а также объяснено усложнение характера зависимости длительности переходных процессов от начальных условий при варьировании управляющего параметра системы. Поскольку в системах с большей размерностью (в самом простейшем случае – в двумерных отображениях) переходные процессы могут подчиняться несколько иным закономерностям, нежели в одномерных отображениях, следующий раздел 2.3 посвящен изложению результатов изучения переходных процессов в более сложной системе – двумерном отображении. В качестве численной модели для исследования выбирается отображение Эно – одна из традиционных моделей нелинейной динамики. На протяжении раздела 2.3 показано, что переходные процессы минимальной длительности в динамических системах с дискретным временем соответствуют начальным условиям, принадлежащим ведущему устойчивому многообразию устойчивого цикла, которое характеризуется наименьшим по модулю мультипликатором. Найден механизм, ответственный за

усложнение зависимости длительности переходных процессов от начальных условий при изменении управляющих параметров системы в рамках одного динамического режима.

В последующих разделах 2.4 – 2.5 проводится исследование переходных процессов в сети взаимодействующих отображений. Используя основные принципы предложенного в разделе 2.1 метода определения длительности переходных процессов свободного отображения, в разделе 2.4 описан метод определения длительности времени переходного процесса сети, необходимого для выхода сети на синхронный режим. В качестве численной модели исследования переходных процессов выбирается сеть со сложной топологией, состоящая из диссипативно связанных логистических отображений. Показано, что зависимость длительности переходных процессов сети от параметра межэлементной связи может быть объяснена с использованием результатов, полученных в первой главе диссертационной работы (разделы 1.1 и 1.2).

В третьей главе диссертационной работы приведены результаты аналитического исследования и численного моделирования сетей произвольной сложной топологии, состоящих из нелинейных элементов распределенной природы, демонстрирующих пространственно-временной хаос. В качестве модели элемента сети выбран диод Пирса, находящийся в хаотическом режиме, одна из классических моделей физической электроники.

В разделе 3.1 третьей главы описана математическая модель сети со сложной топологией, состоящей из распределенных электронных систем сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, находящихся в хаотическом режиме и взаимодействующих через граничные условия. Разделы 3.2 – 3.3 посвящены описанию результатов исследования условий существования и устойчивости режима полной хаотической синхронизации предложенной сети, состоящей из диодов Пирса. В разделе 3.2 третьей главы описана аналитическая методика, позволяющая найти область устойчивости режима полной хаотической синхронизации при помощи расчета главного ляпуновского показателя сети. Метод оценки устойчивости синхронной динамики сети основан на линейном анализе определенным образом модифицированной свободной пространственно-распределенной системы, определяющей динамику узла сети. В разделе 3.3 обсуждаются численные методы, используемые при моделировании диода Пирса и приведены результаты численного моделирования исследуемой сети, показывающие хорошее количественное и качественное совпадение численных расчётов и прогнозов, полученных с помощью разработанной аналитической методики в случае

сетей различной топологии и различного числа элементов. Численный эксперимент показал хорошее совпадение результатов с оценками, полученными при аналитическом исследовании (раздел 3.2).

Таким образом, в диссертации предложен способ единого описания полной синхронизации хаоса в сетях как сосредоточенных, так и распределенных элементов на основе метода главного ляпуновского показателя.

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

Основные выводы, результаты и положения, выносимые на защиту.

1. Для сети со сложной топологией, состоящей из диссипативно связанных слабо неидентичных нелинейных хаотических конечномерных элементов с непрерывным (поток) и дискретным (отображения) временем, предложен универсальный метод диагностики устойчивости режима полной синхронизации, основанный на расчете главного ляпуновского показателя по динамике всего одного узлового элемента сети.
2. Слабая неидентичность элементов сети так же, как и наличие шума слабой интенсивности в системе идентичных элементов, приводит к уменьшению диапазона устойчивости режима полной синхронизации сети. Существуют некоторые предельные значения границ области устойчивости режима полной синхронизации, при достижении которых дальнейшее увеличение уровня неидентичности элементов (или вводимого в систему шума) не приводит к дальнейшему уменьшению диапазона устойчивости полной хаотической синхронизации.
3. Тип поведения слабо неидентичных связанных систем с дискретным временем, возникающий с уменьшением параметра связи при разрушении режима полной синхронизации, который считался раньше асинхронным, соответствует фазовой синхронизации потоковых систем и должен рассматриваться как синхронный режим.
4. Режим полной хаотической синхронизации произвольной сети со сложной топологией, состоящей из взаимодействующих распределённых систем, может быть обнаружен с помощью метода главного пространственного ляпуновского показателя данной сети. Поэтому, анализ устойчивости исследуемого режима полной хаотической синхронизации может быть проведен путем рассмотрения динамики одной распределенной системы, играющей роль узлового элемента сети.
5. В большой сети со сложной топологией, состоящей из одномерных хаотических отображений, зависимость длительности переходных процессов от параметра связи демонстрирует один глобальный минимум, определяемый топологией сети, и на границах разрушения режима полной хаотической синхронизации сети резко возрастают.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах⁷:

1. А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), Р. А. Филатов, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, Д. И. Трубецков, *Совместные колебания в связанных электронных системах со сверхкритическим током*, Электромагнитные волны и электронные системы **12** (2007), No. 10, 26–32.
2. А. А. Короновский, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), А. В. Стародубов, *Взаимосвязь спектров, полученных по временным реализациям системы с потоковым временем и её отображениям возврата*, Письма в ЖТФ **32** (2006), No. 19, 86–94.
3. Стефано Боккалетти, А. А. Короновский, Д. И. Трубецков, А. Е. Храмов, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Устойчивость синхронного состояния произвольной сети связанных элементов*, Изв. вузов. Радиофизика **XLIX** (2006), No. 10, 917–924.
4. А. А. Короновский, А. Е. Храмов, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *К вопросу о синхронном поведении связанных систем с дискретным временем*, Письма в ЖЭТФ **82** (2005), No. 3, 176–179.
5. А. А. Короновский, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Относительная геометрическая мера синхронизации систем с дискретным временем*, Изв. РАН, сер. физич. **69** (2005), No. 12, 1732–1735.
6. А. Е. Hramov, А. Е. Filatova (А. Е. Khramova), I. A. Khromova, and A. A. Koronovskii, *Investigation of transient processes in one-dimensional maps*, Nonlinear Phenomena in Complex Systems **7** (2004), No. 1, 1–16.
7. А. А. Короновский, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Зависимость длительности переходных процессов от начальных условий в отображении Заславского*, ЖТФ **74** (2004), No. 5, 136–140.
8. N. Asghari, А. Е. Filatova (А. Е. Khramova), and et al., *Stability of terrestrial planets in the habitable zone of gi 777 a, hd 72659, gi 614, 47 uma and hd 4208*, Astronomy&Astrophysics **23** (2004), No. 4, 211–225.
9. А. А. Короновский, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Механизм усложнения зависимости длительности переходных процессов от начальных условий в двумерном отображении*, Письма в ЖТФ **29** (2003), No. 13, 10–18.
10. Г. Б. Астафьев, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *О переходных процессах в отображении Эно*, Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика **11** (2003), No. 4–5, 124–147.
11. А. А. Короновский, Д. И. Трубецков, А. Е. Храмов, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Универсальные закономерности переходных процессов*, Изв. вузов. Радиофизика **XLV** (2002), No. 10, 880–886.
12. А. А. Короновский, Д. И. Трубецков, А. Е. Храмов, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Универсальные скейлинговые закономерности переходных процессов*, Доклады Академии Наук **383** (2002), No. 3, 322–325.

⁷До 2007 года автор диссертации публиковала свои работы под фамилией Храмова А.Е.

13. А. Е. Филатова, *Устойчивость синхронного состояния сложной сети, состоящей из диодов Пирса*, Нелинейные волновые процессы. Конференция молодых ученых. Нижний Новгород, 1–7 марта 2008 года. Тезисы докладов., 2008, 166–168.
14. А. Е. Филатова, *Исследование полной хаотической синхронизации в сети распределенных элементов электронной природы*, Тезисы докладов восьмой международной школы “Хаотические автоколебания и образование структур” (Саратов, октябрь 2007 г.), 2007, 91–92.
15. А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Устойчивость сети связанных элементов модуля нелинейной антенны*, Материалы XIII зимней школы-семинара по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, 2006 г.), 2006, 108.
16. А. А. Короновский, А. Е. Храмов, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Устойчивость синхронного состояния активного модуля нелинейной антенны на основе диодов Пирса*, Материалы 16-ой Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2006). (Севастополь, сентябрь 2006 г.), 2006, 701–702.
17. А. А. Короновский, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Связь синхронизации хаоса в отображениях и потоках*, Нелинейные волновые процессы. Конференция молодых ученых. Нижний Новгород, 1–7 марта 2006 года. Тезисы докладов., 2006, 161–162.
18. А. А. Короновский, А. Е. Храмов, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Исследование синхронизации хаоса в потоках и отображениях*, Сборник тезисов III Международной конференции “Фундаментальные проблемы физики” (13–18 июня 2005 года, Казань, Россия), 2005, 87.
19. А. А. Короновский, А. Е. Храмов, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Хаотическая синхронизация в отображениях и потоках*, Труды VII Всероссийской научной конференции “Нелинейные колебания механических систем” (19–22 сентября 2005 года, Нижний Новгород), 2005, 118–119.
20. А. А. Короновский, А. Е. Храмов, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Сравнение различных типов хаотической синхронизации отображений и потоковых систем*, Труды десятой всероссийской школы-семинара “Физика и применение микроволн” (Звенигород, Московская область, май 2005 г.), 2005, 12–14.
21. А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *К вопросу о хаотической синхронизации в системах с дискретным и потоковым временем*, Тезисы докладов международной школы-семинара по фундаментальной физике для молодых ученых “Квантовые измерения и физика мезоскопических систем” (Владимир/Суздаль, февраль 2005 г.), 2005, 55.
22. А. А. Короновский, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Связь различных типов хаотической синхронизации в системах с дискретным и непрерывным временем*, Материалы VII Международной школы “Хаотические автоколебания и образование структур (ХАОС–2004)” (1–6 октября 2004 года, Саратов, Россия), 2004, 72–73.

23. А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Изучение разрушения полной синхронизации в системах с дискретным и потоковым временем*, Труды десятой всероссийской школы-семинара “Волны-2004” (Звенигород, Московская область, май 2004 г.), 2004, 30–33.
24. А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Хаотическая синхронизация динамических систем со слегка различающимися параметрами*, Сборник материалов научной школы-конференции “Нелинейные дни для молодых - 2004” (Саратов, октябрь 2004 г.), 2004, 131.
25. Г. Б. Астафьев, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Переходные процессы в отображении Эно*, Материалы XVII зимней школы-семинара по СВЧ электроники и радиофизике (Саратов, январь-февраль 2003 г.), 2003, 47–48.
26. Г. Б. Астафьев, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), А. Е. Храмов, А. А. Короновский, *Анализ мультистабильности и переходных процессов в эталонных моделях нелинейной динамики и некоторых распределенных системах электронно-плазменной природы со сверхкритическим током*, Материалы XVII зимней школы-семинара по СВЧ электроники и радиофизике (Саратов, январь-февраль 2003 г.), 2003, 50–51.
27. А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Исследование переходных процессов в отображении Заславского*, Сборник материалов научной школы-конференции “Нелинейные дни для молодых - 2003” (Саратов, сентябрь 2003 г.), 2003, 74.
28. А. А. Короновский, А. Е. Храмов, А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Исследование переходных процессов в одномерных отображениях*, 6-я Международная школа по хаотическим автоколебаниям и образованию структур (ХАОС’01). Тезисы докладов (2–7 октября 2001, Саратов, Россия), Саратов: Изд-во ГосУНЦ “Колледж”, 2001, 84–85.
29. А. Е. Филатова (А. Е. Храмова), *Явление скейлинга переходных процессов на примере логистического отображения*, Сборник материалов научной школы-конференции “Нелинейные дни для молодых - 2001” (Саратов, октябрь 2001 г.), 2001, 51.

ФИЛАТОВА Анастасия Евгеньевна

РЕЖИМЫ ПОЛНОЙ ХАОТИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ И
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В НЕКОТОРЫХ СЕТЯХ
СО СЛОЖНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ,
СОДЕРЖАЩИХ НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

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 64Т.

Отпечатано с готового оригинал–макета

Типография СГУ.

410012, Саратов, Большая Казачья, 112а, корпус 8.