

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Круглова Вячеслава Павловича "Конечномерные и распределенные системы  
кольцевой структуры, генерирующие грубый хаос», представленной на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.03 – Радиофизика

**Актуальность темы диссертации.** Нелинейные системы со сложной динамикой возникают в самых разных предметных областях, и зачастую им отвечают одни и те же универсальные математические модели. При этом так как реальные системы почти всегда включают в себя большое количество взаимодействующих элементов, для их исследования наиболее адекватными являются математические модели, наиболее точно моделирующие реальную систему. Принципиальным для практического использования генераторов хаоса является вопрос воспроизводимости устройств от образца к образцу и чувствительности хаотических режимов к изменению внешних и внутренних параметров с большим числом степеней свободы. Среди хаотических систем свойством грубости обладают системы с однородной гиперболичностью. Гиперболические аттракторы отвечают динамике с сильными хаотическими свойствами и допускают далеко идущий математический анализ. Несмотря на значительный многолетний интерес исследователей к таким системам, количество не решённых задач по-прежнему велико из-за их высокой сложности и ресурсоёмкости. В этой связи актуальными являются разработка новых универсальных математических моделей нелинейных систем радиофизики и электроники с высокой размерностью, в том числе с привлечением новых методов. Данная диссертационная работа актуальна и обусловлена именно решением выше перечисленных задач.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Научные положения, выводы, сформулированные в диссертации можно считать обоснованными, проработанными на достаточно высоком научно исследовательском уровне. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов, рекомендаций и заключений, полученных

в диссертации, подтверждается корректным использованием современных методов математического анализа, компьютерной алгебры, математического моделирования, методов нелинейной динамики, методов идентификации и вычислительных алгоритмов. Достоверность полученных результатов подтверждается также приведенными результатами компьютерных экспериментов, апробацией основных результатов на конференциях и семинарах, в опубликованных работах.

**Достоверность, новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Достоверность работы определяется применением апробированных в радиофизике подходов к конструированию кольцевых схем, содержащих нелинейные элементы, а также распределенных систем на основе модификации эталонных моделей, выработанных в теории нелинейных волн, использованием схем численного решения уравнений, обеспечивающих аппроксимацию и устойчивость при тестируемом надлежащим образом выборе шагов интегрирования. Новизна работы определяется предложенными новыми схемам кольцевых неавтономных систем, генерирующих хаос, обусловленный присутствием аттрактора в виде соленоида Смейла-Вильямса в фазовом пространстве отображения Пуанкаре. В качестве примера впервые предложена автономная распределенная система, описываемая уравнениями с частными производными, где реализуется гиперболический аттрактор типа Смейла-Вильямса. Впервые показана возможность реализации гиперболического хаоса в модельной распределенной системе типа реакция – диффузия при периодической модуляции коэффициентов диффузии. Впервые проведена проверка гиперболичности аттракторов на основе анализа статистики пересечения углов в отношении конечномерных моделей распределенных систем, построенных методом Галеркина.

**Значимость для науки и практики, полученных автором результатов** определяется тем, что указаны новые примеры систем с гиперболическим хаосом, допускающих физическую реализацию, что существенно расширяет круг объектов, к которым применима строгая математическая теория. Практическая значимость работы определяется тем, что она открывает возможность создания генера-

торов хаоса в радиофизике и электронике, характеризующихся свойством грубости, то есть малой чувствительностью к изменению параметров, помехам, погрешностям изготовления, что является принципиальным преимуществом с точки зрения возможных приложений хаоса.

**Содержание диссертации, ее завершенность.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Объем основной части диссертации 87 страниц. Общий объем работы составляет 140 страниц. В работу вошло 45 страниц рисунков; список литературы состоит из 51 наименования. Список публикаций по теме диссертации содержит 25 наименований, из них статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК – 7, статей в сборниках и тезисов докладов – 19. Следует особо отметить высокий уровень публикаций автора, рейтинг и impact factor журналов в которых были опубликованы статьи, а так же уровень количество международных конференций, где были доложены результаты диссертации. Например, журнал «Communications in Non-linear Science and Numerical Simulation» имеет Impact Factor: 2.834, Quartiles Q1 (Applied Mathematics, Modeling and Simulation, Numerical Analysis).

Во введении автор определяет объект исследования, обосновывает актуальность своей работы, дает подробный обзор литературы по теме исследования, обосновывает практическую ценность полученных результатов и приводит основные положения, вынесенные на защиту.

Следует отметить, что каждая глава начинается с введения, в котором приводится обзор состояния исследований по теме данной главы. Такой стиль изложения помогает более детально прояснить личный вклад автора диссертации и при чтении повышает интерес к представленному материалу.

В первой главе «Кольцевые неавтономные генераторы гиперболического хаоса на основе базовых элементов радиоэлектроники» автором рассмотрены варианты построения систем кольцевой структуры, содержащих два полосовых фильтра и элемент с квадратичной нелинейностью и насыщением. Автор показал, что функционирование схемы в одном варианте обеспечивается периодическим воздействием на систему последовательности радиоимпульсов или, в другом ва-

рианте – модулированного сигнала с синусоидальной огибающей. Автором построена математическая модель, для неавтономной системы обыкновенных дифференциальных уравнений четвертого порядка. Произведен также переход к уравнениям для медленных комплексных амплитуд и к отображению возврата Пуанкаре. В предложенных системах реализуется гиперболический хаотический аттрактор. Следует отметить, что глава хорошо структурирована. Приводится множество хорошо подобранных модельных расчетов и соответствующих рисунков. В прочем это относится ко всей диссертации.

Во второй главе «Автономная система с аттрактором Смейла-Вильямса на основе кольцевой структуры из осцилляторов ван дер Поля с резонансным механизмом передачи возбуждения» рассмотрена автономная система с аттрактором типа Смейла-Вильямса, динамика которой осуществляется вблизи гетероклинического цикла кольцевой цепочки из автогенераторов при поочередной активации элементов с передачей возбуждения по кольцу. Большое число элементов вводится для того, чтобы обеспечить резонансную передачу возбуждения между соседними звеньями по кольцу, собственные частоты которых близки. При этом собственные частоты постепенно уменьшаются от начала к концу цепи, так что частоты первого и последнего осцилляторов отличаются в два раза, а передача возбуждения между последним и первым элементами цепи осуществляется через квадратичный нелинейный элемент, так что частота и фаза колебаний удваиваются. Считаю очень красивой и оригинальной рассмотренную систему с аттрактором типа Смейла-Вильямса.

В третьей главе «Пространственно распределенные системы с аттрактором Смейла-Вильямса» рассматриваются примеры распределенных систем, демонстрирующих гиперболический хаос и описываемых уравнениями с частными производными. Первая модель – это автономная система, построенная на основе модификации уравнения Свифта–Хохенберга. Вторая распределенная система – неавтономная, сконструированная на базе модели реакция – диффузия типа бруселятора с периодически модулированными коэффициентами диффузии. Результаты численного исследования, проведенные в этой главе говорят о присутствии

аттрактора Смейла-Вильямса в фазовом пространстве предложенных систем. Делается вывод о возможной реализации электронных или оптических устройств, основанных на этих моделях.

В четвертой главе «Компьютерная проверка гиперболической природы аттракторов: анализ статистики распределения углов пересечения устойчивых и неустойчивых многообразий» произведена компьютерная проверка гиперболической природы аттракторов систем, рассмотренных в предыдущих главах диссертации, и некоторых других примеров. Метод численной проверки гиперболичности основан на свойстве трансверсальности многообразий гиперболических аттракторов. Благодаря использованию новой модификации алгоритма, объем вычислений оказывается относительно небольшим, что позволяет эффективно применять тест к системам произвольной размерности. В главе продемонстрированы типичные атрибуты динамики на однородно гиперболическом аттракторе для систем, предложенных в главах 1 и 3. Представлены распределения углов между устойчивым и неустойчивым многообразиями аттракторов. Отмечено отсутствие касаний между многообразиями. Результаты позволяют предполагать, что аттракторы предложенных систем действительно принадлежат к классу однородно гиперболических.

Таким образом, характеризуя кандидатскую диссертацию В.П. Круглова в целом следует отметить, что она представляет собой научное достижение в области математического моделирования нелинейных систем радиофизики и электроники с высокой размерностью и со сложной динамикой поведения.

По диссертации можно сделать несколько замечаний, часть из которых носит характер пожеланий, которые не влияют на общую высокую оценку диссертации:

1. В главе 1, параграф 1.1 приведены модельные уравнения системы (1.1) в безразмерных переменных. Возникает вопрос: каким образом вводятся безразмерные переменные? Об этом автор не упоминает. Аналогичный вопрос возникает по модельным уравнениям системы (1.11) в пункте 1.2.

2. В параграфе 1.3 система дифференциальных уравнений (1.17) записана в размерном или в безразмерном виде? В работе это не уточняется.
3. Чем обоснован выбор метода Рунге-Кутты 4-го порядка? Проводилось ли сравнение эффективности методов Рунге-Кутты более высокого порядка?
4. Электронной версии диссертации графики и рисунки представлены в цвете, в бумажном варианте все рисунки и графики черно-белые, что затрудняет чтение. Например «Рис. 1.13. Спектры плотности мощности сигналов от первого (синий) и второго (красный) осцилляторов ...», «Рис. 1.25. Спектры плотности мощности сигналов от первого (красный) и второго (синий) осцилляторов.....». Если не иметь электронного варианта диссертации, то трудно понять, где синий, где красный цвет. Наверное, можно было все графики распечатать в цвете, что улучшило бы восприятие и облегчило бы чтение.
5. В первой главе изучаются три типа генератора хаоса: Генератор хаоса на основе кольцевой схемы с нелинейным элементом, управляемым периодической последовательностью радиоимпульсов с прямоугольной огибающей, генератор хаоса на основе кольцевой схемы с нелинейным элементом, управляемым периодической последовательностью радиоимпульсов с гладкой огибающей, генератор хаоса на основе кольцевой схемы с нелинейным элементом и периодически перестраиваемым полосовым фильтром. В выводах по главе можно было бы привести сводную сравнительную таблицу полученных результатов (временные зависимости динамических переменных, спектры плотности мощности сигналов, аттрактор исходной системы, аттрактор системы в сечении Пуанкаре на плоскости динамических переменных и т. д.) для трех типов генераторов, что позволило бы наглядно и быстро сравнить и оценить полученные результаты. Это украсило бы работу.
6. Замечание касательно оформления работы: Блок-схему на стр. 17 можно перенести на стр. 15, рис. 1.2 и рис. 1.3 можно расположить на одной странице, аналогично рис. 1.17 и рис. 1.16 можно расположить на одной странице, непонятно, зачем пустое место на стр. 47, рис. 1.24 можно перенести со страницы 58 на страницу 57, аналогично можно разместить рис. 1.26 и рис. 1.27 на одной стра-

нице, не понятно висячая строка на странице 70, всего одна строчка на всю страничку и. т. д.

7. На мой взгляд, список литературы оформлен несколько небрежно, нет унификации согласно одному какому то требованию.

Например:

[20] Anishchenko V.S., Kopeikin A.S., Kurths J., Vadivasova T.E., Strelkova G.I. Studying hyperbolicity in chaotic systems // Physics Letters A. 2000. vol 270. p. 301-307. и

[22] F.J. Harris. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform //Proceedings of the IEEE. 1978. vol. 66. p. 51. В работе [20] инициалы перед фамилией, а в работе [22] инициалы после фамилии. Аналогично [26], [33], [37], [38].

Указанные замечания, высказанные в отзыве не снижают общего научного уровня работы.

Диссертация в целом хорошо структурирована и оформлена, материал изложен ясно. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы. Чувствуется высокая квалификация автора и его научная зрелость. Что подтверждается поддержкой исследований грантами РФФИ, грантом Президента РФ поддержки научных школ НШ, грантом Президента РФ для молодых ученых, грантом DAAD грантом Российского научного фонда в которых автор диссертации был как руководителем работ, так и исполнителем.

Все пять выносимых на защиту научных положений сформулированы правильно и обоснованно. Многочисленные высокого качества графики и рисунки хорошо иллюстрируют основные результаты работы и защищаемы положения.

Автор умеет дать простую физическую интерпретацию полученным результатам. Все основные научные результаты опубликованы как самим автором, так и в соавторстве с членами научной группы.

Следует отметить, что автор диссертации в публикациях стоит как первым автором, так и последним. Это говорит о способности автора ставить и решать научные проблемы, и руководить коллективом исполнителей.

Основные результаты опубликованы в ведущих отечественных и международных рецензируемых журналах: Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика, Нелинейная динамика, Regular and Chaotic Dynamics, Communications in Non-linear Science and Numerical Simulation.

Автореферат дает исчерпывающее представление о содержании диссертации.

Таким образом, диссертация Круглова Вячеслава Павловича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, состоящей в исследовании физически реализуемых систем кольцевой структуры с грубой хаотической динамикой, имеющей существенное значение для радиофизики, что соответствует требованиям п. 7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры  
«Прикладная математика и системный анализ»,  
Саратовского государственного  
технического университета им. Гагарина Ю.А.  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая 77,  
+7 (8452) 998825, [anton.krysko@gmail.com](mailto:anton.krysko@gmail.com)

Крысько А.В.

Подпись д.ф.-м.н., профессора Крысько А.В. заверяю  
Ученый секретарь,  
Ученого Совета СГТУ имени Гагарина Ю.А.  
д.т.н., профессор



Бочкарев П.Ю.

11.08.2016