



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе СПбГУ

С.В. Микушев

«15» февраля 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» на диссертационную работу Кузнецовой Оксаны Игоревны на тему «Конструирование экстремально мультистабильных хаотических систем и их использование для преобразования информации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

С момента своего появления в середине прошлого века теория хаоса была интегрирована практически во все научные дисциплины: от физики до техники, биологии, медицины, химии и экономики. Из-за своей высокой чувствительности к изменениям параметров и начальным условиям хаотические системы оказались очень полезными в приложениях, требующих использования систем высокой сложности. В настоящее время хаотические сигналы и системы широко используются, в частности, для шифрования изображений и осуществления безопасной связи. Для скрытия передаваемой информации в системах коммуникаций и аудиосхемах шифрования наибольший интерес представляют экстремально мультистабильные системы, содержащие бесконечное число сосуществующих аттракторов, как самовозбуждающихся, так и скрытых. Специальный выбор начальных условий в таких системах может играть роль «секретного ключа», позволяющего эффективно маскировать передаваемую информацию. По этой причине последние годы многие исследователи, как это наглядно продемонстрировано в представленном в диссертации обзоре литературы, сосредоточились на разработке различных подходов к конструированию экстремально мультистабильных систем и созданию на их основе алгоритмов шифрования. Именно в этом направлении выполнена и представленная диссертационная работа, что свидетельствует об актуальности темы исследования.

Существуют различные подходы к созданию новых хаотических систем. Один из подходов – рассмотреть существующую хаотическую систему и изменить ее, добавив дополнительные члены в дифференциальные уравнения, описывающие систему, или модифицировать существующий член, или даже добавить новые состояния в систему и изменить её порядок. В качестве отправной точки во всех построениях диссертации О.И. Кузнецовой использованы системы в форме Лурье. Такой выбор оправдан несколькими обстоятельствами. Во-первых, системы в форме Лурье исследовались многими авторами на протяжении долгого времени и известно много примеров таких систем, которые содержат хаотические аттракторы. Если при этом линейная часть системы обладает некоторыми специальными свойствами, описанными в диссертации, то на ее основе можно сконструировать мегастабильную систему, то есть систему, обладающую счетным числом хаотических аттракторов, на основе простой хаотической системы. Во-вторых, система в форме Лурье всегда может быть неособым преобразованием приведена к системе каскадного типа, для которой легко применить процедуру усиления смещения (offset boosting), и тем самым построить систему, обладающую многомерной решеткой хаотических аттракторов. В-третьих, именно для систем в форме Лурье были разработаны численно-аналитические методы поиска скрытых аттракторов, которые подсказывают путь к построению однопараметрических систем-хамелеонов, то есть систем, демонстрирующих самовозбуждающиеся или скрытые аттракторы при различных значениях параметра. Все описанные выше возможности, предоставляемые использованием систем в форме Лурье, реализованы в диссертационной работе, что определяет ее **теоретическую значимость и новизну**.

Метод синтезирования однопараметрических систем-хамелеонов, предложенный автором в первой главе диссертации, опирается на идею продолжения по параметру, использовавшуюся ранее для поиска скрытых аттракторов в динамических системах в форме Лурье. В диссертации приведен ряд примеров синтезирования систем-хамелеонов. Хочется особо выделить систему, представленную в разделе 1.7.4, в которой при различных значениях параметра демонстрируется наличие как самовозбуждающихся хаотических аттракторов, так и бесконечного числа скрытых аттракторов-близнецов.

Во второй главе диссертации предложено два подхода к конструированию мегастабильных систем на основе известных систем в форме Лурье, содержащих самовозбуждающиеся или скрытые хаотические аттракторы. Первый подход выделяет класс систем, которые путем периодизации нелинейности могут быть трансформированы в системы с угловой координатой. К таким системам относятся, в частности, детально исследованные системы Чуа. На ряде примеров наглядно продемонстрировано, что предложенный подход позволяет синтезировать системы, содержащие 1-D решетку идентичных хаотических аттракторов

(самовозбуждающихся или скрытых). Другой подход к конструированию систем, содержащих многомерные решетки хаотических аттракторов, предполагает реализацию двух этапов. Сначала система в форме Лурье, содержащая хаотический аттрактор, неособым преобразованием приводится к системе каскадного типа. Потом некоторые переменные в полученной системе заменяются периодическими функциями этих переменных (реализуется процедура offset boosting), и тем самым конструируется самовоспроизводящаяся система, содержащая многомерную решетку идентичных аттракторов (примеры 2.3.1-2.3.3). Для jerk-систем, являющихся системами каскадного типа, можно сразу перейти к реализации второго этапа описанной процедуры. В разделах 2.3.4 и 2.3.5 проиллюстрировано построение систем с 2-D и 3-D решеткой скрытых хаотических аттракторов на основе jerk-системы 4-го порядка, содержащей самовозбуждающийся аттрактор.

В третьей главе предложен метод конструирования n -мерных мегастабильных систем, содержащих n -D решетку хаотических аттракторов путем синтеза приемов из главы 2. В разделах 3.1.1 и 3.1.2, на основе классической системы Чуа построены трехмерные системы с 3-D решеткой хаотических аттракторов. В разделе 3.1.3 впервые построена четырехмерная система с 4-D решеткой хаотических аттракторов.

Единственный результат, полученный в диссертации, который не связан с системами в форме Лурье, представлен в разделе 3.2 третьей главы. Этот результат связан с предложением J.C. Sprott сконструировать новый класс систем без состояний равновесия, содержащих скрытый хаотический аттрактор размерности «почти 3». Эта задача была успешно решена в диссертации. Более того, на основе найденной системы сконструирована мегастабильная система, содержащая 2-D полосу скрытых хаотических аттракторов.

Практическое значение диссертационной работы ярко продемонстрировано в её заключительной главе. Построенные автором в третьей главе диссертации мегастабильные хаотические системы применяются для обеспечения безопасной связи на основе стратегии адаптивной синхронизации между парой идентичных хаотических систем, разработанной на кафедре прикладной кибернетики СПбГУ. Эффективность предложенных диссертантом методов шифрования в системах связи подтверждена многочисленными тестовыми примерами передачи маскированных сообщений, представленных как обычным текстом, так и видео, и аудио сигналами. Полученные результаты оформлены в виде программ для ЭВМ, на которые получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ.

По работе имеются замечания.

1. На стр. 40 диссертации утверждается, что при $\varepsilon \in [0, 0.78)$ система (1.7.4.1) - (1.7.4.2) с нелинейностью (1.7.4.3) имеет мультивитковые

аттракторы, которые являются самовозбуждающимися из любой точки окрестности всех состояний равновесия $z_1 = z_2 = 0$, $\sigma = \pi m$, $m \in Z$. По-видимому, на самом деле, в указанном диапазоне изменения параметра система имеет один аттрактор, неограниченно простирающийся в направлении оси фазовой координаты σ системы (1.7.4.1) - (1.7.4.2) с нелинейностью (1.7.4.3).

2. При построении многочисленных примеров в диссертации автор с помощью линейного преобразования $y = Mx$ преобразует рассматриваемую систему в форме Лурье в систему каскадного типа. Если при этом аттрактор исходной системы был скрытым, то для его отыскания в новом базисе требуется знать явное выражение для матрицы преобразования. В диссертации матрица преобразования выписана явно только для системы Чуа (стр. 74). Целесообразно было бы описать алгоритм нахождения матрицы M в общем случае.

3. В тексте диссертации не везде указано, каким методом проводилось численное интегрирование систем в процессе визуализации их траекторий.

Диссертация Кузнецовой Оксаны Игоревны является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, имеющее важные теоретическое и прикладное значения. Результаты диссертационной работы могут быть использованы специалистами в области качественной теории дифференциальных уравнений и теории нелинейных колебаний для конструирования экстремально мультистабильных систем, допускающих широкий спектр прикладного использования. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в научных центрах, занимающихся изучением нелинейной динамики и динамического хаоса (ФГБУН «Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»), образовательных учреждениях страны (кафедра прикладной кибернетики Санкт-Петербургского государственного университета, кафедра математической кибернетики Московского авиационного института, кафедра математической кибернетики и компьютерных наук Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского и других).

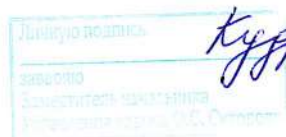
Основные результаты диссертации в достаточной степени опубликованы в научной печати. Опубликовано 21 работа (в том числе, две статьи в журналах, индексируемых в базе Scopus, пять публикаций в изданиях, индексируемых в базе Scopus и рекомендованных ВАК РФ и две публикации, в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, являющихся государственными программами для ЭВМ). Работа прошла апробацию на конференциях различного уровня. Автореферат диссертации в достаточном объеме отражает основные результаты, полученные в работе. Высказанные замечания не снижают ценность работы.

Таким образом, диссертационная работа Кузнецовой О.И. «Конструирование экстремально мультистабильных хаотических систем и их использование для преобразования информации» отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям; а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником кафедры прикладной кибернетики СПбГУ Е.В. Кудряшовой.

Доклад по диссертации заслушан, отзыв рассмотрен и обсужден на заседании кафедры прикладной кибернетики Санкт-Петербургского государственного университета «13» февраля 2024, протокол № 44/8/16-02-2.

Ведущий научный сотрудник кафедры
прикладной кибернетики СПбГУ,
Ph. D., доктор физико-математических наук
Елена Владимировна Кудряшова
тел. +7- 921 328-45-12; e-mail: e.kudryashova@spbu.ru



Кузнецовой О.И.
Е.В. Кудряшова



Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский
государственный университет»
Адрес: 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7-9.
Телефон (812) 328-97-01
E-mail: spbu@spbu.ru