

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Рыбаловой Елены Владиславовны

«Влияние неоднородностей и внешних воздействий на формирование и синхронизацию пространственно-временных структур в ансамблях нелинейных осцилляторов»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика

Исследование ансамблей осцилляторов является одной из фундаментальных задач радиофизики. Взаимодействие элементов может приводить к различным нелинейным эффектам, начиная от классического явления синхронизации, когда элементы ансамбля подстраивают свои частоты к единому ритму. До, наоборот, появления в ансамблях сложного, в том числе хаотического поведения, и пространственно-временных структур, которые возникают в результате их взаимодействия. На поведение ансамбля влияет большое количество различных факторов: идентичность подсистем, тип связи, автономная динамика, наличие свойства мультистабильности и др. Отдельный интерес представляет вопрос устойчивости проявляющихся в ансамблях эффектов к шумам. Обрисованный круг вопросов и задач по-своему интересен, что связано, прежде всего, с фундаментальной важностью изучения данной проблемы. Также стоит отметить, что ансамбли связанных осцилляторов и проявляющиеся в них нелинейные эффекты могут найти практическое применение, например, в задачах моделирования каскадных электрических сетей, при анализе биологических систем, например коннектома мозга и пр. Таким образом, можно заключить, что данное научное направление является актуальным и перспективным в области радиофизики, а также может быть применено для других междисциплинарных областей.

Диссертационная работа Рыбаловой Елены Владиславовны посвящена исследованию ансамблей связанных осцилляторов, изучению пространственно-временных структур в них с особым акцентом на выявление особенностей, проявляющихся при шумовых воздействиях. В качестве объектов исследования выбран широкий класс моделей с различным динамическим поведением, начиная от простейших классических отображений: логистическое отображение, отображение Эно, в которых наблюдаются хаотические квази-аттракторы, не обладающие свойством грубости, чувствительные к малым изменениям параметров, шума; так и отображения, имеющие в качестве аттрактора псевдогиперболические хаотические аттракторы (отображение Лози). Также представлены результаты для ансамблей

моделей Фитцхью-Нагумо, описывающих поведение нейронов. В работе рассматриваются особенности синхронизации в многослойных сетях, каждый слой которой имеет свою динамическую специфику. Диссертационная работа характеризуется органичным сочетанием фундаментальных аспектов изучаемых явлений и их возможных приложений и полностью соответствует специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Диссертация (общий объем 199 стр., включая 75 иллюстраций) состоит из введения, трех глав и заключения. Список литературы содержит 175 наименований. Диссертационная работа имеет логично организованную структуру, характеризуется последовательным изложением результатов и качественным графическим оформлением.

Во **введении** автором обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель диссертационной работы, основные задачи исследования, позволяющие достичь сформулированной цели, представлено описание научной новизны, теоретической и практической значимости полученных результатов, приведены аргументы в пользу их достоверности, сформулированы четыре положения, выносимых на защиту, приведены сведения об апробации результатов и публикациях, описан личный вклад соискателя.

Оригинальный материал диссертационного исследования изложен в трех главах. В первом подразделе каждой главы представлен краткий обзор литературы и описание основных известных результатов, открытые проблемы, а также указываются работы соискателя, в которых опубликованы результаты данной главы, затем излагаются оригинальные результаты.

В **первой главе** представлено исследование влияния аддитивного и мультипликативного шума на пространственно-временные химерные структуры в кольце нелокально связанных нелинейных осцилляторов. В качестве подсистем рассмотрен широкий круг моделей: логистическое отображение, модифицированное отображение Рикера, модифицированное кубическое отображение, отображение Эно, дискретный осциллятор ван дер Поля, осциллятор Фитцхью-Нагумо. Изучены различные виды шумового воздействия, включая аддитивный шум; шумовую модуляцию и случайное распределения параметров парциальных систем; шумовая модуляция силы связи. Показано, что в моделях наблюдается резонансно-подобный эффект, когда существует определенный интервал интенсивность шума, внутри которого вероятность проявления химер становится максимальной и значительно увеличивается интервал наблюдения данных структур по силе связи в ансамбле. Исследованы вероятности проявления химерных структур при введении случайной

неидентичности по параметру, показаны способы, увеличивающие вероятность проявления химерных структур.

Во **второй главе** проводится исследование влияния независимых источников аддитивного и мультипликативного шумов на уединенные пространственно-временные структуры. В качестве объектов исследования использованы отображения Лози, Эно-Лози и потоковые осцилляторы Фитцхью-Нагумо. Исследованы различные виды шумового воздействия, аддитивный шум, шумовая модуляция параметров парциальных систем ансамбля, шумовая модуляция параметра связи парциальных систем в ансамбле. Показано, что при аддитивном шумовом воздействии и шумовой модуляции параметров наблюдается уменьшение интервала по параметру связи, где проявляется уединенное состояние.

Третья глава посвящена изучению явления синхронизации в многослойных сетях взаимодействующих ансамблей. Рассмотрены двухслойные и трехслойные сети. В качестве объектов выбраны различные осцилляторы, что позволяет моделировать гетерогенные сети, пространственно-временные структуры каждого слоя в этом случае имеют свою специфику. Исследованы различные типы синхронизации: полная, удаленная, частичная. Проведены исследования особенностей синхронизации с учетом различной разреженности связи, которая приводит к вынужденной и взаимной синхронизации химерных и уединенных состояний в двухслойной гетерогенной сети. Для трехслойной гетерогенной сети показано, что возможно установление удаленной и полной синхронизации химерных и удаленных пространственно-временных структур, при этом химерные состояния в передающем (среднем) слое не влияют на порог синхронизации.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Наиболее важными результатами диссертационной работы, на мой взгляд, являются следующие:

1. Открытие резонансо-подобного эффекта в ансамблях нелокально связанных хаотических отображений, который заключается в увеличении вероятности установления и наблюдения фазовых химер.
2. Развитие методов для анализа ансамблей большого размера: а) автоматический анализ пространственно-временных структур, их детектирование на основе расчета коэффициентов взаимной корреляции; б) метод оценки синхронизации пространственно-временных структур в многослойных сетях.

3. Обнаружение удаленной (опосредованной) и полной синхронизации в гетерогенной трехслойной сети, когда ансамбли в слоях имеют принципиально отличное поведение.

Научные результаты, изложенные в диссертационной работе, являются новыми и оригинальными, что подтверждается их публикацией в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах с высоким импакт-фактором, индексируемых международными базами данных (Web of Science, Scopus) и Russian Science Citation Index. Среди научных работ, опубликованных соискателем, присутствуют статьи в таких известных журналах как «Chaos», «Chaos, Solitons & Fractals», «Regular and Chaotic Dynamics», «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика», «Journal of Difference Equations and Applications», что подтверждает высокий уровень научных результатов, полученных соискателем.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертационной работы Рыбаловой Е.В. обеспечивается применением хорошо известных и общепринятых моделей, проведением численных экспериментов для различных систем, для различных выбранных случайным образом начальных условий.

По диссертации имеется ряд вопросов и замечаний:

1. Одним из достоинств работы является широкий круг моделей, анализ которых был проведен и для которых были получены основные результаты, описаны явления. Однако в работе слабо описаны свойства базовых моделей, в чем их принципиальное отличие друг от друга и специфика. Так, например, указано, что система обладает свойством мультистабильности (бистабильности), при этом не понятно какие типы аттракторов сосуществуют. Для логистического отображения и отображения Эно указано, что для них характерно развитие хаоса через каскад бифуркаций удвоения периода, а для других моделей эти вопросы не обсуждаются. Для отображения Эно-Лози обсуждается, что при $\varepsilon \rightarrow 0$ отображение трансформируется в отображение Лози, при этом не обсуждаются другие варианты и как это влияет на динамику, проявляется ли в ансамбле. Для лучшего понимания было бы неплохо представить аттракторы в базовых моделях.
2. В главе 1 рассматривается дискретный осциллятор ван дер Поля не понятно какую динамику он демонстрирует в автономном случае, если проводить аналогию с потоковой моделью, то это должна быть инвариантная кривая, происходит ли ее разрушение, как это влияет на поведение ансамбля.

3. Текст в основном носит описательный характер наблюдаемых переходов и динамических режимов. Было бы хорошо описать причины (механизмы) таких переходов. Если такие механизмы известны, то указать их и дать соответствующие ссылки.
4. В разделе 1.2.4 результаты по исследованию отображения Рикера и кубического отображения представлены текстом без иллюстраций и дан комментарий, что по данным результатам планируется публикация. Думаю, что данный шаг был сделан в связи с избыточностью материалов в диссертации. Но как раз в таком случае на мой взгляд было бы более правильно сократить результаты и иллюстрации, которые уже опубликованы, а добавить те, которые не опубликованы.
5. По тексту имеется небольшое количество опечаток, терминологических вопросов. Так, например, кажется не совсем корректным выражение «смерть мультихимерных состояний». Можно было найти русский вариант для термина «patched synchrony».

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы. Диссертация Рыбаловой Е.В. представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой получен ряд интересных и важных результатов, существенно дополняющих разделы радиофизики в части теории колебаний и волн, нелинейной динамики.

По результатам диссертационной работы опубликовано 15 статей в центральных рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, входящих в международные базы данных Web of Science и/или Scopus, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, получено 6 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ на разработанные автором и используемые при выполнении диссертационной работы программные комплексы. Результаты диссертационной работы были широко представлены на различных международных и всероссийских конференциях, по материалам которых опубликовано 8 статей в сборниках трудов конференций.

Научные положения и выводы, представленные в диссертации, являются обоснованными и могут быть рекомендованы к использованию в исследованиях фундаментального и прикладного характера как в области радиофизики, теории колебаний и волн, нелинейной динамики, так и других смежных наук, опирающихся на исследование ансамблей осцилляторов и пространственно-временных структур.

Автореферат содержит всю необходимую информацию и адекватно отражает содержание диссертации.

Таким образом, считаю, что диссертационная работа Рыбаловой Елены Владиславовны вносит важный вклад в область радиофизики, связанную с изучением сложного поведения ансамблей осцилляторов. Работа удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Рыбалова Елена Владиславовна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Официальный оппонент

Младший научный сотрудник международной лаборатории динамических систем и приложений Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», г. Нижний Новгород, кандидат физико-математических наук (01.04.03 - радиофизика), доцент



Станкевич Наталия Владимировна

«22» сентября 2023 г.

Почтовый адрес: 603155, г. Нижний Новгород, Б. Печерская ул., д. 25/12, телефон: +7(903)3290994, e-mail: stankevichnv@mail.ru

Подпись Станкевич Н.В. заверяю



Подпись
ЗАВЕРЕНА НАЧАЛЬНИКОМ
ОТДЕЛА КАДРОВ
Н.А. ЕРМОЛИНОЙ

Станкевич Н.В.

