

## О Т З Ы В   О Ф И Ц И А Л Ъ Н О Г О   О П П О Н Е Н Т А

на диссертацию Шепелева Игоря Александровича  
«БЕГУЩИЕ ВОЛНЫ И СЛОЖНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СТРУКТУРЫ В  
АКТИВНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ  
ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ», представленной на соискание учёной  
степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.03 – радиофизика.

Исследование пространственно-временного поведения активных сред относится к числу тех задач нелинейной физики, интерес к которым не только не ослабевает, но и постоянно растет. Важный класс активных сред образуют системы, состоящие из большого числа взаимодействующих между собой активных элементов. Характерной особенностью таких сред является дискретность их пространственных координат, роль которых играют номера элементов. В частности, к ним относятся такие радиофизические системы как сети синхронизации и джозефсоновских контактов, фазированные антенные и лазерные решетки, искусственные нейронные сети и др. Широкое распространение и разнообразная динамика элементов, образующих такие среды, постоянно стимулирует их теоретические и экспериментальные исследования. Именно к этому актуальному направлению нелинейной физики и радиофизики относится диссертация И.А. Шепелева, посвященная изучению волновых структур в активных дискретных средах с периодическими граничными условиями.

В первой главе диссертации рассматривается кольцевая цепочка осцилляторов ФитцХью-Нагумо, взаимодействующих посредством так называемой «диффузионной» связи. Автор аппроксимировал исходную кольцевую цепочку соответствующей распределенной системой с непрерывным временем и периодическими граничными условиями. Провел численное исследование волновой динамики этой системы для двух значений параметра, характеризующего степень релаксационности среды. В обоих случаях получил разбиение плоскости двух контрольных параметров на области, соответствующие различным волновым структурам среды. Он сравнил эти разбиения с соответствующей двухпараметрической бифуркационной диаграммой отдельного элемента цепочки и установил некоторые закономерности в соотношении волновой динамики и динамики парциального элемента. Два последних параграфа этой главы посвящены исследованию эффектов вынужденной синхронизации периодических бегущих волн в

бистабильной среде при локальном и распределенном внешнем воздействии. В обоих случаях было установлено существование режимов частотной синхронизации для нескольких типов волн и найдены их полосы синхронизации. При этом амплитуда внешнего воздействия была зафиксирована и выбиралась из соображений сохранения существования волны, хотя ее профиль мог меняться.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию пространственно-временной динамики двух кольцевых систем с однонаправленными связями. Проведено исследование бегущих волн в кольцевой системе линейно-связанных осцилляторов Дюффинга с диссипацией. На фазовой плоскости элемента существует два устойчивых состояния равновесия, области притяжения которых разделяются устойчивыми сепаратрисами седла. Автор развивает тот же, что и в главе 1, подход, т.е. переходит от цепочечной структуры к непрерывной среде и численно исследует соответствующую систему в частных производных. Он установил существование разнообразных волновых структур: стационарных, периодических бегущих волн и хаотических во времени, но периодических в пространстве, колебаний. Вторая кольцевая цепочка состоит из диссипативных линейных осцилляторов взаимодействующих посредством нелинейных связей. Диссертант провел численное исследование пространственно-временной динамики в зависимости от «силы» связи между элементами. Обнаружил, что колебания в цепочке возникают, если коэффициент связи превышает некоторое критическое значение. При увеличении этого параметра в цепочке сначала возникает режим перемежаемости во времени. Дальнейшее увеличение коэффициента связи приводит к режиму, названному автором «вращающейся химерой». В этом режиме по кольцу распространяется волна, профиль которой имеет спайк-берстовую форму.

Третья и четвертая часть главы диссертации посвящены изучению так называемых химерных состояний. В классическом определении химерным состоянием называется такое состояние сети тождественных осцилляторов, при котором одна часть осцилляторов сети совершает когерентные колебания с единой для этой части частотой, а колебания других осцилляторов являются некогерентными. В диссертации, в основном, под химерным состоянием понимается состояние, характеризующее существованием кластеров, одни из которых состоят из осцилляторов, переменные которых изменяются во времени согласованно, а переменные осцилляторов из других кластеров изменяются несогласованно.

В третьей главе изучается динамика кольцевой цепочки нелокально и нелинейно-связанных кубических точечных отображений, т.е. динамической системы с дискретным временем. Рассматривается два типа динамики

парциального отображения: регулярной, когда аттракторами являются лишь две устойчивые неподвижные точки и хаотической. В обоих случаях обнаружены химерные состояния (в диссертации называются «двухъямными»), имеющие два кластера несогласованного поведения. Диссертант установил также, что режимы подобные двухъямным химерным состояниям существуют в кольцевых цепочках осцилляторов с непрерывным временем, состоящих из осцилляторов Чуа, находящихся в режиме хаотических колебаний, соответствующих так называемому аттрактору «double scroll», и осцилляторов Лоренца, находящихся в режиме квазигиперболического аттрактора. Установлено, что динамика этих кольцевых систем является достаточно сложной и не исчерпывается лишь существованием двухъямных химер. Например, в кольце систем Лоренца диссертант обнаружил режимы перемежаемости, существования уединенных состояний, когда в цепочке отдельные осцилляторы ведут себя обособленно и не принадлежат никаким кластерам и др.

Далее в этой главе численно изучается пространственно-временная динамика кольцевой цепочки нелокально-связанных осцилляторов ФитцХью-Нагумо находящихся в бистабильном режиме. Построена диаграмма режимов на плоскости параметров «радиус» — «сила связи». Показано существование бегущих волн, двухъямных химерных состояний и др. Установлено, что эти химерные состояния по своим характеристикам отличаются от двухъямных химер, обнаруженных в других областях параметров: согласованный кластер химерного состояния формируется из состояний равновесия парциальных осцилляторов, а не согласованные колебания могут быть как регулярными, так и хаотическими.

В следующем разделе этой главы изучаются химерные состояния в двумерной решетке нелокально-связанных кубических отображений. Построено разбиение плоскости параметров «радиус связи» — «сила связи» на области, соответствующие различному пространственно-временному поведению решетки: одноямных и двухъямных химерных состояний, стационарных структур, пространственно-временного хаоса и др.

В заключительном разделе третьей главы основное внимание уделяется изучению уединенных состояний в двумерной решетке нелокально связанных отображений. Установлено, что для глобального или близкого к глобальному типу связей характерно формирование уединенных состояний, когда почти все элементы решетки находятся в близких состояниях и лишь отдельные осцилляторы показывают особое, отличное от других поведение.

В четвертой главе диссертации численно исследуется динамика нелокально-связанных идентичных осцилляторов Рёслера, находящегося под действием

внешнего гармонического сигнала. Рассмотрены случаи как локализованного так и глобального внешнего воздействия. При этом в отсутствие внешнего воздействия ансамбль находится либо в режиме химерных состояний (амплитудных или фазовых), либо в режиме частичной синхронизации. Установлено, что локализованное внешнее воздействие приводит к разным эффектам в случае фазовых и амплитудных химер. При воздействии на когерентный кластер фазовой химеры она разрушается, а аналогичное воздействие в случае амплитудной химеры приводит лишь к перестройке пространственного профиля ансамбля, т. е. некогерентный кластер возникает в новой пространственной области. В случае, когда без внешнего воздействия ансамбль находится в режиме частичной когерентности, действие внешнего воздействия приводит к возникновению в ансамбле химероподобных структур.

При глобальном внешнем воздействии показано, что в ансамбле, в зависимости от амплитуды и частоты внешнего воздействия, могут существовать следующие состояния: режим полной хаотической синхронизации, химеры, режим полной некогерентности и др.

Наиболее важные результаты диссертационной работы получены в главах 3 и 4 и связаны с изучением химерных состояний в цепочечных и решеточной системах. Эти результаты, несомненно, вносят значительный вклад в теорию динамических сетей и стимулируют дальнейший прогресс в понимании сложных пространственно-временных процессов в реальных сетевых системах.

Обоснованность и достоверность положений и выводов диссертационной работы не вызывает сомнений, поскольку они базируются на теоретических положениях современной нелинейной динамики и согласуются с результатами предшествующих исследований в этой области. Для изученных систем выводы диссертации следует признать новыми и оригинальными.

Работа представляет собой законченное самостоятельное исследование, оформление диссертации и автореферата соответствует общепринятым требованиям.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. В главах 1, 2 диссертантом формулируется задача об исследовании пространственно-временной динамики в системах с дискретными пространственными координатами, имеющих конечномерные фазовые пространства. От цепочечных систем диссертант осуществляет переход к распределенным системам с непрерывной пространственной переменной, фазовое пространство которых уже является бесконечномерным. Далее, судя по представленным в этих главах пространственно-временным диаграммам,

численно исследуются уже распределённые системы в частных производных. При этом автор, во-первых, никак не объясняет целесообразность такого перехода, а во-вторых, не анализирует условия, при которых обнаруженные с помощью такого подхода волновые структуры будут существовать и в исходных цепочечных системах. Обычно, переход от цепочечных систем к распределённым осуществляется для получения малоразмерной конечномерной системы, описывающей бегущие волны, которая используется для изучения длинноволновых волновых структур исходной распределённой системы. В диссертации системы для бегущих волн не используются и поэтому переход от цепочечной системы к более сложной - распределённой вызывает вопрос.

2. В разделе 1.2 диссертант изучает волновую динамику распределенной системы в зависимости от коэффициента диффузии. Вариация коэффициента диффузии не может привести к обнаружению различных волновых структур, поскольку можно по новому отмасштабировать пространственную координату и получать эквивалентную систему, у которой коэффициент диффузии будет равен единице и изучить лишь эту систему. Аналогичное замечание справедливо и для системы (2.3).

3. В разделе 1.1.4 диссертант строит некоторые характеристики среды, которые называет дисперсионными. Для их построения он вводит понятие собственной частоты, одной которой явно недостаточно для адекватного описания свойств существенно нелинейных волн и понимания процессов, происходящих в среде. Более того, диссертант не сформулировал каких-либо значимых выводов о динамике среды на основе этих характеристик.

4. Использование понятия моды для описания (Глава 2) существенно нелинейных волновых процессов является неудачным.

5. В диссертации встречаются опечатки и неточности. Например, в главе 2 исследуемые системы (2.1), (2.2), (2.3) записаны некорректно. В подписи к рисунку 2.1, на котором представлены пространственно-временные диаграммы распределенной системы (2.3), автор пишет, что на рис. 2(д) представлен «типичный вид проекции фазового портрет системы». Неясно, что автор понимает здесь под термином «проекция».

Отмеченные недостатки не снижают общего хорошего впечатления от диссертации, в которой содержится решение актуальной задачи, имеющей важное значение для радиофизики и нелинейно динамики. Проведенные в работе исследования являются значимыми, обладают необходимой общностью и представляют интерес как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения. Полученные результаты расширяют представления современной

нелинейной динамики в части, касающейся теории химерных состояний и их возможных приложений.

Можно заключить, что И.А. Шепелев является квалифицированным специалистом в области радиофизики и нелинейной динамики. Автор прекрасно владеет аппаратом нелинейной динамики и численными методами. По результатам диссертационного исследования опубликованы 11 статей в авторитетных научных журналах, входящих в число рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций и индексируемых базами РИНЦ, Web of Science, Scopus. Материалы диссертации также докладывались на многочисленных научных конференциях различного уровня и получили положительную оценку.

Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию в научно-исследовательских разработках в области сложной динамики естественных и технических систем. Кроме того, результаты исследования можно рекомендовать для использования в учебных курсах по соответствующим специальностям (радиофизика и теория колебаний).

В автореферате правильно и достаточно полно изложены основные идеи и выводы диссертации, четко указаны степень новизны и научно-практической значимости полученных результатов.

На основе анализа диссертационной работы и опубликованных работ автора по теме диссертации, следует признать тему исследования актуальной, а ее выводы обоснованными, достоверными и новыми. Работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с пунктами 9.14 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор, И.А. Шепелев, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 — радиофизика.

Официальный оппонент,

профессор, доктор физико-математических наук,  
заведующий отделом нелинейной динамики  
Федерального государственного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики  
Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Некоркин Владимир  
Исаакович

Почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород,

БОКС-120, ул. Ульянова, 46  
Телефон: +7 (831) 4367291  
E-mail: vnekorkin@neuron.appl.sci-nnov.ru

Подпись В.И. Некоркина заверяю  
Ученый секретарь ИПФ РАН  
кандидат физико-математических наук



*И.В. Корюкин*

И.В. Корюкин

*24.09.2018*