

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

д.ф.-м.н. Гиявин М.Ю.

« 23 » 02 2020 г.



О Т З Ы В

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» на диссертационную работу Стрелковой Галины Ивановны «Химерные структуры в ансамблях нелокально связанных хаотических осцилляторов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 - Радиофизика.

Диссертационная работа Стрелковой Галины Ивановны посвящена детальному изложению результатов исследований механизмов образования, характеристик и свойств химерных пространственно-временных структур в ансамблях нелокально связанных осцилляторов с хаотической динамикой. Это новое научное направление возникло сравнительно недавно и в настоящее время привлекает пристальное внимание как отечественных, так и зарубежных исследователей, работающих в различных областях современного естествознания. Несмотря на достаточно большое количество научных публикаций по анализу химерных структур, далеко не все проблемы в этом направлении можно считать решенными. В диссертации Г.И. Стрелковой исследуется одна из таких проблем: рождение химерных структур в ансамблях осцилляторов, поведение индивидуальных элементов которых характеризуется хаотической динамикой. Исследование свойств химерных структур представляет как фундаментально-научный, так и практический интерес. Этот факт обусловлен в первую очередь тем, что в современном естествознании большой интерес вызывают процессы, происходящие в больших ансамблях взаимодействующих нелинейных колебательных подсистем. В диссертационной работе исследуются ансамбли из хаотических осцилляторов с негиперболическими и почти гиперболическими хаотическими аттракторами, описываются новые типы химерных структур, такие как амплитудные, фазовые и химеры уединенных состояний. Анализируются механизмы формирования и статистические и динамические характеристики, а также эффекты синхронизации открытых автором новых типов химерных структур. Кроме того, в диссертации развиты и усовершенствованы численные методы анализа и графического представления результатов исследования химерных структур. Совокупность результатов найдет применение в нейродинамике, в исследовании динамики энергосетей и ряде других областей современной нелинейной физики. Таким образом, тема диссертационной работы и

решаемые автором научные задачи, безусловно, являются актуальными и практически значимыми.

Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 465 наименований. Диссертация имеет четко продуманную и логично организованную структуру и характеризуется четким и ясным изложением результатов исследований.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель работы и задачи, которые необходимо решить, описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения о достоверности и апробации полученных результатов.

В **первой главе** диссертации приведены результаты детального численного анализа перехода «когерентность-некогерентность» в ансамблях хаотических осцилляторов с нелокальной связью. Предметом исследования служила пространственно-временная динамика одномерного замкнутого в кольцо ансамбля идентичных хаотических осцилляторов в условиях нелокальной связи. В качестве осцилляторов ансамбля рассматривались одномерное логистическое отображение, отображение Эно, а также модель генератора хаоса Анищенко—Астахова. Установлено, что при уменьшении силы нелокальной связи переход от режима полной хаотической синхронизации к пространственно-временному хаосу сопровождается возникновением химерных структур. Обнаружены два типа, названные фазовой и амплитудной химерами. Амплитудная химера найдена впервые. В первой главе приведены результаты детального анализа механизмов возникновения, динамических и статистических характеристик указанных структур и показана их типичность для ансамблей хаотических осцилляторов, демонстрирующих переход к хаосу через каскад бифуркаций удвоения периода.

Если в первой главе исследовались ансамбли осцилляторов с негиперболическим типом хаотического аттрактора индивидуального элемента, то **вторая глава** диссертации посвящена анализу динамики ансамблей, составленных из хаотических осцилляторов с квазигиперболическим типом хаотического аттрактора. В качестве таких осцилляторов выбирались отображение Лози и модель Лоренца. Показано, что переход в режим полной некогерентности в таких ансамблях при уменьшении силы связи осуществляется через последовательное увеличение так называемых уединенных состояний (solitary states), число которых растет с уменьшением величины связи. Подтверждена и уточнена гипотеза о невозможности реализации химерных структур в ансамблях хаотических осцилляторов с квазигиперболическими аттракторами. Детально обосновано, что этот вывод справедлив в случае, если при наличии нелокальной связи хаотический аттрактор остается квазигиперболическим. На примере ансамбля из нелокально связанных систем Лоренца впервые теоретически и численно показано, что изменение силы нелокальной связи вызывает изменение эффективных значений управляющих параметров индивидуального осциллятора, что может приводить к потере гиперболичности хаотическим аттрактором. В этом случае возможна реализация химерных состояний.

В **третьей главе** диссертационной работы исследуются и описываются особенности временной динамики ансамблей хаотических осцилляторов в режимах фазовой и амплитудной химер. Проводится анализ динамики систем в условиях случайных воздействий различной интенсивности и длительности. Установлено, что осцилляторы некогерентного кластера фазовой химеры демонстрируют во времени периодические колебания, а само

химерное состояние представляет собой долгоживущий установившийся процесс, устойчивый к воздействию как локализованного, так и действующего на все элементы ансамбля шума. Выявлено, что временные реализации осцилляторов некогерентного кластера амплитудной химеры характеризуются нерегулярными переключениями во времени между хаотическими и периодическими режимами динамики. При этом амплитудная химера имеет конечное время жизни, по истечении которого происходит переход к режиму фазовой химеры. В результате проведенных исследований установлена возможность управления временем жизни амплитудной химеры в широких пределах путем внешнего аддитивного случайного воздействия как на отдельные осцилляторы, так на все осцилляторы ансамбля.

В **четвертой главе** приводятся результаты исследований пространственно-временной динамики системы двух связанных одномерных ансамблей хаотических осцилляторов, то есть анализируется поведение мультиплексной сети. Рассматривается случай, когда одно кольцо составлено из отображений Эно, а другое – из отображений Лози. Показано, что в мультиплексной системе реализуется многообразие пространственно-временных структур. В частности, в ансамбле отображений Эно за счет взаимосвязи с ансамблем отображений Лози возникают режимы уединенных состояний и бегущих волн, а в ансамбле Лози – режимы фазовых и амплитудных химер. Установлено, что в рассматриваемой сети реализуется новый тип химерной структуры, названный в работе «химерой уединенных состояний». Важным результатом четвертой главы является установление механизма возникновения как режимов уединенных состояний, так и химеры уединенных состояний. Показано, что общим сценарием рождения указанных структур является возникновение бистабильной динамики индивидуальных осцилляторов ансамбля, обусловленной нелокальной связью. Общность и типичность выявленного механизма рождения уединенных состояний и химеры уединенных состояний подтверждены в работе на примерах исследования динамики ансамблей различных моделей нейронов, в т.ч. с дискретным и непрерывным временем.

Пятая глава диссертации посвящена изложению результатов исследования эффектов вынужденной и взаимной синхронизации пространственно-временных структур, включая химерные. С этой целью анализируются процессы колебаний в двух связанных ансамблях логистических отображений с нелокальной связью. Параметры взаимодействующих подсистем выбираются различными с целью реализации в них принципиально отличных сложных структур. Рассмотрены случаи однонаправленной и взаимно-симметричной связи между ансамблями. Установлены эффекты как вынужденной, так и взаимной синхронизации пространственно-временных структур, включая химерные. Наличие эффектов синхронизации подтверждалось расчетами коэффициентов взаимной корреляции, среднеквадратичных отклонений значений переменных по времени и по элементам ансамбля и построением областей синхронизации на плоскостях различных параметров сети при вариации силы межслойной связи. Автором установлено качественное соответствие результатов анализа синхронизации пространственно-временных структур, включая химерные, выводам классической теории синхронизации предельного цикла.

В **шестой главе** диссертационной работы представлены результаты исследований задачи ретрансляции заданной химерной структуры в многослойной сети, состоящей из колец нелокально связанных хаотических отображений (логистическое и кубическое отображения). Задача очень интересная и важная. Рассмотрены случаи однонаправленного взаимодействия слоев, а также взаимодействие в условиях наличия несимметричной взаимной связи, которая включает однонаправленную компоненту и компоненту обратной связи. Установлено, что установившаяся химерная структура в первом (задающем) слое при

выбранной силе взаимосвязи передается от слоя к слою в мультиплексной сети из 20 связанных слоев с достаточно малыми искажениями. Величина искажений определяется расстройкой параметров сети. Детально исследовано явление вынужденной синхронизации многослойной сети и зависимость этого эффекта от порога синхронизации. Проанализировано влияние характера и степени неоднородности слоев сети на ретрансляцию заданной химерной структуры при изменении силы межслойной связи. Показано, что расстройка значений параметров, управляющих динамикой индивидуальных элементов, играет довольно существенную роль при вынужденной синхронизации химерной структуры. Выявлено, что подобный эффект наблюдается при наличии обратной компоненты взаимодействия между слоями. В этом случае эффективная вынужденная синхронизация химерной структуры имеет место при достаточно сильной однонаправленной межслойной связи.

Основные результаты работы и выводы четко сформулированы в **заключении**. Наиболее важными и интересными результатами диссертационной работы на наш взгляд являются следующие:

- представлен детальный анализ механизмов возникновения химерных структур в ансамблях нелокально связанных хаотических осцилляторов с аттракторами индивидуальных элементов негиперболического типа. Установлена возможность реализации в таких ансамблях нового типа химерной структуры, названной автором амплитудной химерой. Описаны динамические и статистические характеристики амплитудных химер, выявлен нестационарный характер динамики и конечное время жизни амплитудных химер. Обоснована общность обнаруженных свойств химерных структур для широкого класса ансамблей из осцилляторов с удвоением периода;
- подтверждена и уточнена гипотеза в невозможности рождения химерных структур в ансамблях связанных хаотических осцилляторов с квазигиперболическим типом аттракторов. Детально обосновано, что реализация химерных структур в таких ансамблях становится возможной только в случае, если за счет связи между элементами ансамбля аттрактор индивидуального осциллятора утрачивает свойство гиперболичности;
- показано, что переход от режимов полной синхронизации к пространственному хаосу в ансамблях хаотических осцилляторов с квазигиперболическим типом аттракторов осуществляется через режим уединенных состояний. Выявлен новый тип химерной структуры — «химеры уединенных состояний», и установлен бифуркационный механизм ее реализации, обусловленный возникновением бистабильности в динамике индивидуальных элементов ансамбля;
- установлены и исследованы эффекты вынужденной и взаимной синхронизации химерных структур. Показано качественное соответствие эффектов синхронизации пространственно-временных структур с выводами классической теории синхронизации периодических автоколебаний.

Основные научные результаты являются новыми, оригинальными, что подтверждается публикацией их в ведущих отечественных, так и зарубежных научных журналах. Достоверность результатов и выводов работы не вызывает сомнений.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В большинстве численных экспериментов расчеты проводились для значений радиуса нелокальной связи $r = 0.32$. Чем обусловлен выбор именно указанного значения r ? Изменятся ли результаты в случае выбора других значений радиуса связи?
2. Из материалов диссертации не совсем ясно, имеются ли качественные отличия химерных состояний в ансамблях осцилляторов Курамото от химер в ансамблях хаотических осцилляторов? Если да, то в чем они состоят?
3. В работе не уточняется, как именно в численных экспериментах устанавливался характер хаотического аттрактора — является ли хаос квазигиперболическим или негиперболическим?
4. Следует отметить, что исследуемые в работе уединенные состояния были впервые обнаружены в работе V. Nekorkin, V. Makarov and M. Velarde “Clustering and phase resetting in a chain of bistable nonisochronous oscillator”, Phys. Rev. E 58, 5742 (1998), ссылка на которую в диссертации отсутствует.

В то же время, отмеченные недостатки и сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Г.И. Стрелковой, которая выполнена на высоком квалифицированном уровне.

Заключение

Диссертационная работа Стрелковой Галины Ивановны представляет собой серьезное, объемное и завершенное научное исследование, выполненное на актуальную для современной радиофизики тему, которое можно квалифицировать как решение крупной фундаментально-научной задачи. Диссертация полностью соответствует специальности 01.04.03 — радиофизика (пп. 1, 4 паспорта специальности). Автореферат правильно отражает ее содержание.

По результатам диссертационной работы опубликовано 3 монографии (одна из которых издана на английском языке в одном из ведущих мировых издательств Springer) и 31 статья в центральных рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, входящих в международные системы научного цитирования Web of Science и Scopus, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук: Письма в журнал технической физики, Известия вузов. Радиофизика, Chaos, Solitons and Fractals, Nonlinear Dynamics, Physics Letters A, Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation, The European Physical Journal Special Topics, Regular and Chaotic Dynamics, Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика и др. Получены 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ на разработанные методы и программные комплексы для исследований динамики сложных систем и ансамблей. Диссертационная работа прошла серьезную апробацию на многочисленных международных научных конференциях и семинарах.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научных исследованиях в Институте прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород), Институте радиотехники и электроники РАН (г. Москва), Физическом институте имени П.И. Лебедева РАН (г. Москва), Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова (г. Москва), Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород), Воронежском государственном университете, Казанском (Приволжском) федеральном университете, Южном федеральном университете,

Санкт-Петербургском государственном университете, Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Национальном исследовательском Томском государственном университете, Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики, Иркутском государственном университете, Саратовском государственном техническом университете им. Гагарина Ю.А., а также могут быть рекомендованы к внедрению в учебный процесс в высших учебных заведениях Российской Федерации, ведущих подготовку специалистов (бакалавров, магистров, аспирантов) в области радиофизики.

С учетом вышесказанного можно считать, что диссертационная работа Галины Ивановны Стрелковой вносит заметный вклад в развитие современных представлений о динамике сложных ансамблей связанных нелинейных осцилляторов как одного из направлений радиофизики и теории нелинейных колебаний и волн. Работа удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Стрелкова Галина Ивановна заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 — радиофизика.

Отзыв составлен и утвержден на заседании семинара Отдела Нелинейной Динамики (протокол №1 от 03.02.2020 года).

Председатель семинара



Некоркин Владимир Исаакович
д.ф.-м.н., профессор, заведующий отделом
Нелинейной динамики ИПФ РАН,
почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород,
ул. Ульянова, 46,
тел. 8 (831) 436-72-91,
e-mail: nekorkin@appl.sci-nnov.ru

Научный секретарь семинара



Клиньшов Владимир Викторович,
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ИПФ РАН,
почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород,
ул. Ульянова, 46,
тел. 8 (831) 416-49-05,
e-mail: vladimir.klinshov@gmail.com