

О Т З Ы В

официального оппонента 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

Исследования коллективной динамики ансамблей связанных нелинейных осцилляторов в последние годы является предметом повышенного интереса специалистов в области современного естествознания. Это новое научное направление возникло сравнительно недавно и в настоящее время привлекает пристальное внимание как отечественных, так и зарубежных исследователей. В частности, особый интерес представляет исследование так называемых химерных структур. Диссертационная работа Стрелковой Галины Ивановны посвящена детальному анализу механизмов образования, характеристик и свойств химерных пространственно-временных структур в ансамблях нелокально связанных осцилляторов с хаотической динамикой. 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. 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. Совокупность результатов найдет применение в современной теории колебаний и волн, 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.

Диссертационная работа (общий объем 401 стр., включая 148 иллюстраций) состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 465 наименований. Диссертация имеет хорошо продуманную и логично организованную структуру и характеризуется четким и ясным изложением результатов исследований.

Во **введении** обоснована актуальность 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 численного анализа перехода «когерентность-некогерентность» в ансамблях нелокально связанных хаотических осцилляторов. Исследована пространственно-временная динамика одномерных замкнутых в кольцо ансамблей идентичных хаотических осцилляторов в условиях нелокальной связи. Установлено, что при уменьшении силы нелокальной связи переход от режима полной

хаотической синхронизации к пространственно-временному хаосу сопровождается возникновением химерных структур. Обнаружены два типа химер, названные фазовой и амплитудной. Амплитудная химера найдена впервые. 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.

Вторая глава диссертации посвящена анализу динамики ансамблей хаотических осцилляторов с квазигиперболическим типом хаотического аттрактора. 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 нелокальной связи хаотический аттрактор остается квазигиперболическим.

В **третьей главе** диссертационной работы исследуются и описываются особенности 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, химерное состояние представляет собой долгоживущий установившийся процесс, устойчивый к воздействиям шума. Выявлено, что амплитудные химеры характеризуются нерегулярными переключениями во времени между хаотическими и периодическими режимами динамики (являются нестационарными) и имеют конечное время жизни. Установлена возможность управления временем жизни амплитудной химеры в широких пределах путем внешнего аддитивного случайного воздействия.

В **четвертой главе** приводятся результаты исследований пространственно-временной динамики системы двух связанных одномерных ансамблей хаотических осцилляторов, то есть анализируется поведение мультиплексной сети. Установлено, что в рассматриваемой сети реализуется новый тип химерной структуры, названный в работе «химерой уединенных состояний». Установлен механизм 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.

Пятая глава диссертации посвящена исследованиям эффектов вынужденной и взаимной синхронизации пространственно-временных структур, включая химерные. Анализируются процессы колебаний в двух связанных ансамблях логистических отображений с нелокальной связью. Наличие 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. Установлено качественное соответствие эффектов 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. 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

Основные результаты работы и выводы подробно сформулированы в **заключении**.

Наиболее важными результатами диссертационной работы на мой взгляд являются следующие:

- Впервые решен комплекс задач, связанных с рождением и эволюцией так называемых уединенных состояний. 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;
- Проведен и описан детальный анализ механизмов возникновения химерных структур в ансамблях нелокально связанных хаотических осцилляторов с аттракторами индивидуальных элементов негиперболического типа. Показана возможность реализации в таких ансамблях нового типа химерной структуры, названной автором амплитудной. 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;
- Представлено уточнение гипотезы о невозможности рождения химерных структур в ансамблях связанных хаотических осцилляторов с квазигиперболическим типом аттракторов. Показано, 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;
- 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 высокорейтинговых научных журналах. Достоверность результатов и выводов работы не вызывает сомнений. Работа в целом вызывает очень приятное впечатление, как по содержанию, так и по форме изложения результатов. Автору я бы рекомендовал опубликовать основные результаты диссертации в виде монографии.

По диссертации имеется ряд замечаний:

1. Из материала диссертации не совсем ясно, какими особенностями поведения обладают химерные структуры в исследуемом классе систем (ансамблях хаотических элементов) по сравнению с химерами в ансамблях элементов с регулярной динамикой, например, в ансамблях фазовых осцилляторов Курамото.
2. Очень интересны результаты, касающиеся шумового воздействия на химерные структуры и стабилизации амплитудной химеры шумом. Но, полагаю, что однократное случайное воздействие все-таки не совсем правильно называть шумом. В то же время хотелось бы более подробно остановиться на влиянии постоянных во времени шумовых воздействий на различные типы химерных состояний. Так, не было рассмотрено влияние шума на впервые описанный в работе новый тип химеры, названной химерой уединенных состояний. Не ясно, является ли данная структура устойчивой к шумовому воздействию, что важно с точки зрения существования данной структуры в реальных системах, где всегда имеются источники шума.
3. Можно было бы также прояснить некоторые детали, касающиеся эффекта синхронизации сложных структур во взаимодействующих ансамблях. Например, не вполне понятно, почему при взаимной связи ансамблей режим синхронизации разрушается не только с уменьшением коэффициента связи, но и с его увеличением (в области сильного взаимодействия).
4. При определении устойчивости химер использовались численные методы. Следовало подробнее описать процедуру вычислений.

Указанные замечания ни в коей мере не принижают общего хорошего впечатления о диссертационной работе и могут послужить определенной основой для проведения будущих исследований.

В итоге считаю, что диссертационная работа Стрелковой Галины Ивановны представляет собой серьезное, объемное и завершенное научное исследование, выполненное на актуальную для современной радиофизики тему. Работу 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 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, 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 Саратов. ун-та. 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, Санкт-Петербургском государственном университете, Саратовском государственном техническом университете им. Гагарина Ю.А., а также могут быть рекомендованы к внедрению в учебный процесс в вузах Российской Федерации, ведущих подготовку специалистов в области радиофизики.

С учетом вышесказанного считаю, 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.

Официальный оппонент

Заведующий кафедрой теории управления и динамики систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского», доктор физико-математических наук (01.04.03), доцент

Осипов Григорий Владимирович

12 марта 2020 г.

Почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, д. 23.

Телефон: +7 (831) 462-33-57.

E-mail: grosipov@gmail.com

