

УТВЕРЖДАЮ

Ректор Балтийского федерального
университета имени Иммануила Канта
доктор философских наук, профессор
А.А. Федоров



2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта на диссертационную работу Емельяновой Анастасии Александровны «Смешанная динамика в коэволюционных ансамблях осцилляторов Курамото», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. — Радиофизика

В диссертационной работе А.А. Емельяновой представлены результаты исследования нового явления — смешанной динамики, которая считается третьим типом хаоса, принципиально отличающимся от классических консервативного и диссипативного типов. Цель представленной работы состоит в разработке моделей, демонстрирующих смешанную динамику, в классе необратимых коэволюционных ансамблей Курамото с симплексными (первого и второго порядков) и адаптивными межэлементными связями и выявление на их основе динамических свойств и характеристик этого нового явления. Также в диссертации исследуются режимы синхронизации в этом классе систем и показано приложение полученных результатов к задачам генерации шумоподобных автоколебаний и нейродинамики.

Актуальность темы диссертации определяется развитием теории и методов исследования детерминированного хаоса. Явление смешанной динамики, когда инвариантные многообразия хаотических аттрактора и репеллера пересекаются по траекториям обратимого ядра, не притягивающего и не отталкивающего траектории, было обнаружено сравнительно недавно, поэтому новые работы по этой тематике вносят существенный вклад в развитие теории третьего типа хаоса. Более того, представленные в диссертации модели представляют собой первые системы общего положения (необратимые) со смешанной динамикой, в то время как все предыдущие примеры моделей с третьим типом хаоса обладали симметрией по отношению к обращению времени, т. е. относились к обратимым системам. Таким образом, работа диссертанта закладывает основу для исследования смешанной динамики в необратимых системах. Актуальность диссертации обусловлена также приведёнными в ней результатами по исследованию режимов синхронизации в коэволюционных ансамблях осцилляторов Курамото с симплексными связями первого и второго порядков. В коэволюционных (адаптивных) ансамблях происходит совместная эволюция состояний элементов и связей между ними, а наличие симплексных связей

воспроизводит сложную структурную организацию межэлементных взаимодействий в реальных системах. Разработка и исследование моделей с адаптивными и симплексными связями является актуальной проблемой радиофизики.

Научная новизна представленной работы определяется развитыми в ней методами установления существования и исследования третьего типа хаоса в необратимых системах на примере коэволюционных ансамблей осцилляторов Курамото с симплексными связями. Кроме того, в работе впервые приведены результаты изучения влияния внешней силы на смешанную динамику, реализован первый генератор хаотических колебаний в режиме третьего типа хаоса, а также продемонстрировано, что под влиянием смешанной динамики увеличивается диапазон значений межспайковых интервалов осцилляторов Курамото, которые можно рассматривать как модели нейронов. Впервые исследовано влияние правила адаптации на режимы синхронизации в ансамблях осцилляторов Курамото и процесс их разрушения при изменении параметра адаптации.

Приведённые в диссертации результаты обладают **теоретической и практической значимостью**. Во-первых, разработанные диссертантом методы исследования смешанной динамики могут использоваться при изучении других систем. Во-вторых, по результатам исследований режимов коэволюционных ансамблей осцилляторов Курамото, приведённых в диссертации, можно в дальнейшем построить новые модели нейронных сетей, обладающих свойством пластичности (адаптивности) связей и сложной структурной организацией. Генератор шумоподобных колебаний в режиме смешанной динамики, реализованный на ПЛИС, может иметь применение при построении новых систем коммуникации и кодирования информации.

В тексте диссертации приведены необходимые сведения, позволяющие убедиться в корректности предлагаемых подходов, **достоверности и обоснованности** полученных результатов, а также в **репрезентативности эмпирического материала**. Результаты неоднократно обсуждались на научных конференциях и семинарах, они опубликованы в высокорейтинговых журналах и получили одобрение ведущих специалистов, многие статьи соискателя по теме диссертационного исследования имеют высокую цитируемость. **Личный вклад автора** адекватно представлен в диссертации и автореферате.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Содержание диссертации представлено 122 страницами, включая 68 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 129 наименований, включая 19 публикаций автора по теме диссертации.

Во **Введении** приведена актуальность темы, цели и задачи, научная новизна и практическая значимость результатов, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена исследованию смешанной динамики в коэволюционных ансамблях двух осцилляторов Курамото с симплексными связями первого порядка. В этой главе приведены первые необратимые модели, демонстрирующие третий тип хаоса. Предложена методика установления существования смешанной динамики в этих моделях и методы её исследования.

Изучено влияние наличия в системе обратимого ядра на динамику коэволюционных ансамблей осцилляторов Курамото. Приведена схема реализации генератора шумоподобных колебаний в режиме смешанной динамики и сравнение их характеристик с характеристиками колебаний в режиме обыкновенного диссипативного хаоса, когда аттрактор и репеллер не пересекаются.

Во **второй главе** приведены результаты исследования режимов синхронизации в коэволюционной сети осцилляторов Курамото с симплексными связями первого порядка в случае неоднородных собственных частот, распределённых равномерно. Исследована зависимость режимов сети от параметров адаптации и силы связи. Продемонстрировано, что в сети реализуются синхронный и асинхронный режимы, переход между которыми происходит иерархически через состояния частичной синхронизации (химерные состояния).

В **третьей главе** продемонстрировано, что в малом коэволюционном ансамбле, состоящем из трёх осцилляторов Курамото с симплексными связями второго порядка, реализуется смешанная динамика. В отличие от случая двух осцилляторов с симплексными адаптивными связями первого порядка, рассмотренного в первой главе, в этом случае аттрактор и репеллер обладают более высокой схожестью. Проанализировано влияние смешанной динамики на межспайковые интервалы и показано, что в случае третьего типа хаоса диапазон их распределения более широкий, чем при других значениях параметров.

В **четвертой главе** диссертации приведены результаты исследования режимов синхронизации в коэволюционной сети осцилляторов Курамото с симплексными связями второго порядка. Показано, что динамика сети отличается от случая симплексных связей первого порядка, рассмотренного во второй главе: переход от синхронного режима к асинхронному происходит скачком, и химерные состояния отсутствуют.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации. К наиболее важным из них можно отнести следующие. Автором диссертации детально исследованы процессы разрушения синхронных режимов в коэволюционных сетях осцилляторов Курамото при изменении параметра, характеризующего правило адаптации, и показано, что процессы десинхронизации в коэволюционных сетях происходят иерархически. При этом в случае симплексных связей первого порядка (классические парные взаимодействия) разрушение происходит через состояния частичной синхронизации, а в случае симплексных связей второго порядка имеет место резкий скачкообразный переход к асинхронному режиму. Показано, что ансамбли Курамото с адаптивными симплексными связями первого и второго порядков можно рассматривать как модели спайковых нейронных сетей. При этом в случае смешанной динамики ансамбль осцилляторов Курамото воспроизводит сложные спайковые последовательности, которые не могут быть реализованы в рамках хаотической диссипативной динамики. Указанные свойства коэволюционных ансамблей осцилляторов Курамото с симплексными связями первого и второго порядков позволяют описать возможные механизмы ряда сложных явлений в нейродинамике как при когнитивных процессах (например, синхронизация нейронных групп при альфа- и гамма-ритмах участвует в различных когнитивных

функциях, таких как перцептивная группировка, перцептивная осведомленность, выбор стимула, сенсомоторная деятельность и т.д.), так и при патологиях центральной нервной системы (болезни Паркинсона и Альцгеймера характеризуются чрезмерной синхронизацией поврежденных нейронов, во время эпилептического припадка нейроны некоторых областей мозга сильно синхронизированы, в то время как другие десинхронизированы). Наконец, автором показана принципиальная возможность реализации смешанной динамики в физическом эксперименте. Предложена система с дискретным временем, на основе которой реализован генератор шумоподобных колебаний в режиме смешанной динамики, спектральные характеристики которого в режиме третьего типа хаоса имеют ряд особенностей, а именно спектральная плотность мощности колебаний более равномерно распределена по частотам, чем в случае классического хаоса в той же системе.

В **Приложении А** приведена сравнительная таблица, в которой отражены характеристики смешанной динамики в коэволюционных ансамблях осцилляторов Курамото, а в **Приложении Б** эффекты синхронизации в коэволюционных сетях осцилляторов Курамото сопоставляются с некоторыми наблюдаемыми в задачах нейродинамики сложными явлениями.

Замечания по содержанию диссертации. По диссертационной работе и автореферату существенных нареканий нет. Однако, несмотря на общую положительную оценку, при изучении материалов возникли некоторые комментарии и пожелания автору диссертационной работы.

1. В первой главе диссертационной работы на стр. 24 представлены результаты расчета фрактальной размерности хаотических аттрактора и репеллера, а также обратимого ядра. В качестве критерия выбора оптимальных параметров метода используется условие равенства фрактальных размерностей аттракторов и репеллеров единице с точностью до 0.01 в режиме регулярной динамики. Было бы полезно привести конкретные значения параметров метода, при которых проводился расчет размерности множеств в фазовом пространстве.
2. В третьей главе диссертационной работы на стр. 87-89 обсуждаются вопросы применения полученных результатов к задачам нейродинамики и делается вывод, что распределения межспайковых интервалов в системе (3.1) в случае смешанной динамики значительно шире, чем в случае классического диссипативного хаоса. Автор отмечает, что это свидетельствует об информационной ёмкости сети (3.1) в случае смешанной динамики. Можно посоветовать автору провести в будущей своей научной работе сравнение с известными из литературы экспериментальными данными по динамике нейронных популяций, которые бы можно было объяснить полученными теоретическими результатами автора диссертации. Это было бы очень важно для более глубокого понимания природы сложной динамики в нейронных ансамблях *in vivo*.
3. В четвертой главе на стр. 99 диссертационной работы обсуждается вопрос влияния начальных условий (вида распределения начальных фаз) на реализующиеся в сети режимы динамики. В этом случае для наглядности представления данных можно было бы рекомендовать построить бассейны

притяжения различных режимов динамики системы (количество и размеры фазовых кластеров).

Указанные замечания не снижают высокого уровня представленной к защите диссертационной работы и не затрагивают основные положения, выносимые на защиту, а носят характер уточнений и рекомендаций для будущих исследований.

Таким образом, можно сделать вывод, что диссертационная работа А.А. Емельяновой «Смешанная динамика в коэволюционных ансамблях осцилляторов Курамото» представляет собой самостоятельное и целостное научно-квалификационное исследование, выполненное на актуальную тему и на высоком профессиональном уровне, соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 в действующей редакции. Содержание диссертации в полной мере отражено в автореферате. Диссертация и автореферат правильно оформлены. Автор работы А.А. Емельянова заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. — Радиофизика.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, профессором, главным научным сотрудником Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта БФУ им. И. Канта Храмовым Александром Евгеньевичем.

Отзыв обсужден и единогласно утвержден на научном семинаре Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта» 10 июня 2024 г., протокол № 5/24.

Главный научный сотрудник БФУ им. И. Канта,
доктор физико-математических наук,
профессор

А.Е. Храмов

«10» июня 2024 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта».

Адрес: 236041, г. Калининград, ул. Александра Невского, 14.

Телефон: +7 (4012) 59-55-95.

E-mail: post@kantiana.ru

Подпись Храмова Александра Евгеньевича заверяю:

Ученый секретарь ученого совета
БФУ им. И.Канта



А.А.Шпилевой