

Отзыв

официального оппонента доктора физико-математических наук Горского Александра Сергеевича на диссертационную работу Фатеева Ильи Сергеевича «Состояния частичной синхронизации в системах осцилляторов с супердиффузионным типом взаимодействия», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Нелинейные процессы в теории неравновесных распределенных динамических систем представляют значительную сложность для всестороннего аналитического осмысления. Этим обусловлена важность разработки ясных и качественно интерпретируемых подходов к построению математических моделей ансамблей связанных осцилляторов. С учетом соответствия предложенной модели биологическим представлениям об архитектуре кортикальных связей, данные подходы могут служить надежной основой для построения физических моделей когнитивных процессов. Это обусловлено возможностью на базе таких систем фундаментального осмысления сложных динамических режимов, включающих состояния как полной, так и частичной синхронизации, а также гиперхаотической динамики.

В работе Фатеева И.С. рассматривается и всесторонне обосновывается подход к определению системы супердиффузионно связанных осцилляторов (в частности, Hindmarsh-Rose нейронов), сформулированный на основе аппарата дробно-дифференциального исчисления. На примере заданной топологии связи, изучается развитие различных состояний как полной и частичной синхронизации, так и развитой некогерентности, в зависимости от конфигураций системы, заданных на основе показателей дробного оператора Лапласа. Диссертация посвящена систематическому исследованию возможных динамических режимов, расширению методологии их анализа и анализу результатов в непрерывном пределе для широкого спектра супердиффузионных конфигураций.

Диссертация И. С. Фатеева состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 125 страниц и включает 21 рисунок. Список литературы содержит 238 наименований.

Во введении описывается актуальность диссертационного исследования. Обосновывается значимость состояний частичной синхронизации в контексте

множества динамических режимов, воспроизводимых на основе сетей нелинейных динамических элементов. Также, в данной части формулируются цель и задачи диссертационного исследования; описываются научная новизна, фундаментальная и прикладная значимость; формулируются положения, выносимые на защиту; обосновывается достоверность полученных результатов и описывается личный вклад автора.

Первая глава посвящена систематическому обзору литературы. Автор начинает с обсуждения классических трудов, связанных с распределенными нелинейными динамическими системами, далекими от термодинамического равновесия. Далее в рассмотрение вводятся новые исследования, связанные с дробно-дифференциальным исчислением и актуальными задачами нелинейной динамики в контексте формирования и развития химерных состояний. Подробно рассматриваются представления о структурных и функциональных особенностях сетей взаимодействующих нейронов, а также описываются основные математические подходы, на основе которых формулируются модели сложных систем взаимодействующих осцилляторов различной природы.

Вторая глава начинается с изложения общих положений, касающихся определения распределенных динамических систем, и биофизического обоснования супердиффузионного приближения для построения сетей взаимодействующих нейронов. Далее, начиная с базового определения дробного оператора Лапласа, автор вводит в рассмотрение реакционно-супердиффузионную систему, а также соответствующую ей совокупность нелокальных итерационных отображений, задающих динамику в супердиффузионной сети нейронов. Автор обосновывает использование нелинейной Hindmarsh-Rose модели для задания точечной динамики в распределенной системе. Наконец, в данной главе вводится ряд метрик для всесторонней оценки развития состояний частичной синхронизации.

В третьей главе автор исследует развитие различных состояний частичной синхронизации, включая фазовые волны и химерные состояния, в представленных двухкомпонентной и трехкомпонентной одномерных системах. Для демонстрации данной особенности в рамках двухкомпонентного представления автор выбирает параметрическое пространство показателей дробного оператора Лапласа по первой и второй компонентам системы, обусловленное спецификой организации

супердиффузионной связи. На основе предложенных метрик удастся определить свойства структуры параметрического пространства и, в частности, разделить топологии, для которых характерно развитие синхронизации и полной некогерентности. В данной главе вводится в рассмотрение двух- и трехкомпонентная двумерная система, а также обобщаются указанные выше метрики на двумерный случай. Демонстрируется сходство параметрического пространства для одномерной и двумерной постановок.

В четвертой главе ставится вопрос о более детальном исследовании структуры параметрического пространства показателей дробного оператора Лапласа для одномерной двухкомпонентной постановки. Автором выделяются конкретные области параметрического пространства показателей дробного оператора Лапласа, соответствующие зонам однородных и неоднородных синхронизационных переходов. Также, с целью демонстрации сложной конфигурации параметрического пространства по отношению к развитию фазоволновой организации совместно с некогерентными доменами, автором вводится в рассмотрение спектр дробных мер пространственной когерентности.

Пятая глава посвящена аналитическому описанию полученных динамических результатов в непрерывном пределе. С этой целью, вводится в рассмотрение двухкомпонентная реакционно-супердиффузионная система с Hindmarsh-Rose нелинейностью. Производится линейный анализ устойчивости относительно стационарного состояния данной системы. Рассматривается семейство характеристических уравнений для различных комбинаций показателей дробного оператора Лапласа. Демонстрируется качественное сходство особенностей полученных решений характеристических уравнений с динамическими реализациями, воспроизведенными на основе нелокальных итерационных отображений для супердиффузионных сетей. Выводятся функциональные зависимости показателей дробных операторов Лапласа, очерчивающие зоны развития некогерентности и полной синхронизации для широкого спектра топологий супердиффузионных сетей. В данной главе также вводится и обосновывается новое динамическое явление — «несогласованная дробная Тьюринговская неустойчивость», которое расширяет понятие морфогенеза в системах с диффузионно-подобным типом взаимодействия.

Замечания

Диссертация и автореферат Фатеева И. С. имеют четкую структуру, а материал изложен ясным и доступным языком. Однако к работе имеется замечание, связанное с обилием синонимов. В тексте диссертации автор использует слова, "ансамбли", "сети", "архитектуры" и "топологии" для описания именно структуры связи между осцилляторами. Столь большое количество слов видится избыточным и может вызвать недопонимание у читателя.

Во второй главе диссертации обсуждаются различные режимы полной и частичной синхронизации. С моей точки зрения, было бы полезно сравнить результаты диссертации, с результатами, впервые полученными Мунозом и Менотти, относительно возникновения протяженного фазового перехода синхронизации - фазы Гриффитса в биологических нейронных сетях.

В третьей главе автор довольно подробно исследует двумерное параметрическое пространство дробного оператора Лапласа и вводит несколько новых метрик. С моей точки зрения, было бы интересно вычислить и исследовать в данном случае более стандартный «квантовый» геометрический тензор на двумерном пространстве параметров, включающий метрику и кривизну Берри.

При этом, стоит отметить, что данные замечания не снижают общей положительной оценки проведенных исследований.

В Заключение

В диссертации осуществлено внедрение аппарата дробно-дифференциального исчисления для построения супердиффузионной сети связанных осцилляторов. Автором проведена калибровка предложенного подхода для нелинейной модели Hindmarsh-Rose, что позволило реализовать широкий спектр состояний частичной синхронизации, включая различные виды химерных состояний. Для подтверждения данных явлений использовались сразу несколько независимых метрик, что дает возможность выдвинуть более обоснованные суждения о факте существования указанных динамических режимов в предложенной системе. Следует отметить, что системы осцилляторов с супердиффузионной топологией имеют явный аналитический предел, описываемый системой реакционно-супердиффузионных уравнений. Автором показано соответствие между различными типами устойчивости и неустойчивости пространственных мод в линейном приближении и фактическим развитием режимов полной синхронизации, частичной синхронизации и развитой некогерентности. При

этом характер режимов определяется супердиффузионно-сетевой топологией и зависит от показателей дробного оператора Лапласа.

Научная обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечиваются использованием нескольких независимых метрик для верификации динамических режимов, а также согласованностью результатов линейного анализа устойчивости с динамической реализацией нелокального итерационного отображения для динамики супердиффузионной архитектуры.

В качестве важного элемента расширения подходов к оценке состояний частичной синхронизации автором был предложен новый набор метрик – спектр дробных мер пространственной когерентности, также основанный на дробно-дифференциальном представлении. Эффективность данных мер убедительно продемонстрирована в рамках рассматриваемой модели. Благодаря наличию явного непрерывного предела, продемонстрированному разнообразию внутренней динамики, а также согласованности аналитического представления с полученными результатами для нелокальных итерационных отображений, предложенная модель может служить эффективной основой для моделирования широкого множества коллективных явлений как в задачах теоретической физики в целом, так и в нелинейной динамике сложных систем в частности.

Научная новизна и значимость диссертационной работы обусловлены: введением супердиффузионного принципа для построения сетевой архитектуры связанных Hindmarsh-Rose осцилляторов и определением на основе данной структуры связи различных состояний частичной синхронизации; разработкой оригинального набора метрик на основе дробно-дифференциального представления; выявлением связи между параметрами дробного оператора Лапласа и типами реализуемых режимов. Все вышеизложенное открывает новые перспективы для моделирования и анализа коллективных явлений в сложных системах различной природы.

С учетом вышеизложенного, можно однозначно утверждать, что диссертация Фатеева Ильи Сергеевича соответствует специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика». В ней представлена модель, которая отвечает сразу нескольким пунктам данной специальности. В частности, предложенная модель и ее возможные модификации обладают явным потенциалом для теории неравновесных систем. На ее основе могут быть исследованы различные гиперхаотические режимы для ансамблей связанных осцилляторов. Равным образом, актуальная постановка задачи о развитии химерных состояний и состояний частичной синхронизации на базе рассмотренной системы

непосредственно отсылает к задачам построения физических моделей когнитивных процессов.

Текст диссертации оформлен в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат корректно отражает важные элементы содержания и результаты диссертации.

Диссертация Фатеева И. С. «Состояния частичной синхронизации в системах осцилляторов с супердиффузионным типом взаимодействия» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям пп. 9–11, 13, 14 к кандидатским диссертациям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Фатеев Илья Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук, специальность 1.3.3- Теоретическая физика, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН) Ю 127151, Москва, Б. Каретный 19

Горский Александр Сергеевич, +79163609134, gorsky@iitp.ru

Горский Александр Сергеевич.

Дата

26.07.2026

Список основных работ оппонента по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Bobyleva, A., Gorsky, A., Nechaev, S., Valba, O., & Pospelov, N. (2025). Metric structural human connectomes: localization and multifractality of eigenmodes. *Network Neuroscience*, 9(2), 682-711.
2. Kochergin, D., Khaymovich, I. M., Valba, O., & Gorsky, A. S. (2024). Robust extended states in Anderson model on partially disordered random regular graphs. *SciPost Physics*, 16(4), 106.
3. Alexandrov, A., & Gorsky, A. (2024). Penrose method for Kuramoto model with inertia and noise. *Chaos, Solitons & Fractals*, 183, 114938.
4. Alexandrov, A., & Gorsky, A. (2023). Information geometry and synchronization phase transition in the Kuramoto model. *Physical Review E*, 107(4), 044211.
5. Alexandrov, A., Arkhipov, P., & Gorsky, A. (2022). Synchronization on star-like graphs and emerging Z_p symmetries at strong coupling. *Journal of Complex Networks*, 10(3), cnac015.
6. Пospelov, Н. А., Сотсков, В. П., Анохин, К. В., Нечаев, С. К., & Горский, А. С. (2022). Извлечение коллективных переменных из многомерной нейронной активности клеток места. *Интеллектуальные системы. Теория и приложения*, 26(1), 337-340.