

Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук, доцента, Осипова Григория Владимировича на диссертацию Фатеева Ильи Сергеевича «Состояния частичной синхронизации в системах осцилляторов с супердиффузионным типом взаимодействия», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.3 - «Теоретическая физика».

В диссертации вводится в рассмотрение новый подход к определению архитектуры динамической сети связанных Хиндмарша-Розе осцилляторов, основанный на супердиффузионном принципе. Внедрение дробно-дифференциальных операторов в актуальные задачи современной нелинейной динамики, в частности, и теории открытых диссипативных систем в целом представляет собой важное научное направление. С одной стороны, динамические системы с дробными производными по времени расширили представления о возникновении хаоса в многокомпонентных динамических системах и предложили удобную конструкцию для учета эффектов памяти. С другой стороны, применение дробных пространственных производных четко ассоциируется с нелокальными взаимодействиями и сложной кинетикой фрактального типа. Однако, при всей перспективности дробно-дифференциального подхода, следует признать, что его широкое применение пока находится на начальном этапе. В этой перспективе внедрение обоснованных моделей распределённых систем с дробными особенностями взаимодействия является своевременным, востребованным и способно оказать существенное влияние на развитие не только теоретической физики и прикладной математики, но и целого спектра естественных наук.

В частности, используемая в диссертации концепция супердиффузионного взаимодействия позволяет организовать сеть связанных Хиндмарша-Розе осцилляторов, поддерживающих состояния частичной синхронизации. Автор всесторонне обосновывает релевантность дробно-дифференциального формализма, четко определяет границы его применения, а также соотносит предложенную схему с актуальными моделями описания сетей взаимодействующих нейронов. В диссертации рассматривается аналитическая сторона вопроса, связывающая показатели дробного оператора Лапласа как со структурными особенностями организации сетевой архитектуры, так и с развитием некогерентных режимов, состояний полной и частичной синхронизации. Производится сопоставление аналитических качественных результатов с динамической реализацией нелокального итерационного отображения, определяющего динамику супердиффузионной сети. На основе дробно-дифференциального принципа модифицируется мера пространственной когерентности, обобщающая ее на случай

спектра дробных мер пространственной когерентности, что может найти применение для осмысления широкого множества моделей сложных систем. Все вышеизложенное свидетельствует **об актуальности темы диссертационного исследования**, а использование нескольких независимых подходов для оценки состояний частичной синхронизации и их сопоставление с качественными аналитическими представлениями подтверждают **обоснованность и достоверность полученных результатов**.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 125 страниц, включая 21 рисунок, 238 источников.

Во Введении рассматривается актуальность темы диссертации, а также формулируется цель и задачи исследования. Также происходит обсуждение научной новизны результатов, обосновывается фундаментальная и прикладная значимость проведенных исследований, формулируются основные положения, выносимые на защиту. Приведена информация, связанная с апробацией работы, а также списком опубликованных статей по теме диссертации.

В **Главе 1** автор проводит обзор актуальной литературы, посвященной нелинейным распределенным моделям, а также методам дробно-дифференциального исчисления применительно к динамике как точечных, так и распределенных многокомпонентных систем. Отдельное внимание уделяется состояниям частичной синхронизации в ансамблях взаимодействующих нейронов. Обсуждение данного явления ведется как с эмпирической точки зрения, так и с позиций математического моделирования, ориентированного на описание данных явлений. В частности, рассматриваются актуальные схемы связей для ансамблей осцилляторов, широко применяемые в современной нелинейной динамике. Завершая обзор, автор акцентирует внимание на моделях с нелокальными взаимодействиями, построенных на основе реакционно-супердиффузионного подхода.

Глава 2 посвящена обсуждению релевантности супердиффузионного подхода в контексте описания систем взаимодействующих нейронов, а также построению на его основе системы нелокальных итерационных отображений. Особое внимание уделяется потенциальным ограничениям данного подхода применительно к моделированию нейронных ансамблей. Автор также вводит в рассмотрение непрерывные системы для исследуемой постановки, а именно реакционно-супердиффузионную двух- и трехкомпонентную модель с нелинейными функциями Хиндмарша-Розе. Помимо этого, описываются основные метрики, используемые для оценки состояний частичной синхронизации.

В **Главе 3** рассматриваются динамические реализации состояний частичной синхронизации в одномерной системе, вводится нелокальное итерационное отображение на основе двумерной системы, а также обобщаются ранее введенные метрики на двумерный случай. Демонстрируются различные виды состояний частичной синхронизации для двумерных двух- и трехкомпонентных постановок. В рамках данной главы проводится сопоставление параметрического пространства показателей дробного оператора Лапласа, ответственных за внутреннюю структуру сети, как для одномерных, так и двумерных двухкомпонентных систем. Демонстрируется общее сходство структуры данного пространства для одномерного и двумерного случаев в контексте развития состояний полной синхронизации и развитой некогерентности.

В **Главе 4** формулируется детальная постановка исследования параметрического пространства показателей дробного оператора Лапласа. Выделяются параметрические зоны однородных и неоднородных синхронизационных переходов, качественно отражающих различия в структуре пространства супердиффузионных конфигураций. Дополнительно рассматривается область, расположенная между зонами однородных и неоднородных синхронизационных переходов. Обсуждается филаментарная структура данной области в контексте сложной, но организованной связи между архитектурой супердиффузионного взаимодействия и динамическим откликом ансамбля нейронов. В этой же главе модифицируется дробная мера пространственной когерентности с использованием дробно-дифференциальной постановки. На основе предложенного подхода выявляются дополнительные особенности указанного участка параметрического пространства.

Глава 5 посвящена качественному аналитическому подходу к осмыслению реализуемых динамических режимов в контексте расширенного линейного анализа и исследования структуры пространства супердиффузионных конфигураций. Автор рассматривает одномерную двухкомпонентную реакционно-супердиффузионную систему и получает решение характеристического уравнения как функции пространственных мод, так и показателей дробного оператора Лапласа. Полученные данные о типах устойчивости и неустойчивости сопоставляются с динамическими реализациями системы. На основе представленного подхода вводится определение потенциального нового динамического явления – несогласованной дробной Тьюринговской неустойчивости, которое может быть обнаружено в специальном образом сконфигурированных системах с дробно-несогласованным типом взаимодействия.

В **заключении** формулируются основные результаты проделанной работы.

Диссертация производит хорошее впечатление, однако в ней имеются и недостатки:

1. Автор использует единственный подход к определению начальных условий для демонстрации развития состояний частичной синхронизации. С точки зрения формирования общего контекста было бы полезно оценить влияние и иных форм начальных условий, в том числе, условий с явным нарушением изначальной пространственной симметрии — которые часто используются в данной науке.
2. Введение обозначений [1D2C], [1D3C] — для супердиффузионных постановок, [HR2], [HR3] — для нелинейной модели Хиндмарша-Розе, а также [UDRIC] и [WPSSIC] — для конфигураций начальных условий, выбивается из общепринятой практики введения научных сокращений.

Отмеченные замечания не снижают научной и практической значимости диссертации и не ставят под сомнение ее основные результаты.

Заключение по диссертации

Диссертация Фатеева И.С. соответствует паспорту научной специальности 1.3.3 — «Теоретическая физика» и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Она относится к кругу задач теории открытых неравновесных систем и содержит целостное, самосогласованное исследование актуальной проблемы — реализации динамических режимов частичной синхронизации в системах осцилляторов с супердиффузионным типом взаимодействия. Автор определяет контекст, в котором предложенный дробно-дифференциальный подход к построению сетевой архитектуры соотносится с современными задачами нелинейной динамики распределённых систем и теоретической биофизики, в частности с задачами моделирования систем взаимодействующих нейронов. Данная особенность позволяет четко соотнести результаты диссертации с актуальными и интенсивно развивающимися направлениями нелинейной динамики, нацеленными на построение физических моделей когнитивных процессов. Предложенная архитектура и подходы к оценке состояний частичной синхронизации, построенные на дробно-дифференциальном принципе, обладают универсальностью, позволяющей применять их для моделирования и исследования широкого спектра сложных систем в теоретической физике и смежных естественнонаучных дисциплинах. Результаты работы опубликованы в ведущих российских и международных профильных журналах, а также прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. Все основные аспекты диссертационного исследования отражены в автореферате.

Работа Фатеева Ильи Сергеевича удовлетворяет всем требованиям пп. 9–11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, доцент,

Заведующий кафедрой теории управления и динамики систем,

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" (ННГУ)

Контактные данные: Тел.: +7 (831) 462-33-57, e-mail: grigori.osipov@itmm.unn.ru

Адрес места работы: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" (ННГУ)

Осипов Григорий Владимирович

01.09.2026

ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ

(подпись)

(дата)

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ
ННГУ

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

1. Bolotov, M. I., Smirnov, L. A., Munyayev, V. O., & Osipov, G. V. (2025). Chimera states in a system of stationary and flying-through deterministic particles with an internal degree of freedom. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 35(1), 013139.
2. Bolotov, M. I., Smirnov, L. A., Munyayev, V. O., Osipov, G. V., & Belykh, I. (2025). Heterogeneity induces cyclops states in Kuramoto networks with higher-mode coupling. *Physical Review E*, 112(5), L052202.
3. Munyayev, V. O., Bolotov, M. I., Smirnov, L. A., & Osipov, G. V. (2024). Two-cluster regular states, chimeras and hyperchaos in a system of globally coupled phase oscillators with inertia. *Chaos, Solitons & Fractals*, 179, 114415.
4. Bolotov, M. I., Munyayev, V. O., Smirnov, L. A., Osipov, G. V., & Belykh, I. (2024). Breathing and switching cyclops states in Kuramoto networks with higher-mode coupling. *Physical Review E*, 109(5), 054202.
5. Smirnov, L. A., Munyayev, V. O., Bolotov, M. I., Osipov, G. V., & Belykh, I. (2024). How synaptic function controls critical transitions in spiking neuron networks: insight from a Kuramoto model reduction. *Frontiers in Network Physiology*, 4, 1423023.
6. Munyayev, V. O., Bolotov, M. I., Smirnov, L. A., Osipov, G. V., & Belykh, I. (2023). Cyclops states in repulsive Kuramoto networks: The role of higher-order coupling. *Physical Review Letters*, 130(10), 107201.
7. Kostin, V. A., Munyayev, V. O., Osipov, G. V., & Smirnov, L. A. (2023). Synchronization transitions and sensitivity to asymmetry in the bimodal Kuramoto systems with Cauchy noise. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 33(8), 083155.
8. Arefev, A. M., Grines, E. A., & Osipov, G. V. (2023). Heteroclinic cycles and chaos in a system of four identical phase oscillators with global biharmonic coupling. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 33(8), 083112.
9. Munyayev, V. O., Bolotov, M. I., Smirnov, L. A., Osipov, G. V., & Belykh, I. V. (2022). Stability of rotatory solitary states in Kuramoto networks with inertia. *Physical Review E*, 105(2), 024203.
10. Smirnov, L. A., Bolotov, M. I., Bolotov, D. I., Osipov, G. V., & Pikovsky, A. (2022). Finite-density-induced motility and turbulence of chimera solitons. *New Journal of Physics*, 24(4), 043042.