

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Андреева Андрея Викторовича
«Нелинейно-динамические модели процессов взаимодействия в ансамблях
нелинейных осцилляторов в присутствии внешнего сигнала (связанные
ридберговские атомы, нейронные сети)»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

Диссертационная работа Андреева Андрея Викторовича посвящена одному из наиболее перспективных направлений современной радиофизики – моделированию нелинейно-динамических процессов в физических и физико-биологических системах. В частности, им проведено моделирование коллективной динамики цепочек ридберговских атомов и сетей нейроноподобных колебательных элементов с различной топологией, а также выявлены возможности управления динамикой таких систем посредством внешних сигналов. Актуальность этих задач, в первую очередь, обусловлена повышенным интересом к изучению физических объектов, способных обрабатывать, хранить и передавать информацию. На основе ридберговских атомов могут быть сформированы кубиты – элементы необходимые для квантовых вычислений; исследование моделей нейронных сетей, динамика которых может существенно меняться под действием внешних входов, таких, как, например, сенсорных сигналов, могут прояснить фундаментальные принципы обработки информации в мозге и послужить прототипом систем обработки информации нового типа. Поскольку оба этих объекта исследований демонстрируют явно выраженные автоколебательные свойства, то, несомненно, важной научной задачей радиофизики представляется изучение коллективной динамики и синхронизации в этих системах. Отдельно выделим такое быстро развивающееся научное направление, как изучение химерных и химероподобных состояний в сетях нейроноподобных осцилляторов, при которых в фазовом пространстве этих сетей одновременно сосуществуют синхронные и асинхронные кластеры. Эта задача представляется важной и интересной, поскольку очевидно, что

полностью синхронизированная нейронная сеть обладает тривиальной динамикой и неспособна эффективно обрабатывать информационные потоки.

В диссертации предоставлены новые физические результаты в области изучения нелинейной колебательной динамики в цепочках, решетках и сетях нелинейных осцилляторов, в том числе и в присутствии внешнего сигнала, полученные с применением современных аналитических, численных и экспериментальных методов.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 159 страниц.

Во **введении** обосновывается актуальность, новизна и практическая значимость работы, формулируются цель и задачи исследования, а также основные научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию динамики систем взаимодействующих ридберговских атомов: двух атомов, замкнутых цепочек и квадратных решеток, состоящих из различного числа элементов. Для системы из двух атомов был обнаружен хаотический режим, а в замкнутых цепочках и решетках, в дополнение к хаотическому режиму, – гиперхаос. Выявлен эффект непрерывного роста числа пространственных показателей Ляпунова при увеличении числа атомов в цепочке. Продемонстрирована возможность управления гиперхаосом в замкнутых цепочках и решетках ридберговских атомов с помощью введения внешнего параметрического воздействия, например, при модуляции частоты Раби.

Во **второй главе** исследована динамика сетей нейроподобных элементов (на базе дискретной модели нейрона Рутькова и модельного нейрона Ходжкина-Хаксли) при внешнем стимулирующем воздействии. В исследуемых системах обнаружен эффект когерентного резонанса, который заключается в достижении максимума отношения сигнала к шуму при некоторых значениях амплитуды внешнего стимула. Для апробации полученных результатов было проведено экспериментальное исследование, в ходе которого испытуемым людям последовательно демонстрировались визуальные стимулы в виде портретов Моны Лизы с разной степенью контрастности, и параллельно снималась электроэнцефалограмма (ЭЭГ)

активности их головного мозга. Результаты этого исследования показали, что существуют оптимальные значения контрастности изображения, при которых количество каналов ЭЭГ с высокой когерентностью максимально, что хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями.

Третья глава посвящена исследованию динамики сети бистабильных нейронов Ходжкина-Хаксли для трех разных топологий связи. В данных сетях обнаружено возникновение химерподобного состояния, характеризующегося тем, что часть элементов сети оказывается в стационарном состоянии, в то время как вторая генерирует спайки. Продемонстрирована возможность управления размером популяции активных нейронов, подавая короткий импульс внешнего тока, исследована устойчивость узлов к изменению их динамики в зависимости от количества связей с узлом.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Степень обоснованности научных положений, научная новизна и значимость полученных в диссертации результатов не вызывает сомнения.

Среди наиболее значимых с научной точки зрения результатов диссертационного исследования можно отметить следующие:

- В цепочке связанных ридберговских атомов впервые было обнаружено возникновение хаоса, характеризуемого только одной положительной ляпуновской экспонентой, и гиперхаоса, которому соответствуют не менее двух положительных ляпуновских показателей;
- продемонстрирована возможность управления гиперхаосом с помощью внешнего параметрического воздействия в цепочке и решетке связанных ридберговских атомов;
- обнаружен эффект когерентного резонанса при обработке сетью внешнего стимульного воздействия как для связанных феноменологических нейроноподобных элементов Рутькова с дискретным временем, так и для сети биофизических модельных нейронов Ходжкина-Хаксли, построенных на балансе трансмембранных ионных токов;

- обнаружено возникновение химероподобного состояния в сетях бистабильных нейронов Ходжкина-Хаксли с разными типами топологии связи: «малый мир», масштабно-инвариантная и случайная, а также выявлены особенности реализации данного состояния в каждой из топологий сети.

Результаты диссертационного исследования обладают несомненной **научной и практической** значимостью. В частности, была впервые была показана возможность возникновения хаотической и гиперхаотической динамики в системе ридберговских атомов, а также обнаружен линейный рост числа положительных показателей Ляпунова с увеличением числа осцилляторов в системе. Эти результаты вместе с выявленными механизмами управления такими режимами (подавления хаотических и гиперхаотических состояний) с помощью внешнего воздействия могут быть использованы в прикладных задачах для управления сложными режимами в ансамблях кубитов при решении задач квантовых вычислений. Также было продемонстрировано явление когерентного резонанса при обработке нейронной сетью внешнего сигнала, заключающееся в том, что динамика сети становится наиболее когерентной при определенной величине внешнего стимула. Примечательно, что этот эффект был получен как в рамках нескольких математических моделей нейронных сетей, так и при экспериментальном исследовании активности мозга испытуемых. Кроме того, обнаружена возможность возникновения химероподобного состояния в сети нейронов Ходжкина-Хаксли. Эти результаты, касающиеся динамики нейронных сетей, расширяют существующие представления о процессах обработки информации, протекающих в мозге.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов, сформулированных положений и сделанных выводов обеспечивается адекватностью применённых моделей, корректностью исходных и упрощающих допущений, использованием уравнений, методов и подходов, которые строго обоснованы в научной литературе, апробированы и хорошо себя зарекомендовали при проведении научных исследований.

Результаты диссертационного исследования представлены в 39 печатных работах, из которых 12 – в реферируемых журналах, индексируемых в международных базах Web of Science и/или Scopus, 20 тезисов материалах международных и всероссийских конференций, из которых 3 – индексируемых в системах цитирования Web of Science и/или Scopus. Также автором получено 7 свидетельств о государственной регистрации программы на ЭВМ.

Диссертационная работа написана ясным языком, имеет логически выстроенную структуру, содержит достаточное количество ссылок на предшествовавшие научные исследования. Диссертация полностью соответствует специальности 01.04.03 «Радиофизика» (физико-математические науки), удовлетворяя пп. 2 и 4 паспорта данной специальности. Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

Вместе с тем, как и всякая диссертационная работа, работа Андреева А.В. не свободна от некоторых недостатков. По содержанию работы можно высказать следующие замечания:

1. Автору следует быть более внимательным при выборе и написании русскоязычных научных терминов, использовать устоявшиеся названия, а также избегать жаргонизмов. Так, например, бифуркация типа “вилка” в русскоязычной литературе обычно называется бифуркацией потери симметрии, в бифуркации Андронова-Хопфа обе фамилии пишутся с большой буквы, название седло-узловой бифуркации пишется через тире, топология scale-free обычно переводится как безмасштабная или масштабно-инвариантная и т.д.
2. В первой главе переход к хаотическому режиму в системе двух взаимодействующих элементов ридберговских атомов и, судя по диаграммам на рис. 1.11, в замкнутых цепочках ридберговских атомов происходит через каскад бифуркаций удвоений периода. Наблюдается ли в этом случае универсальность Фейгенбаума?
3. Во второй главе, на мой взгляд, при обсуждении соответствия теоретических результатов по когерентному резонансу с экспериментальных исследований, недостаточно полно описана связь

топологий модельных нейронных сетей с реальным устройством областей мозга, задействованных при обработке изображений. Без такого объяснения соответствие теоретических и экспериментальных результатов не выглядит очевидным.

4. В третьей главе автор описывает бассейны притяжения двух аттракторов модельного нейрона Ходжкина-Хаксли в бистабильном режиме: состояния равновесия и предельного цикла, а также условия переходов между ними при внешнем воздействии импульсом тока. Очевидно, что в рамках заданной динамической системы, бассейны притяжения этих аттракторов разделяются неустойчивым сепаратрисным многообразием седлового предельного цикла. Поскольку при переходе от предельного цикла к состоянию равновесия, эффективность воздействия зависит от близости предельного цикла к сепаратрисному многообразию, имело бы смысл, по аналогии с кривой переустановки фазы (phase response curve, PRC), построить на периоде предельного цикла зависимость, показывающую эффективность перехода от него к состоянию равновесия в зависимости от его фазы. Это бы значительно упростило трактовку результатов, полученных для сетевой модели.
5. В работе присутствует ряд опечаток, например, на странице 27 перепутан род местоимения «...и в его окрестности...», хотя речь идет о точке; на странице 42 инициал А. у математика Анри Пуанкаре написан с маленькой буквы; на странице 58 пропущено слово «удаётся» в предложении «...при которых снизить число положительных Ляпуновских показателей на 1...»; на странице 124 написано «...когерентных паттерном...» вместо «... когерентных паттернов...», и т.д.

В целом, диссертационная работа производит положительное впечатление, а указанные недостатки не носят принципиального характера и не снижают ценности полученных результатов.

Диссертационная работа «Нелинейно-динамические модели процессов взаимодействия в ансамблях нелинейных осцилляторов в присутствии внешнего сигнала (связанные ридберговские атомы, нейронные сети)»

удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Андреев Андрей Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Центра
нейроэкономики и когнитивных исследований
Института когнитивных нейронаук ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

Захаров Д.Г.

24 ноября 2020 г.

Адрес места работы: НИУ ВШЭ, 101000, г. Москва, Кривоколенный пер., 3;
тел.: +7 (495) 722 95 90, доб. 22-370

e-mail: dgzakharov@hse.ru

Научная специальность кандидатской диссертации Захарова Дениса Геннадьевича – 01.04.03 – Радиофизика.

Подпись к.ф.-м.н. Захарова Дениса Геннадьевича удостоверяю

подпись заверю

СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ
Управления о ПЕРСОНАЛА
ПРОТОНОВ А.А.
ФГАОУ ВО НИУ ВШЭ