
А.Н. Чумаченко

« 12 » ноября 2025 г.

ведущей организации

Диссертационная работа Маковкина Сергея Юрьевича представляет собой законченное научное исследование, посвященное исследованию эффектов синхронизации в мультиплексных многослойных сетях математических моделей нейрон-астроцитарных систем. Рассмотрение многослойных сетевых моделей с колебаниями на различных временных масштабах позволило учесть важные особенности биологических нейрон-астроцитарных систем, а по комплексу изучаемых явлений затрагивает фундаментальные аспекты явлений синхронизации, десинхронизации и мультистабильности, являющихся базовыми в радиофизике.

Диссертационная работа Маковкина Сергея Юрьевича логично и последовательно выстроена, вопросы, рассматривающиеся в последующих главах, органично опираются на полученные результаты исследований, описанных в предыдущих разделах. В работе проведены оригинальные исследования синхронизации в мультиплексной двухслойной сети фазовых осцилляторов, в которой слои имеют разный временной масштаб колебаний (высокочастотный и низкочастотный) и разную топологию связей, что отражает биологические особенности нейрон-астроцитарных систем; исследована синхронизация в мультиплексной сети фазовых осцилляторов с топологией связей типа «малый мир» («small-world» topology) с меняющейся долей случайно переключенных связей в высокочастотном слое и регулярной топологией связей в низкочастотном слое. В диссертационной работе проведены исследования влияния астроцитарной регуляции связей на синхронизацию двух нейронов в минимальном ансамбле биологически реалистичных динамических моделей, таких как модель Ходжкина-Хаксли-Мэйнена для нейронов и Уллаха-Юнга для астроцитов; исследована астроцитарная регуляция нейронных связей в реалистичной математической модели нейрон-астроцитарной сети области

гиппокампа головного мозга.

Актуальность и значимость результатов научных исследований Маковкина С.Ю., изложенных в диссертационной работе, не вызывает сомнений. Помимо фундаментального теоретического значения, представленные в диссертационной работе результаты потенциально могут быть использованы при изучении и работе со сложными многокомпонентными системами (не только биологической природы), включая проблематику нейронных сетей и нейроморфных вычислений. Дополнительным аргументом актуальности научной проблемы, рассмотренной в диссертационной работе, является большой объём научных публикаций, посвящённых нейродинамике.

Структура диссертационной работы логична и соответствует ее содержанию. Диссертация Маковкина С.Ю. изложена на 121 страницах (включая 36 рисунков, 5 таблиц), содержит введение, обзор современного состояния проблематики, четыре главы, заключение и список литературы, включающий 102 источника. В изложении результатов диссертационной работы автору удалось найти разумный баланс между детальностью и лаконичностью изложения материала.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована её цель и задачи, отражена научная новизна работы, а также её теоретическая и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы показано, что введение взаимодействия с низкочастотным слоем дополнительно к изначально синхронизованному высокочастотному слою может приводить к частичной десинхронизации колебаний на некотором интервале значений параметра взаимодействия. Предложено объяснение механизма этого явления на основе специально сконструированной минимальной модели, включающей два осциллятора под внешним воздействием.

Во второй главе соискателем проведено исследование синхронизации в мультиплексной сети фазовых осцилляторов и рассмотрена зависимость степени синхронизации от доли случайно переключенных связей в высокочастотном слое. В главе рассматриваются топологии регулярной локальной связи, топологии «малого мира» («small-world network») и полностью случайных связей. Показано, что даже небольшой доли случайно переключенных связей в сети с топологией «small-world» достаточно, чтобы нарушить мультистабильность режимов синхронизации вихревого типа и вызвать синхронизацию (в смысле фазового параметра порядка Курамото) как в высокочастотном, так и в низкочастотном слоях. Продолжительность переходной динамики в системе, измеряемая временем релаксации параметра порядка, уменьшается с увеличением доли случайных связей в высокочастотном слое, принимая наибольшие значения вблизи переходов синхронизации-десинхронизации.

В третьей главе, в биологических моделях, основанных на системах

Ходжкина-Хаксли-Мэйнена и Уллаха-Юнга, показано, что астроциты вместе с синаптически связанными нейронами образуют замкнутый контур, в котором эффективная сила связи элементов зависит от временной динамики элементов системы. Интересно, что астроцит может вызывать перемежающуюся (на временном масштабе кальциевых колебаний) синхронизацию пары синаптически связанных колеблющихся нейронных осцилляторов Ходжкина-Хаксли-Мэйнена.

В четвёртой главе соискателем показано, что астроцитарная регуляция передачи сигналов между нейронами увеличивает частоту синхронизации в сети тормозных нейронов и расширяет область синхронизации в пространстве параметров сети в пределах биологически релевантных значений силы синаптической связи. Показано также, что вызванное астроцитами усиление тормозной связи заметно повышает степень синхронизации колебаний в сети тормозных нейронов и, наоборот, индуцируемое астроцитами усиление связи между возбуждающими нейронами и тормозными нейронами понижает степень синхронизации колебаний в сети тормозных нейронов при физиологически релевантных параметрах возбуждающих входных воздействий.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, следует считать высокой, что подтверждается большим объемом согласованных данных теоретических и численных исследований, полученных с использованием современных методов, а также более ранними результатами научных исследований других авторов, изложенных в использованных в диссертации библиографических источниках (102 источника по рассматриваемой в диссертационной работе тематике). Обоснованность научных положений также подтверждается логикой и последовательностью проведенного диссертационного исследования. Соискатель ученой степени всесторонне обосновал значимость своего исследования, раскрыл содержание научной проблемы, показал ее теоретическую и практическую значимость.

Достоверность результатов научных исследований, приведенных в диссертационной работе, базируется на использовании строгих математических процедур, общеизвестных и общепринятых уравнений, методов и подходов, строго обоснованных в научной литературе и хорошо себя зарекомендовавших в научном сообществе, а также на обоснованном выборе параметров использованных численных методов. Достоверность полученных результатов верифицируется с помощью сопоставления с результатами, полученными при помощи других различных методов и подходов, включая результаты экспериментальных исследований нейробиологов, а также аналитически и численно полученные данные. Приведенные в диссертационной работе результаты характеризуются отсутствием противоречий с известными в научной литературе достоверными и общепризнанными результатами.

Научная новизна результатов диссертационного исследования не

вызывает сомнений, поскольку диссертационная работа содержит принципиально новые научные результаты в области исследования динамических режимов мультиплексных сетевых моделей. Результаты, изложенные в диссертационной работе, позволяют существенно продвинуться в понимании глубинных механизмов изучаемой проблемы, заполняют существующие пробелы в теории синхронизации и расширяют современную теорию нелинейных динамических систем. В то же самое время, как уже отмечалось выше, результаты диссертационной работы находятся в хорошем соответствии с существующими на данный момент знаниями в этой области науки, гармонично расширяя, уточняя и дополняя их.

Научная значимость определяется исследованием новых закономерностей, наблюдаемых в мультиплексных сетевых моделях нейрон-астроцитарных ансамблей, расширением инструментария для численного исследования поведения таких систем. Полученные результаты являются новыми и нетривиальными. Совокупность результатов, изложенных в диссертационной работе, существенно расширяет существующие представления о механизмах формирования динамических режимов в таких сетевых моделях. Новизна и научная значимость основных результатов, изложенных в диссертации, подтверждается публикациями в целом ряде высокорейтинговых рецензируемых научных журналов с высоким импакт-фактором, входящих в международные и российские системы цитирования Web of Science, Scopus, РИНЦ.

Практическая значимость диссертационной работы обусловлена тем, что полученные в ходе диссертационного исследования результаты потенциально могут позволить использовать выявленные особенности при работе со сложными многокомпонентными системами, в том числе в задачах, связанных с большими нейронными сетями и искусственным интеллектом. Разработанные в ходе исследования математические модели могут быть использованы для интерпретации результатов экспериментальных исследований в области нейрофизиологии.

Личный вклад диссертанта не вызывает сомнений.

В то же самое время, по содержанию диссертационной работы имеется ряд **вопросов и замечаний**:

1. В диссертационной работе явным образом превалируют результаты численного моделирования. Понятно, что использование аналитических подходов в данном случае затруднено сложностью самих объектов исследования. Тем не менее, при изучении явлений, возникающих в сетях нелинейных элементов со сложной топологией межэлементных связей, известно достаточно большое количество удачных примеров использования аналитических подходов, позволяющих описать наблюдаемые явления с теоретической точки

зрения с помощью математического аппарата. В настоящей диссертационной работе явно чувствуется дефицит теоретического описания и было бы неплохо, если бы соискатель более смело подошел к вопросу объяснения наблюдаемых явлений с позиций аналитического описания.

2. Усреднение результатов по случайным распределениям начальных частот и случайным топологиям связности высокочастотного слоя осцилляторов (стр. 20 диссертационной работы), безусловно, имеет право на использование, однако, при определенных условиях, может приводить к искаженному пониманию происходящих процессов. Было бы уместным обосновать применение данного подхода в рассматриваемом случае.
3. При описании полученных результатов изучения времени релаксации в высокочастотном слое при различных топологиях межэлементных связей (вторая глава диссертационной работы) соискатель ограничивается качественным описанием того, как ведет себя это самое время релаксации, но не дает ни качественных, ни, тем более количественных объяснений тому, почему это так происходит.
4. В диссертационной работе есть недочеты, связанные с оформлением. Наиболее бросающимся в глаза и, в какой-то мере, раздражающим недочетом являются неудачные разрывы страниц (сопровождающиеся пустым местом на страницах), связанные с вставкой рисунков, а также последовательное следование рисунков одного за другим, каждый на своей странице (см. например, стр. 68–72 диссертационной работы). Такое может происходить, например, в пакете LaTeX при неудачном локальном соотношении текста и иллюстраций, но, все-таки, эта техническая проблема решается достаточно просто.

В то же самое время, указанные замечания не носят принципиального характера, не портят общего положительного впечатления о рассматриваемой диссертационной работе и не ставят под сомнение достоверность полученных результатов.

Заключение

Диссертационная работа Маковкина Сергея Юрьевича «Синхронизация колебаний в мультиплексных сетевых моделях нейрон-астроцитарных ансамблей» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему, отличающуюся научной новизной и практической значимостью полученных результатов. Диссертация отличается высоким научным уровнем и вносит значимый вклад в развитие радиофизики. Содержание диссертации соответствует паспорту научной

специальности 1.3.4. – Радиофизика. Автореферат полно и правильно отражает ее содержание.

Основное содержание диссертации в полной мере изложено в работах, опубликованных соискателем ученой степени, диссертационная работа прошла хорошую апробацию. Основные положения диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях. По теме диссертации автором опубликовано 16 работ: 4 статей в изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus; 12 тезисов докладов в сборниках трудов научных конференций; 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертация соответствует критериям, установленным требованиями пп. 9 – 11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Маковкин Сергей Юрьевич, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – «Радиофизика».

Диссертация рассмотрена на заседании кафедры физики открытых систем института физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (протокол № 4 от 12 ноября 2025 года).

Отзыв составил:

заведующий кафедрой физики открытых систем института физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского», доктор физико-математических наук (01.04.03 – Радиофизика), профессор
Короновский Алексей Александрович

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

Почтовый адрес: 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83.

Телефон: +7 (8452) 26-16-96.

Адрес электронной почты: rector@sgu.ru

Адрес официального сайта в сети «Интернет»: <http://www.sgu.ru>

