

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Герасимовой Светланы Александровны на тему «Генерация и синхронизация сигналов в нейроморфных радиофизических системах» представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика

Исследование нейрональных и нейроподобных систем является одной из традиционных областей радиофизики, истоки которой восходят к аналогиям между радиофизическим моделированием нелинейных автоколебательных систем (модель Бонхёффера-ван дер Поля) и нейроподобной динамикой (система ФитцХью-Нагумо). Вместе с тем, современное развитие науки в данной сфере открывает широкие перспективы для исследования нейродинамики сложных связанных систем, приближающих биофизически-реалистичную динамику, на основе новых элементов, свойства которых приближены к натурным, в частности, мемристоров, физическая реализация которых начала активно развиваться только в последние годы. Таким образом, тематика данной диссертационной работы отличается высокой актуальностью как в области фундаментальных задач теории динамических систем, так и сточки зрения перспективных практических приложений для разработки нейроинтерфейсов, решающих как задачи исследования мозговой активности, так и разработки медицински-ориентированных устройств.

Диссертационная работа Герасимовой С.А. представляет собой цельное исследование в рамках поставленных задач, изложенное на 114 страницах, и состоящее из введения, трех глав, отражающих оригинальный материал авторских исследований, тематика которых полностью соответствует паспорту специальности 01.04.03 – Радиофизика, заключения и списка литературы, включающего в себя 140 наименований, отражающих современное состояние науки в области радиофизических подходов к решению задач нейродинамики на основе физического и математического моделирования.

Введение убедительно обосновывает актуальность работы и следующие из нее четко поставленные цель и задачи, формулирует научную новизну и выносимые на защиту положения, приводит необходимые сведения о личном вкладе автора, аprobации и публикации результатов, а также их теоретической и практической значимости. Помимо этого, введение содержит ясно написанный и достаточный обзор литературы по теме диссертации, сообщающий как базовые сведения в области радиофизического подхода к нейронауке, обеспечивающие необходимую для последовательного чтения и понимания текста справочную информацию, так и достаточно детальный анализ самого современного состояния проблемы.

Первая глава посвящена изложению результатов исследования натурной радиофизической модели синаптически связанных нейроноподобных генераторов, взаимодействующих через оптоволоконный канал связи, имитирующий синаптическую передачу импульсных сигналов между нейронами мозга. Разработанная натурная модель базируется на хорошо обоснованной для моделирования нейродинамики системе ФитцХью-Нагумо, параметры системы выбраны адекватно, соответствующий частотный диапазон генерируемых импульсов является биологически-реалистичным. Связь между осцилляторами реализована на современной оптоволоконной базе, обеспечивающей режим достаточной «чистый» режим передачи, что позволило получить ясно выраженные экспериментальные картины нейроподобной динамики и переходов между различными режимами синхронизации нелинейных колебаний. Разработанная электронная схема служит основной для исследований, описанных в последующих главах.

Во **второй главе** исследуется динамика связанных радиотехнических аналоговых нейроподобных генераторов, соединенных посредством мемристивного устройства, как в теоретической модели, так и в натурном эксперименте. Следует отметить хорошее согласие теоретических и экспериментальных результатов, являющееся убедительным аргументом в

пользу адекватности построенной модели. Мемристивная связь реализована на основе новых пленочных структур, эффективно проявляющих свойства перехода между высокоомным и низкоомным состояниями. В контексте исследуемого круга задач, такое поведение соответствует имитации синаптической связи между нейронами, и в частности, реализации процесса обучения путем формирования весов связей, обеспечивающих целевую синхронизацию нейрональных автоколебаний связанных элементов. Представленное исследование выполнено весьма тщательно и убедительно проиллюстрировано последовательностью результатов, относящихся к различным аспектам решаемых задач: вольтамперным и вольтрезистивным характеристикам исследуемых мемристивныхnanoструктур, их отклику на сигналы в зависимости от амплитуды и длительности последних, выявлению динамики сигналов нейроноподобных генераторов, связанных через мемристивное устройство по схеме «ведущий-ведомый», в ходе чего выявлены режимы синхронизации различных порядков. Таким образом, в работе как исследованы свойства материалов, перспективных для разработки новых радиотехнических элементов, так и наглядна показана их применимость к моделированию нейроморфных динамических систем.

Третья глава рассматривает наиболее перспективную и интересную задачу построения нейрогибридной системы, состоящей среза нейрональной ткани гиппокампа (область CA1), нейроноподобного генератора, описанного выше и оптоволоконного канала, реализующего связь между ними. В результате проведенных экспериментов выявлены режимы возбуждения биологической нейроткани под воздействием импульсов порождаемых технической нейроморфной системой, в том числе различные режимы вынужденной синхронизации, аналогичные исследованы ранее (и описанные в первой главе) для двух нейроморфных радиофизических систем. Подобная аналогия является существенно положительной чертой данной диссертационной работы, так как она подтверждает возможность имитационного моделирования

нейроинтерфейса в более контролируемой радиофизической модели с последующим переносом на связанную систему «электронный компонент – биологический компонент». Заметный интерес представляет также проведенное изучение амплитуд связанных автоколебаний, так как, в отличие от более традиционного исследования частотной взаимосвязи нейросигналов, данный аспект менее изучен, но он является важным с практической точки зрения реализаций контактных нейроинтерфейсов. На основе решения указанного комплекса подзадач, заключительная часть третьей главы предлагает концептуальную схему в технологии замещения поврежденных участков мозга, обосновывая ее перспективы для коррекции проблем памяти и пространственной ориентации.

В **заключении** суммированы основные результаты и выводы по работе в целом.

Таким образом, диссертационная работа представляет законченное комплексное исследование с выдержанной последовательностью и научной логикой. Вместе с тем, к изложению материала в тексте диссертации имеется ряд замечаний, в частности:

- определенная неряшливость в терминологии, такая как
 - употребление словосочетаний «живые нейроны» и «живые биообъекты», когда речь идет о срезах тканей – есть общепринятый термин *in vitro*, описывающих такую ситуацию, и отличающий ее от *in vivo*, относящегося к работе с живыми объектами;
 - «амплитудой» (например, на стр. 76-77) именуются не максимальные значения осциллирующих переменных динамической системы, а также и их мгновенные величины;
 - утверждения о демонстрации синхронизации N:1 без дополнительных уточнений, в ситуациях, когда речь идет о системах с односторонней связью, т.е. не о взаимной, а вынужденной синхронизации, или даже захвате (oscillatory entrainment);

- ряд дополнительной информации усилил бы обоснование результатов, а именно
 - было бы полезно количественно промерить нелинейность полученного оптоволоконного канала, используемого для построения оптоэлектронных связей в моделях взаимодействующих осцилляторов;
 - помимо представленных в работе временных зависимостей и фазовых портретов решений модельных систем, определенный интерес с точки зрения классического радиофизического подхода к исследованию динамических систем имел бы их бифуркационный анализ;
- в тексте имеется ряд опечаток (например, в расшифровке функций под системой (3) третья степень превратилась в нижний индекс) и пропусков (рис. 37 не указано, где изображен стимулирующий сигнал, а где нейрональный ответ).

Однако данные замечания в основном относятся к отдельным недочетам в изложении материала в тексте и не снижают общего весьма положительного впечатления от работы в целом, которая является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение ряда научных задач, имеющих значение для развития современной радиофизики и нейронауки, а также характеризуются высокой практической значимостью в области приложения радиофизических разработок к задачам исследования функционирования мозга и возможной коррекции проблем, связанных с его нарушением.

Полученные результаты обладают несомненной научной новизной и значимостью, их надежность и достоверность обоснована. Подтверждением этого служит не только их опубликованность в виде достаточного количества статей в научных изданиях, включая такие высокорейтинговые как Chaos, Solitons & Fractals и Frontiers in Neuroscience, но и их активное цитирование другими исследователями, что свидетельствует об активном интересе ним со стороны международного научного сообщества.

Апробация работы прошла на значительном количестве научных конференций и симпозиумов.

Автореферат содержит всю необходимую информацию и адекватно отражает содержание диссертации.

Все выдвигаемые положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, научно обоснованы.

Таким образом, можно заключить, что диссертационная работа Герасимовой Светланы Александровны содержит всею необходимую совокупность оригинальных научных результатов, обобщений и выводов, удовлетворяет всем требованиям пп. 9 – 11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в редакции от 01.10.2018, с изменениями от 26.05.2020), предъявляемых к кандидатским диссертациям, а её автор, Герасимова Светлана Александровна, заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук (05.13.18 –
Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ), доцент,
профессор кафедры физики и нанотехнологий,
заведующий отделом теоретической физики
Научно-исследовательского центра физики
конденсированного состояния
Курского государственного университета

Постников Евгений Борисович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Курский государственный университет» (ФГБОУ ВО «Курский государственный университет»). Почтовый адрес: ул. Радищева, 33, Курск, 305000
Телефон: +7 (4712) 51-04-69; электронная почта: postnicov@gmail.com

Согласен на обработку персональных данных

