

На правах рукописи



Герасимова Светлана Александровна

**ГЕНЕРАЦИЯ И СИНХРОНИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ
В НЕЙРОМОРФНЫХ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент Казанцев Виктор Борисович, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, Караваев Анатолий Сергеевич
Старший научный сотрудник
Саратовский филиал
Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва

доктор физико-математических наук, доцент Постников Евгений Борисович, Курский государственный университет

Ведущая организация: Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва

Защита состоится 24 марта 2021 года в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 в Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте диссертационного совета по адресу: <https://diss.unn.ru/1087>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук



А.В. Клюев

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы диссертации

Построение моделей и устройств генерации, передачи и синхронизации сигналов, имитирующих процессы в нейронных сетях мозга, иными словами разработка мозгоподобных (нейроморфных) систем, представляет собой одно из актуальных направлений применения радиофизических методов в нейронауке. Такие модели интересны как с фундаментальной точки зрения для изучения нелинейной динамики сложных систем, так и с прикладной – для разработки устройств мониторинга активности мозга, а также приборов, осуществляющих стимулирующее воздействие на нейронные клетки. Стоит отметить и перспективные медицинские приложения мозгоподобных систем, такие как реализация искусственных нейрочипов-имплантов, позволяющих осуществлять воздействие на электровозбудимые клетки (нервные клетки — нейроны, мышечные клетки сердца — кардиомиоциты), управлять их активностью, а также замещать поврежденную нервную ткань. Другим актуальным направлением является исследование нейроморфных и нейрогибридных (состоящих из живых и искусственных нейронов) устройств применительно к решению актуальных задач в сфере информационно-телекоммуникационных технологий — созданию интеллектуальных систем автоматического управления и синхронизации, систем распознавания, кодирования и декодирования информации. Своевременность решения данных задач обусловлена, с одной стороны, успехами современной нейронауки, позволяющей получать данные о процессах, происходящих на уровне молекулярно-клеточной организации систем мозга, и, с другой стороны, развитием радиотехники, физики микро- и наноструктур, твердотельной наноэлектроники.

Предметом исследования в данной диссертационной работе являются эффекты взаимодействия нейроноподобных генераторов, связанных через оптический канал связи и через мемристивное устройство, в рамках радиофизического подхода, а также верификация полученных результатов путем построения нейрогибридной системы, состоящей из нейроноподобного генератора, канала связи и живых нейронов мозга крысы.

Для моделирования динамики отдельного нейрона, как правило, используют радиотехнические генераторы с кубической нелинейностью типа Фитцхью-Нагумо [1]. Работы в этом направлении в настоящее время активно ведутся в ИРЭ РАН Москва (группа А.С. Дмитриева [2]) в ИПФ РАН Нижний Новгород (группа В.И. Некоркина [3-4]), в СГУ им. Чернышевского Саратов (группа Б.П. Безручко), а также в ведущих зарубежных научных центрах. Такие генераторы связывают при помощи разностной или односторонней электрической связи. Известно, что взаимодействие между нейронами мозга осуществляется посредством, так называемых, синаптических контактов [5]. С точки зрения радиофизики, такие контакты обеспечи-

вают однонаправленную передачу сигналов от передающего нейрона (пре-синаптического) к принимающему (постсинаптическому). Отметим, что взаимодействующие нейроны могут находиться на достаточно большом расстоянии друг от друга. Канал связи обеспечивается распространением нервного импульса по аксону передающей клетки, длина которого может достигать сотен сантиметров [6]. Одним из эффектов синаптической связи являются вынужденные колебания и вынужденная синхронизация принимающего нейрона с передающим. Вынужденная синхронизация наблюдалась в моделях различных физических явлений и может быть описана в терминах теории динамических систем [7-9]. В настоящее время используются различные способы аппаратной реализации синаптических связей, например оптический интерфейс между электронными нейронными моделями [10,11] или использование систем с фазовой автоподстройкой частоты [12,13]. Стоит отметить, что эффекты синхронизации связаны с несколькими актуальными проблемами нейронауки. Принято считать, что синхронизация является одним из наиболее значимых механизмов обработки информации нейронами в различных областях мозга, а также коммуникации между этими областями. Синхронная генерация спайков (нервных импульсов) многими нейронами лежит в основе таких когнитивных функций как память, внимание, обучение, восприятие.

Развитие радиофизического подхода применительно к задачам нейродинамики находит свое выражение в работах последних лет ведущих отечественных и зарубежных ученых (Рабинович М.И., Трубецков Д.И., Некоркин В.И., Безручко Б.П., Анищенко В.С., Шалфеев В.Д., Белых В.Н., Дмитриев А.С., Кащенко С.А., Матросов В.В., Осипов Г.В., Казанович Я.Б., Ementrount B., Bilbault J.M., Izhikevich E.M., Pisarchik A.N. и других).

Большое внимание в современных работах уделяется таким аспектам функционирования нейронных сетей, как динамическая (пластичная) организация межнейронных взаимодействий. Недавние достижения в области нанотехнологий позволили разработать более биолого-правдоподобные искусственные синапсы, создав мемристивные наноструктуры, которые имитируют синаптическую динамику. Мемристоры или «резисторы памяти» впервые были предложены Леоном Чуа в 1971 году, как четвертый элемент наравне с прочими пассивными элементами, который работает как резистор и в то же время имеет «память». Впервые экспериментально мемристивный эффект был продемонстрирован исследователями лаборатории Hewlett-Packard (HP). Вольт-амперные характеристики (I-V) этого устройства имеют гистерезис, указывая на резистивную память, а область легирования играет важную роль переменной состояния, которая определяет состояние переключения, то есть состояние с высоким сопротивлением (HRS) и состояние с низким сопротивлением (LRS). Таким образом, способность мемристивной структуры менять проводимость под воздействием импульсных сигналов делает ее почти идеальным электронным аналогом

синапсов. Более сложный подход к моделированию нейроноподобных систем, основанных на мемристивных устройствах, заключается в использовании таких устройств для реализации правил обучения на основе синаптической пластичности (возможности адаптивного изменения силы связи между нейронами в зависимости от активности).

Отметим, что мемристивные устройства и системы на их основе в последнее время активно исследуются математическим сообществом как мультистабильные системы, обладающие большим потенциалом для расширения фундаментальных основ теории нелинейной динамики, однако подобные модели, не подкрепленные экспериментом, лишь качественно отражают свойства резистивного переключения мемристивных устройств. Стоит отметить несколько теоретических работ по моделированию новых нейроноподобных генераторов, в которых мемристивное устройство используется в качестве нелинейного элемента, имитируя потенциал-зависимые ионные каналы, а также исследуется взаимодействие полученных генераторов. [14-16]. Актуальность мемристивного подхода к построению нейроморфных систем подтверждается повышенным интересом со стороны зарубежных и российских ученых (Chua L., Strukov D.B., Brivio S., Spagnolo B., Kim S., Querlioz D., Zhong X., Budiman F., Vaidyanathan S., Saveliev S.) и российских ученых (Ерохин В.В., Демин В.А., Михайлов А.Н., Соболев Н.А., Панин Г.Н., Гриценко В.А.).

Другим перспективным приложением развития радиофизического метода в нейронауке является разработка нейрогибридных систем, состоящих из управляющего устройства и живой ткани. Нейрогибридные системы, частным случаем которых являются нейропротезы - искусственные устройства-имплантаты, взаимодействующие с живыми нейронами, для замещения утраченных или не сформированных функций мозга. Нейроинтерфейсы получили наиболее широкое распространение в задачах управления протезами при повреждениях спинного мозга [17], когда в качестве управляющего сигнала используются сигналы от сохранившихся нервных путей. Кроме того, нейроинтерфейсы и нейропротезы оказались востребованными в восстановлении сенсорных систем, таких как зрительная и слуховая, при помощи искусственной сетчатки и кохлеарных имплантатов соответственно. Из литературных источников известно, что нейрогибридные системы могут в конечном итоге восстановить утраченные моторные функции у пациентов с нарушением работы двигательного аппарата, развившейся вследствие инсульта [18]. Однако задача слияния живых клеток и радиотехнических устройств управления в единый нейрочип, в котором бы реализовались механизмы самообучения и самоорганизации, обеспечивающие необходимую гибкость соединения живых нейронов и управляющих устройств находится на стадии разработки.

Среди значимых работ можно выделить труды зарубежных и отечественных исследователей (Altman J., Das G.D., Bartholow R, Chiappalone M.,

Kringelbach M.L., Renaud-Le Masson S., Deadwyler S.A., Nicoletti M.A., Лебедев М.А., Каплан А.Я., Казанцев В.Б., Бурцев М.С., Макаров В.А. и другие).

Несмотря на большое количество работ, посвященных построению радиофизических нейроморфных систем, до конца неизученными остаются вопросы генерации и передачи сигналов с заданными характеристиками, формирования адаптивных режимов синхронизации в нейроморфных сетевых системах, реализации заданных режимов преобразования сигналов. В связи с тем, что коммуникация и обработка информации между нейронами осуществляется с использованием одновременно как частотного, так и фазового кодирования, теоретические аспекты механизмов синхронизации остаются до конца невыясненными. Благодаря свойству пластичности межнейронных взаимодействий - изменению или подстройке силы связи в зависимости от частотных и фазовых характеристик сигнала, проходящего через канал связи, существенно усложняется экспериментальная реализация такой связи.

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное исследование процессов генерации и синхронизации колебаний в нейроморфных автогенераторных сетях, а также прикладных аспектов взаимодействия нейроморфных устройств с живыми клетками мозга. В данной работе целью исследований не являлось изучение структуры, свойств и технологических операций по изготовлению и созданию новых типов мемристоров.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **ключевые задачи**:

- экспериментальное и теоретическое изучение взаимодействия нейроноподобных генераторов Фитцхью-Нагумо с помощью оптического канала связи;
- экспериментальное и теоретическое изучение, выявление закономерностей воздействия нейроноподобного импульсного сигнала на мемристивное устройство;
- натурное и теоретическое изучение взаимодействия нейроноподобных генераторов Фитцхью-Нагумо через мемристивное устройство, выявление принципов преобразования нейроноподобных сигналов с помощью мемристивного устройства, а также моделирование пластичности синаптического мемристивного контакта по правилу STDP;
- изучение закономерностей генерации, передачи и преобразования сигналов в системе связи нейроноподобных генераторов и живых нейронов мозга крысы для стимуляции нейронной активности, выявление оптимальных параметров полученного нейроинтерфейса.

Научная новизна диссертационной работы заключается в использовании *оптоэлектронного канала связи* между нейроноподобными генера-

торами, включении в канал связи между передающим и приемным генераторами мемристивного устройства, обеспечивающего реализацию адаптивной (зависящее от сигнала) связи между генераторами, построении на основе радиофизического подхода новой *оптоэлектронной системы стимуляции живых нейронов мозга*.

Из полученных **научных результатов** можно выделить следующие:

1. При изучении однонаправленного оптоволоконного канала связи между нейроноподобными генераторами Фитцхью-Нагумо были получены режимы синхронизации с соотношением частот $1 : 1, 3 : 1, N : 1$, где N – количество импульсов пресинаптического электронного нейрона к каждому импульсу постсинаптического нейрона.
2. В результате включения в канал связи между импульсными генераторами мемристивного устройства продемонстрирована возможность реализации синаптической пластичности по правилу STDP, которое основано на перекрытии сигналов от пре- и постсинаптического нейронов.
3. Разработана нейрогибридная система, состоящая из нейроподобного генератора Фитцхью-Нагумо, оптоволоконного канала и фотоэлектрического преобразователя, предназначенная для создания интерфейса и взаимодействия с живыми нейронами мозга. Показано, что разработанная нейрогибридная система способна осуществлять электрическую стимуляцию живых нейронов мозга мыши/крысы.

Научная обоснованность и достоверность результатов, полученных в диссертации подтверждается согласованностью теоретических моделей и экспериментальных данных симуляции межнейронных процессов. Проведена верификация полученных теоретических и радиофизических моделей путем разработки на основе полученных результатов нейрогибридной системы для стимуляции живых нейронов мозга. Достоверность изложенных в диссертационной работе результатов подтверждается сопоставлением с результатами исследований отечественных и зарубежных авторов в данной области, а также научной экспертизой на конференциях и при публикации материалов в рецензируемой научной печати.

Теоретическая и практическая значимость работы

Проведенные исследования открывают широкие возможности не только имитационного моделирования динамики синаптически связанных нейронов, но и перспективы построения оптоэлектронных, мемристивных интерфейсов с живыми нейронами мозга. Одним из перспективных вариантов использования моделей является, например, введение оптоволокна непосредственно в мозг экспериментальным животным, а использование мемристивного устройства, как компонента нейроморфного интерфейса, позволит обеспечить адаптивность связи, положит начало разработке гибких биолого-правдоподобных нейропротезов.

В данной работе, в качестве принимающего генератора, впервые выступали живые нейроны, активируемые электрическим сигналом с фотодиода. Такая схема воздействия на мозг в отличие от традиционных оптогенетических воздействий с использованием фоточувствительных белков не требует генетических манипуляций с животными и позволила осуществить прямой оптоэлектрический интерфейс между нейроноподобными генераторами и живыми нервными клетками. Проведенные исследования обеспечат развитие нового направления в нейроинженерии, так как задача слияния живых клеток, наноструктур, оптических элементов в единый нейрочип, в котором бы реализовались механизмы самообучения и самоорганизации, обеспечивающие необходимую гибкость соединения живых нейронов и управляющих устройств, находится на стадии разработки.

С другой стороны, можно утверждать о важном вкладе в развитие нелинейных динамических систем на основе мемристивных элементов. В ходе работы были выявлены и подтверждены мультистабильные свойства мемристивных устройств, что может положить начало построению больших нелинейных систем нейронных осцилляторов с мемристивными связями и исследованию сложных нелинейных эффектов, в том числе химерных состояний.

С точки зрения методологии, разработанные методы исследования, модели и макеты могут быть применены в студенческой практике в качестве лабораторных и специальных курсов, а также в аспирантских научных работах по нелинейной динамике.

Положения, выносимые на защиту

1) Нейроноподобные генераторы, выполненные в виде радиотехнических схем, связанные посредством оптоэлектронной связи, способны продемонстрировать синхронизацию N:1.

2) Включение мемристивного устройства в канал связи между двумя взаимодействующими нейроноподобными генераторами позволяет адаптивно управлять режимами синхронизации между генераторами подобно синаптической связи между биологическими нейронами.

3) Реализованная нейрогибридная оптоэлектрическая система, состоящая из нейроноподобного генератора Фитцхью-Нагумо, оптоэлектрического интерфейса и живых нейронов мозга крысы позволила осуществить стимуляцию живых клеток мозга и обнаружить эффект синхронизации между сигналами искусственного и живого нейрона, найдены оптимальные параметры для эффективной работы полученной системы.

Публикации и апробация результатов

Результаты работы опубликованы в журналах: Радиотехника и электроника (2015), Physica status solidi (c) (2016), Журнал технической физики (2017), PloS one (2018), Journal of Physics: Conference Series (2019), Frontiers in Neuroscience (2020), Chaos, Solitons and Fractals (2020). По теме диссертации

ции опубликовано 41 научная работа, включая 7 статей в международных журналах и журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК, 2 статьи в научных сборниках, 1 свидетельство на программу для ЭВМ, 30 статей в трудах конференций, 1 учебно-методическое пособие.

Основные результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях, включая: XVII – XVIII, XXIV научные конференции по радиофизике (Н. Новгород, 2012-2014, 2020), 18-я Нижегородская сессия молодых ученых (естественные, математические науки), (Н. Новгород, 2013), XVIII, IX, XI Всероссийские конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», (Саратов, 2013, 2014, 2016), Форум молодых ученых Нижегородского государственного университета, (Н. Новгород, 2013), "Наука будущего", (Санкт-Петербург, 2014), European Nonlinear Dynamics Conference (ENOC) 2014, 2017 (Vienna, Austria; Budapest, Hungary, 2014, 2017), Volga neuroscience meeting (Санкт-Петербург - Н. Новгород 2016, Н. Новгород – Самара - Н. Новгород, 2018), X Всероссийский с международным участием Конгресс молодых ученых-биологов “Симбиоз - Россия 2017” (Казань, 2017), VIII Поляховские чтения (Санкт-Петербург, 2018), XII, XIII Международная летняя школа «Компьютерные технологии анализа инженерных проблем механики» (Москва, 2018, 2019), XIV Международной конференции «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (Конференция Пятницкого) (Москва, 2018), Dynamics Days Europe 2018, (UK, Loughborough, 2018), International workshop From ReRAM and Memristors to new Computing Paradigms (Crete, Greece, 2018), VIII Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (Минск, Беларусь, 2018), бая международная школа-конференция "Saint-Petersburg OPEN 2019" по Оптоэлектронике, Фотонике, Нано- и Нанобиотехнологиям (Санкт-Петербург, 2019), 72-ую Всероссийскую с международным участием школу-конференцию молодых ученых «Биосистемы: организация, поведение, управление», (Н.Новгород, 2019), 1-ю Пущинскую конференцию молодых ученых «Методы естественно-научных дисциплин». (Пушино, 2019), International Conference on Memristive Materials, Devices & Systems (MEMRISYS) (Dresden, Germany, 2019), International Conference “New Trends in Nonequilibrium Stochastic Multistable Systems and Memristors (NES2019)” (Erice, Italy, 2019).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11–04– 12144), ФЦП (проекты № 14.740.11.0075, 16.512.11.2136, 11.519.11.1003), программы МКБ РАН, гранта Президента РФ для молодых ученых (MD – 5096.2011.2), Минобрнауки России в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы" (Соглашение №14.578.21.0074, уникальный идентификатор соглашения

RFMEFI57814X0074), Минобрнауки России (№ 11.G34.31.0012), РФФ (№ 16-19-00144), РФФИ (18-29-23001).

Личный вклад автора

Все полученные результаты диссертационной работы получены лично автором. В совместных публикациях автору принадлежат все исследования генерации и преобразования сигналов нейроноподобных генераторов и вычислительным расчетом модельных уравнений.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит 114 страниц, включая 40 рисунков, 140 наименований цитируемой литературы, 41 научную публикацию по теме диссертации (из них 7 статей в реферируемых изданиях).

Краткое содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность изучаемой проблемы, приводится краткий обзор научной литературы по теории генерации, распространению и синхронизации сигналов в мозге, по построению нейроморфных систем на основе мемристивных устройств, по сопряжению управляющих устройств и биообъектов, также формулируется цель и определяется круг решаемых задач, описывается научная новизна и научно-практическая значимость диссертационных исследований.

Первая глава посвящена исследованию радиофизической модели синаптически связанных нейроноподобных генераторов, взаимодействующих через оптоволоконный канал связи, которая имитирует синаптическую передачу импульсных сигналов между нейронами мозга. Воздействие на принимающий генератор осуществлено при помощи фотодиода, управляемого сигналом из оптоволокна. Установлено, что оптоволоконный канал связи может обеспечить вынужденную синхронизацию. Экспериментально получены режимы синхронизации с различным соотношением частот.

Каждый нейроноподобный генератор был реализован в виде генератора импульсных сигналов на основе модельного нейрона Фитцхью-Нагумо. Индуктивность была реализована схемой на операционном усилителе, а кубическая нелинейность была получена набором диодов. Емкость мембраны нейрона была имитирована с помощью конденсатора, «равновесный потенциал» в электрической схеме управляется источником питания. В электрической схеме аналогового генератора Фитцхью-Нагумо напряжение от источника питания 1.5 В варьируется при помощи последовательного включения переменного резистора (от 0 до 150 кОм). С точки выхода генератора сигнал приходит на регистрирующее устройство (цифровой осциллограф), на котором экспериментальные данные записываются в формате csv, bmp. Обработка полученных данных была осуществлена в программе Origin 8.1.

Взаимодействие между нейроноподобными генераторами реализовано следующим образом. Выходной сигнал с управляющего генератора посту-

пает на светодиод, затем проходит по оптоволоконному каналу, далее поступает на фотодетектор управляемого генератора, обеспечивая одностороннюю связь. После тестирования и настройки модели, каждый из генераторов был переведен в автоколебательный режим (рисунок 1а). В предлагаемой схеме связи сигнал поступал на светодиод через резистор сопротивлением 100 Ом. Управление коэффициентом передачи, и соответственно силой связи нейроноподобных генераторов, было осуществлено за счет варьирования нагрузочного сопротивления резистора фотодиода от 1 кОм до 1 МОм. При варьировании нагрузочного сопротивления от 1 кОм до 1 МОм были получены режимы синхронизации с соотношением частот $1 : 1$, $3 : 1$, $N : 1$, где N – количество импульсов ведущего электронного нейрона к каждому импульсу ведомого электронного нейрона. При нагрузочном сопротивлении от 1 кОм до 500 кОм колебания передающего и принимающего генераторов были асинхронными. При увеличении нагрузочного сопротивления (интервал 500...800 кОм) наблюдаем режим синхронизации сигналов с соотношением частот $1 : 1$ (рисунок 2б). На рис. 2 штрихпунктирной кривой изображен сигнал управляемого генератора, сплошной кривой – сигнал управляющего генератора, амплитуда сигналов 0.6 В, частота 17 - 18 Гц. При дальнейшем повышении нагрузочного сопротивления (интервал 800 - 900 кОм) был обнаружен режим синхронизации сигналов с соотношением частот $3 : 1$ (рис. 2): амплитуда сигналов 0.6 В, частота 7 - 9 Гц. При максимальном повышении сопротивления нагрузки фотодиода (интервал 900 кОм - 1 МОм) - возникновение режима подпороговых колебаний (рисунок 1): амплитуда сигналов 0.6 В, частота 4 Гц.

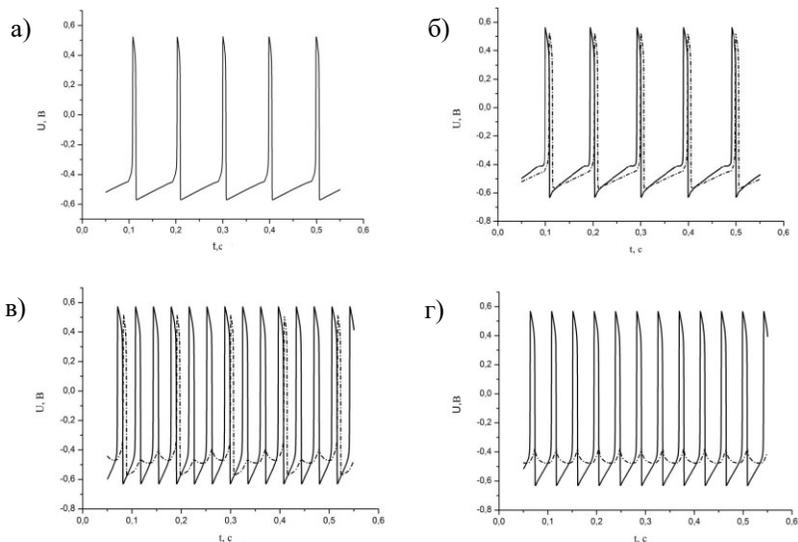


Рисунок 1 – Режимы работы системы оптически связанных нейроподобных генераторов Фитцхью-Нагумо. Автоколебательный режим работы генератора Фитцхью-Нагумо (а); режим синхронизации управляющего генератора с управляемым 1:1 (б); режим синхронизации управляющего генератора с управляемым 3:1 (в); режим подпороговых колебаний (г)

Во **второй главе** исследуется радиофизическая модель передачи сигналов в системе генераторов Фитцхью-Нагумо с мемристивным устройством, включенным в канал связи. Экспериментально показано, что изменение сопротивления мемристивных устройств под действием нейроподобных сигналов обеспечивает адаптивную связь и синхронизацию генераторов. На основе полученных данных было проведено теоретическое моделирование правила синаптической пластичности (STDP), которое реализовано с помощью перекрытия сигналов от ведущего и ведомого генераторов.

Типичные вольтамперные характеристики используемых в работе мемристивных структур демонстрируют воспроизводимое переключение между состоянием с низким сопротивлением (low-resistance state — LRS) и состоянием с высоким сопротивлением (highresistance state — HRS. Важно отметить, что степень резистивного переключения (изменения величины сопротивления структур) зависит от параметров электрического воздействия и определяет *адаптивное* (синаптическое) поведение мемристивных наноструктур [13].

После настройки и отладки управляющего и управляемого нейроподобных генераторов Фитцхью-Нагумо был проведен эксперимент по исследованию взаимодействия генераторов через мемристивное устройство,

включенное в канал связи между генераторами (блок-схема экспериментов изображена на рисунке 2).

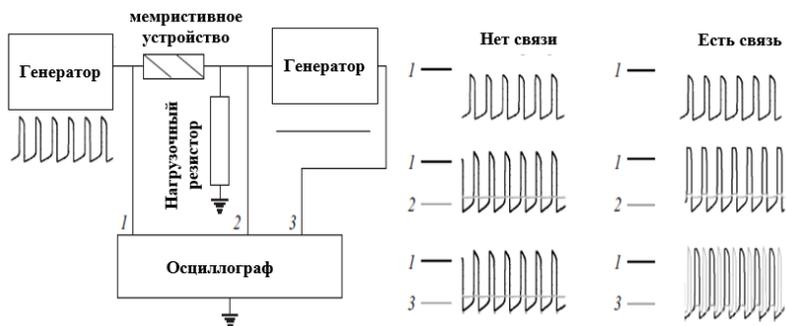


Рисунок 2 – Блок-схема экспериментального исследования взаимодействия нейроноподобных генераторов

В начальный момент времени управляющий генератор находился в автоколебательном режиме, управляемый генератор — в возбуждимом режиме, в качестве синапса использовалось мемристивное устройство. Сигнал с управляющего генератора поступал на вход мемристивного устройства, с выхода мемристивного устройства приходил на вход управляемого генератора через нагрузочное сопротивление. При увеличении амплитуды сигнала управляющего генератора регистрировалось воздействие на мемристивное устройство. При его переключении из высокоомного состояния в более низкоомное состояние происходило установление связи между двумя нейроноподобными генераторами. Управляемый генератор переходил в колебательный режим, при этом сигналы генераторов синхронизовались. При дальнейшем увеличении амплитуды управляющего нейроноподобного генератора были зафиксированы режимы синхронизации 1 : 1, 2 : 1. Параметром, характеризующим силу связи, являлось сопротивление мемристивной структуры, причем для наблюдения различных режимов синхронизации необходимо, чтобы сопротивление мемристивной структуры менялось плавно в большом диапазоне амплитуд управляющего генератора. Таким образом, было установлено, что различные режимы синхронизации нейроноподобных генераторов наблюдаются при амплитуде сигнала управляющего генератора в диапазоне 2–3В и сопротивлении мемристивной структуры в диапазоне 5–7 кОм (рисунок 3).

Модель мемристового устройства была разработана на основе стандартного подхода к описанию динамической реакции мемристора на электрическое воздействие и физических закономерностей, наблюдаемых в экспериментах.

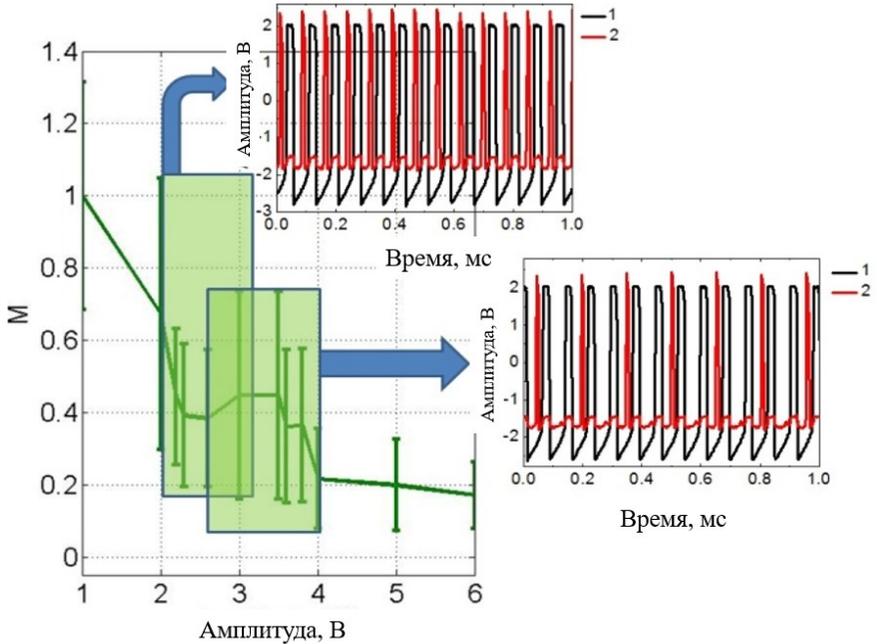


Рисунок 3 - Результаты экспериментов по взаимодействию нейроноподобных генераторов с помощью мемристового устройства.

Модель описывается следующими уравнениями:

$$j = w j_{lin} + (1 - w) j_{nonlin}$$

$$j_{lin} = u / \rho$$

$$j_{nonlin} = u \exp(b\sqrt{u} - E_b)$$

$$w(t, u) = A \exp\left(-\frac{E_m - \alpha_1 u}{kT}\right)$$

Данный подход предусматривает введение так называемого параметра внутреннего состояния системы w , который определяется долей площади структуры, занятой проводящими филаментами, и ее изменением за счет миграции кислородных вакансий (эффективный барьер для миграции E_m), активированной джоулевым разогревом (kT) и электрическим полем /

напряжением (u). Полный электронный ток через мемристивную структуру складывается из линейной составляющей (j_{lin}), которая соответствует омической проводимости через филаменты, и нелинейной (j_{nonlin}), которая определяется транспортом через дефектные состояния в оксидном материале в области разрыва филаментов или в остальной части структуры. Нелинейный транспорт носителей заряда (эффективный барьер для миграции E_b) описывается законом Френкеля-Пула, исходя из аппроксимации вольт-амперной характеристики в высокоомном состоянии [30]. Плавный переход между высокоомным и низкоомным состояниями определяется динамическим вкладом в полный ток проводящих филаментов, а значит – параметром состояния. Для сопоставления экспериментальных данных мемристивных устройств с результатами моделирования в математической модели мемристора учтена стохастичность микроскопических явлений, приводящих к изменению внутреннего состояния w динамической системы.

В данной работе были изучены зависимость эффективности синаптической связи (усиление связи — потенциация, спад — депрессия) от отношения времен прихода импульса на синапс (механизм spike timing dependent plasticity — STDP). Широко распространено мнение, что данный механизм лежит в основе обучения и хранения информации в мозге, а также в основе развития и роста нейронных сетей.

В качестве имитации пластичного синаптического контакта была использована стохастическая модель мемристивного устройства. Была использована форма нейроноподобных импульсов, полученных при решении системы Фитцхью-Нагумо [2], для моделирования пре- и постсинаптического спайка (нервного импульса). Амплитуда спайков была выбрана таким образом, чтобы каждый из импульсов по отдельности не способствовал переключению состояния мемристора, но при этом вероятность переключения мемристора при воздействии на него результирующим сигналом была бы достаточно велика. Постсинаптический спайк поступал на мемристивное устройство после пресинаптического с задержкой Δt . Форма импульсов и наглядное представление задержек по времени Δt показано на рисунке 4.

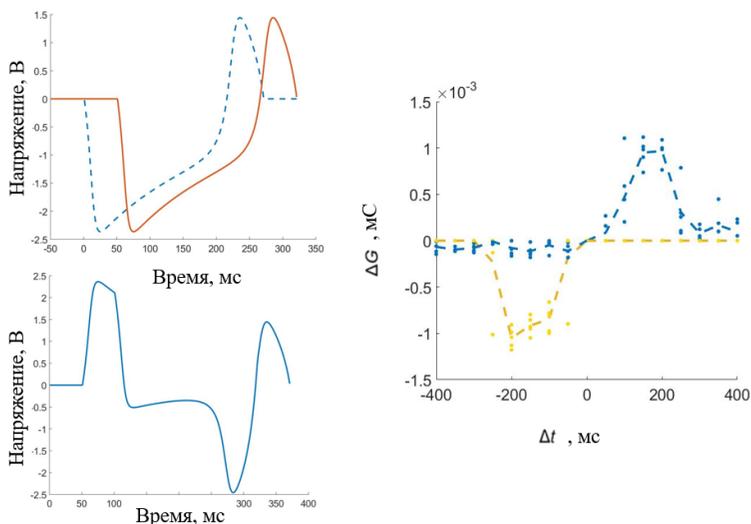


Рисунок 4 - Примеры спайкоподобных сигналов Фитцхью-Нагумо, результирующего падения напряжения на мемристивном устройстве и изменение проводимости в зависимости от временной задержки между сигналами ведущего и ведомого генераторов.

В главе 3 проведена верификация полученных численных и экспериментальных результатов путем построения на их основе нейрогибридной модели, состоящей из радиотехнического нейроподобного генератора Фитцхью-Нагумо, светодиода, оптоволоконного канала, фотодиода и усилителя, а также из нейронов мозга крысы.

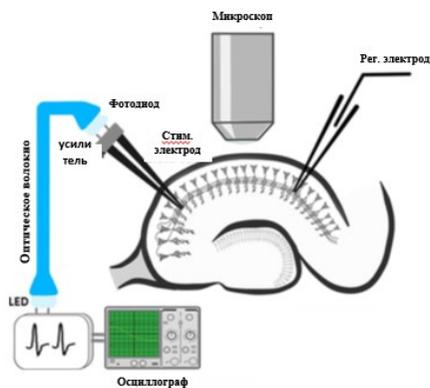


Рисунок 5 – Схема эксперимента по сопряжению биообъекта и электронного управляющего устройства

После тестирования и настройки каждой из компонент нейрогибридной системы были проведены эксперименты по сопряжению биообъекта и электронного управляющего устройства. Сигнал с выхода нейроноподобного генератора поступал на оптоволоконный интерфейс (светодиод, оптоволокно, фотодиод), с помощью транзисторов и потенциометра усиливался до необходимой амплитуды. Амплитуда выходного сигнала генератора Фитцхью-Нагумо варьировалась в диапазоне от 0.6В до 5В. Излучение светодиода вводилось в многомодовое оптическое волокно, на конце которого расположен фотодиод, обеспечивающий оптоэлектрическое преобразование сигнала. Полученный на фотодиоде электрический сигнал усиливался и использовался для внеклеточной электрической стимуляции живых нейронов.

Стимуляция живой клетки осуществлялась сигналом, поступающим с оптоэлектрического преобразователя, представляющим собой импульсы длительностью 10-25 мс, амплитудой от 1В до 6В и частотой от 4-30 Гц, на стимулирующий электрод установки для электрофизиологического исследования клеток. Полученный биологический сигнал – ответ от нервных клеток поступал на регистрирующий электрод и детектировался системой анализа и сбора данных биологической установки. Стоит отметить, что использование оптоволоконного канала обеспечило гальваническую развязку между нейроподобным генератором и биологическим объектом, что исключает возможность поражения нейронов электрическим током в случае электрического пробоя.

Амплитуда стимулов, генерируемых разработанной нейрогибридной системой, позволила осуществить локальную стимуляцию отростков нервных клеток, что в свою очередь, способствовало передаче сигналов от одних нейронов к другим, что позволило наблюдать изменение потенциала, регистрируемого внеклеточным электродом.

Следует отметить, что в регистрируемом сигнале также наблюдаются артефакты от стимула. Эти артефакты легко отличить от нейрональных ответов, потому что биологические потенциалы имеют продолжительность в несколько десятков миллисекунд, что больше, чем продолжительность артефакта. Были получены положительные, отрицательные или биполярные нейрональные ответы в зависимости от положения электродов в гиппокампе мозга крысы. Синхронизация нейронального ответа и стимула показывает, что ответ вызван стимуляцией. На рис. 6 приведены графики зависимости нейронального отклика от амплитуды стимула. Для регистра-

ции нейрональных ответов была подобрана необходимая амплитуда стимулирующего сигнала (от 2В до 3В), подача которой способствовала синаптической передаче сигналов между нейронами.

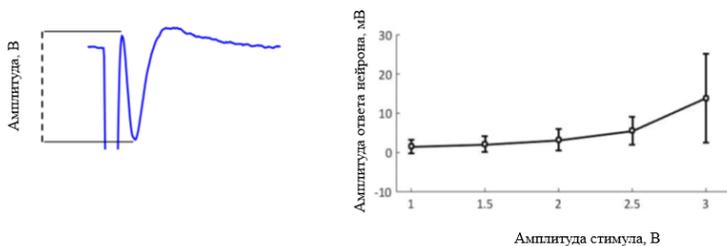


Рисунок 6 – Результаты эксперимента: амплитуда из записей образцов сигнала и зависимость амплитуды биологического сигнала от стимулирующего электрического сигнала.

В заключении приведены краткие выводы, сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Данная диссертационная работа посвящена разработке радиофизических методов исследования эффектов межнейронного взаимодействия. В диссертационной работе представлена экспериментальная система взаимодействующих нейроноподобных генераторов Фитцью-Нагумо, связанных посредством прямого пассивного канала связи с использованием оптоволоконна и, показано, как такой оптический канал связи обеспечивает передачу сигнала, вынужденные колебания и синхронизацию принимающего генератора. Кроме того, реализован мемристивный канал связи таких нейроноподобных генераторов, на основе которого изучена стохастическая природа изменения резистивного состояния мемристивного устройства при воздействии периодических электрических сигналов разной формы. Предложена математическая модель стохастического поведения мемристоров на основе стандартного подхода к описанию динамической реакции мемристора на электрическое воздействие – аналогового изменения сопротивления и физических закономерностей, наблюдаемых в экспериментах. Экспериментально и теоретически показано, что изменение сопротивления мемристивных устройств под действием спайкоподобных сигналов обеспечивает адаптивную связь и синхронизацию нейроноподобных генераторов. В качестве модели адаптивных связей проведено математическое моделирование свойств стохастической пластичности синаптического контакта на основе мемристивного соединения и реализован механизм spike timing dependent

plasticity — STDP. В качестве верификации полученных данных был реализован оптоволоконный интерфейс между искусственным нейроподобным генератором Фитцхью-Нагумо и живыми нейронами мозга. Продемонстрирована возможность стимуляции и синхронизации активности живых нейронов, и найдены эффективные параметры работы предложенной системы.

Кроме того представлены перспективы развития динамического подхода к моделированию нейронных систем и связей, возможности построения на основе фундаментальных принципов нелинейной динамики нейроморфных и нейрогибридных систем. Проведено обсуждение применения результатов, полученных в ходе диссертационного исследования, в области информационных технологий для построения нейрокомпьютеров будущего, а также для развития медицинских приложений, таких как нейропротезирование.

Список использованных источников:

1. Fitzhugh, R. Impulses and physiological states in theoretical model of nerve membrane / R. Fitzhugh // *Biophysical journal*. – 1961. – V. 1.
2. Дмитриев, А.С. Передача цифровой информации между нейроподобными элементами / А.С. Дмитриев, А.И. Рыжов // *Радиотехника и электроника*. – 2010. – Т. 55. – В. 4. С. 459–464.
3. Binczak, S. Experimental study of electrical FitzHugh–Nagumo neurons with modified excitability / S. Binczak, S. Jacquir, J.-M. Bilbault, V.B. Kazantsev, V.I. Nekorkin // *Neural Networks*. – 2006. – V. 19. – P. 684–693.
4. Шапин, Д.С. Динамика двух нейроноподобных элементов с подавляющей обратной связью / Д.С. Шапин // *Радиотехника и электроника*. – 2009. – Т. 54. – В. 2. С. 185–195.
5. Plata, A. Astrocytic atrophy following status epilepticus parallels reduced Ca²⁺ activity and impaired synaptic plasticity in the rat hippocampus / A. Plata, A. Lebedeva, P. Denisov, O. Nosova, T.Y. Postnikova, A. Pimashkin, A. Brazhe, A.V. Zaitsev, D.A. Rusakov, A. Semyanov // *Frontiers in molecular neuroscience*. – 2018. – V.11. – P. 215.
6. Николлс, Дж.Г. От нейрона к мозгу / Дж.Г. Николлс, А.Р.Мартин, Б.Дж. Валлас, П.А.Фукс - М.: Едиториал УРСС, 2003 - 672 с.
7. Seliytskiy, Y.D. On auto-oscillations of a plate in flow / Y.D. Seliytskiy // *AIP Conference Proceedings* 1798. – 2017. – V. 1798. – №. 1. – P. 020139.
8. Matrosov, V.V. Bifurcation mechanisms of regular and chaotic network signaling in brain astrocytes / V.V. Matrosov, V.B. Kazantsev // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Non-linear Science*. – 2011. – V.21. №. 2 – P. 023103.
9. Boccaletti, St. Synchronization: From Coupled Systems to Complex Networks / St. Boccaletti, A.N. Pisarchik, Ch.I.D. Genio, A. Amann - Cambridge University Press, 2018, 255 p.
10. Pisarchik, A.N. Optical fiber synaptic sensor / A.N. Pisarchik, R. Jaimes-Reátegui, R. Sevilla-Escoboza, J.H. García-Lopez, V.B. Kazantsev // *Opt. Lasers Eng.* – 2011. – V. 49. – №.6. – P. 736–742.
11. Pisarchik, A.N. Experimental implementation of a biometric laser synaptic sensor / A.N. Pisarchik, R. Sevilla-Escoboza, R. Jaimes-Reategui, G. Huerta-Cuellar, J.H. Garcia-Lopez, V.B. Kazantsev // *Sensors (Basel)*. – 2013. – V. 13. – №. 12. – P. 17322–17331.

12. Matrosov, V.V. Neuron-like dynamics of a phase-locked loop /V.V. Matrosov, M.A. Mishchenko, V.D. Shalfeev // *Eur. Phys. J. Spec. Top.* - 2013. - V. 222. - №. 10. - P. 2399–2405
13. Burylko, O. Winner-take-all in a phase oscillator system with adaptation /O. Burylko, Y. Kazanovich, R. Borisuyk // *Scientific reports.* – 2018. – Т. 8. – №. 1. – С. 416.
14. Zhang, J., Liao, X. Synchronization and chaos in coupled memristor-based FitzHugh-Nagumo circuits with memristor synapse / J. Zhang, X. Liao // *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ).* – 2017. - V. 75. – P. 82–90.
15. Ignatov, M., Ziegler, M., Hansen, M., Petraru, A., Kohlstedt, H. A memristive spiking neuron with firing rate coding / M. Ignatov, M. Ziegler, M. Hansen, A. Petraru, H.A. Kohlstedt // *Frontiers in neuroscience.* – 2015. - V. 9. - P. 376
16. Korotkov, A.G., Kazakov, A.O., Levanova, T.A. Effects of memristor-based coupling in the ensemble of FitzHugh–Nagumo elements /A.G.Korotkov // *The European Physical Journal Special Topics.* – 2019. – V. 228. - №. 10. – P.2325-2337.
17. van den Brand, R. Neuroprosthetic technologies to augment the impact of neurorehabilitation after spinal cord injury / R. van den Brand, J.B. Mignardot, J. von Zitzewitz, C. Le Goff, N. Fumeaux, F. Wagner, M. Capogrosso, E.M. Moraud, S. Micera, B. Schurch, A. Curt // *Annals of physical and rehabilitation medicine.* – 2015. - V. 58. - №. 4. – P. 232-237.
18. Gulati, T. Robust neuroprosthetic control from the stroke perilesional cortex / T. Gulati, S.J. Won, D.S. Ramanathan, C.C. Wong, A. Bodepudi, R.A. Swanson, K. Ganguly // *Journal of Neuroscience.* – 2015. – V. 35. - №. 22. – P.8653-8661.

Список публикаций автора по теме диссертации

Публикации в изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, а также в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Zhevnenko, D. Simulation of memristor switching time series in response to spike-like signal / D. Zhevnenko, F. Meshchaninov, V. Kozhevnikov, E. Shamin, A. Belov, **S. Gerasimova**, D. Guseinov, A. Mikhaylov, E. Gornev // *Chaos, Solitons & Fractals.* – 2020. – P. 110382.
2. Mikhaylov, A. Neurohybrid Memristive CMOS-Integrated Systems for Biosensors and Neuroprosthetics / A. Mikhaylov, A. Pimashkin, Y. Pigareva, **S. Gerasimova**, S. Lobov, E. Gryaznov, M. Talanov, I. Lavrov, V. Demin, V. Erokhin, V.B. Kazantsev, H. Wu, B. Spagnolo // *Frontiers in Neuroscience.* – 2020. – P. 358.
3. Mikhaylov, A.N. Effect of ion irradiation on resistive switching in metal-oxide memristive nanostructures / A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, D.S. Korolev, **S.A. Gerasimova**, I.N. Antonov, E.V. Okulich, R.A. Shuiskiy, D.I. Tetelbaum // *Journal of Physics: Conference Series.* - 2019. – V. 1410. – I. 1. – P. 012245.
4. Mishchenko, M.A. Optoelectronic system for brain neuronal network stimulation / M.A. Mishchenko, **S.A. Gerasimova**, A.V. Lebedeva, L.S. Lepekhina, A.N. Pisarchik, V.B. Kazantsev // *PLoS one.* – 2018. – V. 13. – I. 6. - P. 1-9.
5. **Герасимова, С.А.** Имитация синаптической связи нейроноподобных генераторов с помощью мемристивного устройства / **С.А. Герасимова**, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, Д.С. Королев, О.Н. Горшков, А.Б. Казанцев // *Журнал технической физики.* – 2017. – Т. 87. – В. 2. – С. – 1248-1254.
6. Mikhaylov, A.N. Field-and irradiation-induced phenomena in memristive nanomaterials / A.N. Mikhaylov, E.G. Gryaznov, A.I. Belov, D.S. Korolev, A.N. Sharapov, D.V. Guseinov, D.I. Tetelbaum, S.V. Tikhov, N.V. Malekhonova, A.I. Bobrov, D.A. Pavlov, **S.A. Gerasimova**, V.B. Kazantsev, N.V. Agudov, A.A. Dubkov, C.M.M. Rosário, N.A. Sobolev, B. Spagnolo // *physica status solidi (c).* – 2016. – V.13. – I. – 10-12. P. 870-881.
7. **Герасимова, С.А.** Синхронизация оптически связанных нейроноподобных генераторов / **С.А. Герасимова**, Г.В. Геликонов, А.Н. Писарчик, В.Б. Казанцев // *Радиотехника и электроника.* – 2015. – Т. 60. - № 7. - С. 1–4.

Публикации в других изданиях:

8. **Gerasimova, S.A.** Design of memristive interface between electronic neurons / **S.A. Gerasimova, A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, D.S. Korolev, D.V. Guseinov, A.V. Lebedeva, O.N. Gorshkov, V.B. Kazantsev** // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1959. – I. 1. – P. 090005.
9. Lebedeva, Albina. Integration technology for replacing damaged brain areas with artificial neuronal networks / Albina Lebedeva, Mikhail Mishchenko, Polina Bardina, Anastasiya Fedulina, Andrey Mironov, Zoia Zhuravleva, **Svetlana Gerasimova**, Alexey Mikhaylov, Alexander Pisarchik, Victor Kazantsev // IEEE2020 4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR) – 2020. – P. 158-161

Программа для ЭВМ:

10. **Герасимова С.А.**, Мищенко М.А., Гордлеева С.Ю., Матросов В.В., Казанцев В.Б. Компьютерная модель системы синхронизации, передачи и обработки информации на основе оптоволоконных нейроноподобных генераторов. Свидетельство № 2013615061 от 27.05.2013.

Научные работы, опубликованные в трудах конференций и симпозиумов:

11. Кипелкин И.М. Разработка нейроноподобного генератора на основе мемристивных устройств / И.М. Кипелкин, В.В. Сдобняков, **С.А. Герасимова**, В.Б. Казанцев // Тезисы XXIV научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород. - 2020. - С. 426.
12. Mikhaylov, A.N. From device engineering and adaptive programming to stochastic multistable models of metal-oxide memristors / A.N. Mikhaylov, D.S. Korolev, A.I. Belov, **S.A. Gerasimova**, D.V. Guseinov, S.V. Tikhov, D.I. Tetelbaum, O.N. Gorshkov, M.N. Koryazhkina, N.V. Agudov, A.A. Dubkov, A.V. Emelyanov, K.E. Nikiryu, V.A. Demin, B. Spanyolo // Proceedings of International Conference on Memristive Materials, Devices & Systems (MEMRISYS), Dresden, Germany, 8-11 July. - 2019. - P. 98.
13. Guseinov, D.V. Atomistic and dynamical stochastic models of metal-oxide memristive devices / D.V. Guseinov, D.S. Korolev, A.I. Belov, E.V. Okulich, V.I. Okulich, **S.A. Gerasimova**, D.I. Tetelbaum, A.N. Mikhaylov, V.B. Kazantsev // Book of abstracts of International Conference “New Trends in Nonequilibrium Stochastic Multistable Systems and Memristors (NES2019)”, Erice, Italy, 18-21 October. - 2019. - P. 23.
14. Бардина, П.С. Замещение биоэлектрической активности в поврежденном гиппокампе крыс посредством искусственных нейронных сетей / П.С. Бардина, З.Д. Журавлева, А.А. Федулina, **С.А. Герасимова**, М.А. Мищенко, А.В. Лебедева // Тезисы докладов 72-й Всероссийской с международным участием школы-конференции молодых ученых «Биосистемы: организация, поведение, управление», Н.Новгород, 23–26 апреля – 2019. – С.39.
15. Mikhailov, A.N. Towards implementation of collective dynamics of stochastic memristor-coupled artificial neurons / A.N. Mikhailov, D.S. Korolev, A.I. Belov, M.A. Mishchenko, A.V. Lebedeva, **S.A. Gerasimova**, V.B. Kazantsev // Book of abstracts of International Conference New Trends in Nonequilibrium Stochastic Multistable Systems and Memristors. Erice, Italy: University of Palermo. - 2019. - P. 30.
16. Иконников, А.В. Методика оценки последствий имплантации электродов в гиппокамп крысы в рамках разработки нейрогибридной технологии замещения поврежденных участков мозга / А.В. Иконников, П.С. Бардина, А.А. Федулina, З.Д. Журавлева, А.А. Миронов, **С.А. Герасимова**, М.А. Мищенко, А.В. Лебедева // Сборник статей 1-й Пущинской конференции молодых ученых «Методы естественно-научных дисциплин», Пущино. - 2019. – С. 62-64.
17. **Герасимова, С.А.** Моделирование активности нейрона с помощью мемристивного устройства: математическое исследование и лабораторные эксперименты / **С.А. Герасимова**, А.Н. Михайлов, Д.В. Гусейнов, А.И. Белов, Д.С. Королев, О.Н. Горшков, В.Б. Казанцев // Тезисы докладов XIII Международной летней школы «Компьютерные технологии анализа инженерных проблем механики», Москва. -2019.

18. Mikhaylov, A.N. Effect of ion irradiation on the resistive switching in metal-oxide memristive nanostructures / A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, D.S. Korolev, **S.A. Gerasimova**, I.N. Antonov, E.V. Okulich, R.A. Shuiskiy, D.I. Tetelbaum // Proceedings of 6th International School and Conference "Saint-Petersburg OPEN 2019" on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, S. Petersburg. – 2019.
19. Королев Д.С. Мемристивные структуры на основе оксидных диэлектриков для применения в нейроморфных системах нового поколения / Д.С. Королев, А.И. Белов, И.Н. Антонов, **С.А. Герасимова**, Я.И. Пигарева, А.С. Пимашкин, О.Н. Горшков, Д.И. Тетельбаум, А.Н. Михайлов // Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела», Минск, Беларусь. - 2018. - С. 249-250.
20. Korolev, D.S. Dynamic response of metal-oxide memristive devices to complex electric signals / D.S. Korolev, A.I. Belov, I.N. Antonov, **S.A. Gerasimova**, Ya.I. Pigareva, A.S. Pimashkin, O.N. Gorshkov, D.I. Tetelbaum, A.N. Mikhaylov // International workshop From ReRAM and Memristors to new Computing Paradigms, Crete, Greece. - 2018. - P. 15.
21. **Gerasimova, S.** Dynamics of electronic neurons coupled via memristive device / **S. Gerasimova**, A. Mikhaylov, A. Belov, D. Korolev, D. Guseinov, O. Gorshkov, V. Kazantsev // Dynamic Days Europe, Loughborough, UK. - 2018. – P. 12.
22. **Герасимова, С.А.**, Динамика системы связанных моделей нейронов через мемристивное устройство / **С.А. Герасимова**, А.Н. Михайлов, Д.В. Гусейнов, А.И. Белов, Д.С. Королев, О.Н. Горшков, В.Б. Казанцев // XIV Международной конференции «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (Конференция Пятницкого), Москва. – 2018.
23. **Герасимова С. А.**, Михайлов А. Н., Гусейнов Д. В., Белов А. И., Королев Д. С., Горшков О. Н., Казанцев В. Б. Динамические аспекты моделирования нейронной активности с помощью мемристивного устройства: математическое исследование и лабораторные эксперименты / **С.А. Герасимова**, А.Н. Михайлов, Д.В. Гусейнов, А.И. Белов, Д.С. Королев, О.Н. Горшков, В.Б. Казанцев // Тезисы докладов XIII Международной летней школы «Компьютерные технологии анализа инженерных проблем механики», Москва. – 2018.
24. **Gerasimova, S.A.** Design of memristive interface between electronic neurons / **S.A. Gerasimova**, A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, D.S. Korolev, O.N. Gorshkov, V.B. Kazantsev // Book of abstract of International scientific conference on mechanics "The Eighth Polyakhov's reading, Moscow. – 2018.
25. **Gerasimova, S.A.** Neuromorphic optoelectronic interface for hippocampal neurons stimulation / **S.A. Gerasimova**, M.A. Mishchenko, A.V. Lebedeva, A.N. Pisarchik, V.B. Kazantsev // VNM2018 Abstract book, NN-Samara-NN. - 2018. - P.90.
26. **Gerasimova, S.A.** Adaptive behavior of memristive device dstimulated by neuron-like signal / **S.A. Gerasimova**, A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, D.S. Korolev, I.N. Antonov, D.V. Guseinov, Ya.I. Pigareva, A.S. Pimashkin, O.N. Gorshkov, V.B. Kazantsev // VNM2018 Abstract book, NN-Samara-NN. - 2018. - P.89.
27. **Gerasimova, S.** Imitation of synaptic coupling of electronic neurons by memristive device / **S. Gerasimova**, A. Mikhaylov, A. Belov, D. Korolev, V. Kazantsev // ENOC2017 Abstract book, Budapest, Hungary. - 2017. – P. 215.
28. **Герасимова, С.А.** Взаимодействие нейроноподобного генератора и живых возбудимых клеток посредством оптоэлектронного интерфейса / **С.А. Герасимова** // Тезисы X Всероссийский с международным участием Конгрессе молодых ученых-биологов «Симбиоз - Россия 2017», Казань. – 2017.
29. **Gerasimova S.A.** Synchronization of two coupled electronic neurons via memristor / **S.A. Gerasimova**, A.N. Mikhaylov, D.S. Korolev, A.I. Belov, I.N. Antonov, O.N. Gorshkov, V.B. Kazantsev // VNM2016 Abstract book, NN- Saint Petersburg. - 2016. - P. 77.
30. Mishchenko, M.A. Design of optoelectronic interface between neuron-like generator and living neuron / M.A. Mishchenko, **S.A. Gerasimova**, A.V. Lebedeva, V.B. Kazantsev // VNM2016 Abstract book, NN- Saint Petersburg. - 2016. - P. 109.
31. **Герасимова, С.А.** Соединение нейроноподобного генератора и биологического нейрона посредством оптоволокну / **С.А. Герасимова**, М.А. Мищенко, А.В. Лебедева, В.Б. Казанцев // Тезисы XVIII Всероссийской конференции молодых ученых «Нанозлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», Саратов. - 2016. – С. 31.
32. **Gerasimova, S.** Synchronization of two optically coupled electronic neurons / **S. Gerasimova**, A.N. Pisarchik, G. Gelikonov, V. Kazantsev // Book of abstract of European Nonlinear Dynamics Conference (ENOC) 2014, Vienna, Austria. - 2014. – P. 584.

33. **Gerasimova, S.** Design of optically coupled electronic neurons / **S. Gerasimova**, A.N. Pisarchik, G. Gelikonov, V. Kazantsev // Book of abstract of international conference "Science of the future", Saint Petersburg. - 2014.
34. **Герасимова, С.А.** Режимы синхронизации нейроноподобных генераторов / **С.А. Герасимова**, Писарчик А.Н., Геликонов Г.В., Казанцев В.Б. // Тезисы IX Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», Саратов. - 2016. – С. 39.
35. **Gerasimova, S.A.**, Gelikonov, G.V., Kazantsev, V.B. Dynamics of electronic neurons coupled via optical fiber channel / **S.A. Gerasimova**, G.V. Gelikonov, V.B. Kazantsev // Тезисы XVIII научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород. - 2014. - С. 318.
36. **Герасимова, С.А.** Оптоэлектрическое взаимодействие нейроноподобных элементов / **С.А. Герасимова**, Г.В. Геликонов, В.Б. Казанцев // Тезисы Форума молодых ученых Нижегородского государственного университета, Нижний Новгород. - 2013. - С. 117.
37. **Герасимова, С.А.** Исследование взаимодействия нейроноподобных генераторов, связанных посредством оптоволоконного канала / **С.А. Герасимова**, Г.В. Геликонов, В.Б. Казанцев // Тезисы VIII Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», Саратов. - 2013. – С. 72.
38. **Герасимова, С.А.**, Геликонов Г.В., Казанцев В.Б. Оптоэлектрическая связь двух нейроноподобных генераторов ФитцХью-Нагумо / **С.А. Герасимова**, Г.В. Геликонов, В.Б. Казанцев // Тезисы 18-ая Нижегородской сессии молодых ученых (естественные, математические науки), Нижний Новгород. - 2013. С. 43
39. **Герасимова, С.А.**, Геликонов Г.В., Казанцев В.Б. Исследование динамики двух оптоэлектрически связанных нейроноподобных генераторов ФитцХью-Нагумо / **С.А. Герасимова**, Г.В. Геликонов, В.Б. Казанцев // Тезисы XVII научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород. - 2013. С. 171.
40. **Герасимова, С.А.** Модель регистрации нейронных сигналов внеклеточными электродами / **С.А. Герасимова**, А.Л. Грибков, В.Б. Казанцев // Тезисы XVI научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород. - 2013. - С. 153.

Методические пособия:

41. **Герасимова С.А.** Модель внеклеточной регистрации биопотенциалов нейронов мозга [Электронный ресурс] / **С.А. Герасимова**, А.Л. Грибков, В.Б. Казанцев // Электронное учебно-методическое пособие, Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет. - 2012. – 39 с. – Режим доступа: http://www.unn.ru/pages/e-library/methodmaterial/files/12_gerasimova_2012_asp.pdf