



УТВЕРЖДАЮ

Директор,

Д.Ф. М.Н. член-корреспондент РАН

«26» февраля 2021
Никитов С.А.

ОТЗЫВ

Ведущей организации на диссертацию Герасимовой Светланы Александровны «Генерация и синхронизация сигналов в нейроморфных радиофизических системах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика

Диссертационная работа С.А. Герасимовой посвящена исследованию эффектов взаимодействия нейроноподобных генераторов, связанных через оптический канал связи и через мемристивное устройство, в рамках радиофизического подхода, представлена верификация полученных результатов путем построения нейрогибридной системы, состоящей из нейроноподобного генератора, канала связи и живых нейронов мозга крысы. Цель диссертации - 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 работе показано, что при одностороннем взаимодействии двух нейроноподобных генераторов Фитцхью-Нагумо, осуществленном через оптоволоконный канал связи, происходит синхронизация сигналов с соотношением частот $1 : 1, 3 : 1, N : 1$, где N – количество импульсов пресинаптического радиотехнического нейрона к каждому импульсу постсинаптического нейрона. Стоит отметить, что для имитации пластичного синаптического контакта были использованы мемристивные устройства. В результате включения в канал связи между импульсными генераторами мемристивного устройства продемонстрирована возможность реализации синаптической пластиичности по правилу STDP, которое основано на перекрытии сигналов от пре- и постсинаптического нейрона. В качестве верификации полученных экспериментальных и теоретических результатов была 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. Проведенные исследования открывают широкие возможности не только имитационного моделирования динамики синаптически связанных нейронов, но и перспективы построения оптоэлектронных, мемристивных интерфейсов с живыми нейронами мозга. В связи с этим научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов диссертационной работы не вызывают сомнений.

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.

По теме диссертации 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. Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 114 страниц. В диссертации 40 рисунков.

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. Каждый нейроноподобный генератор был реализован в виде генератора импульсных сигналов на основе модельного нейрона Фитцхью-Нагумо. Воздействие на принимающий генератор осуществлено при помощи фотодиода, управляемого сигналом из оптоволокна. Управление коэффициентом передачи, и соответственно силой связи нейроноподобных генераторов, было осуществлено за счет варьирования нагрузочного

сопротивления резистора фотодиода. Установлено, что оптоволоконный канал связи может обеспечить вынужденную синхронизацию. Экспериментально получены режимы синхронизации с различным соотношением частот.

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 нейроноподобных сигналов обеспечивает адаптивную связь и синхронизацию генераторов. В качестве имитации пластичного синаптического контакта была использована стохастическая модель мемристивного устройства. Была использована форма нейроноподобных импульсов, полученных при решении системы Фитцхью-Нагумо, для моделирования пре- и постсинаптического спайка (нервного импульса). На основе полученных данных было проведено теоретическое моделирование правила синаптической пластиичности (STDP), которое реализовано с помощью перекрытия сигналов от ведущего и ведомого генераторов. Амплитуда спайков была выбрана таким образом, чтобы каждый из импульсов по отдельности не способствовал переключению состояния мемриста, но при этом вероятность переключения мемриста при воздействии на него результирующим сигналом была бы достаточно велика. Было установлено, что различные режимы синхронизации нейроноподобных генераторов наблюдаются при амплитуде сигнала управляющего генератора в диапазоне 2–3 В и сопротивлении мемристивной структуры в диапазоне 5–7 кОм.

В третьей главе 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. 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 усиливаясь до необходимой амплитуды. Амплитуда выходного сигнала генератора Фитцхью-Нагумо варьировалась в диапазоне от 0.6 В до 5 В. 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. 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.

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

К основным результатам работы следует отнести:

При изучении одностороннего 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.

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.

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.

К диссертационной работе имеются следующие замечания:

Во второй главе диссертационной работы проведено обширное экспериментальное и теоретическое исследование аддитивных свойств мемристивных структур в составе нейроморфной системы, проведено моделирование эффекта STDP, построена кривая веса. Однако не приведено экспериментальных данных физического моделирования эффекта STDP, только представлена ссылка на подобную экспериментальную работу.

В третьей главе построена нейрогибридная система, приведены параметры такой системы для эффективной стимуляции живых нейронов. Предложенная система имеет односторонний характер взаимодействия с живой клеткой, полезно было бы исследовать замкнутую систему.

Отмеченные недостатки не снижают научной ценности и практической значимости работы.

Диссертация обсуждалась на заседании научно-технического семинара лаборатории «Информационные и коммуникационные технологии на основе динамического хаоса» Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва).

ВЫВОД:

По своему научному уровню и полученным результатам диссертационная работа «Генерация и синхронизация сигналов в нейроморфных радиофизических системах» удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Герасимова Светлана Александровна заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 радиофизика

Отзыв составил:

Главный научный сотрудник

д.ф.-м.н. (по специальности 01.04.03 - радиофизика),
профессор

А.С. Дмитриев

ФГБУН Институт радиотехники и электроники имени
В.А. Котельникова Российской академии наук,
125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7.

<http://www.cplire.ru/>

+7 (495) 629 3574, ire@cplire.ru

Боюсь Феликса Дмитриева ~~не~~ заверяю

