

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Кипелкина Ивана Михайловича
**«Генерация и передача сигналов в нейроноподобных генераторах
с мемристивной нелинейностью»,**

представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.4 – Радиофизика

Диссертационная работа Кипелкина Ивана Михайловича посвящена исследованиям, направленным на возможность воспроизведения нейрональной активности и ее интеграции в структуру основных блоков нейроморфных электронных устройств. В работе рассматриваются подходы к генерации нейроноподобных электрических стимулов с использованием аппаратных моделей нейронов на базе модифицированных генераторов ФитцХью-Нагумо и мемристивных устройств.

Актуальность тематики диссертации

Развитие технологии современной элементной базы с акцентом на использование динамических режимов стохастических мемристорных систем при аппаратной реализации искусственных нейронных сетей, наряду с использованием новейших достижений нейрофизиологических наук, обеспечивающих возможность имплементации основных типов нейрональной активности в структуру искусственной нейронной сети для максимально полного обеспечения функционала ее основных структурных блоков, а также использование биологических нейронных сетей в качестве тестовых для регистрации и симуляции биоэлектрической активности, обеспечивает основу для создания нового класса универсальных, адаптивных систем с алгоритмами самообучения на основе регистрируемой нейронной активности. Диссертационное исследование Кипелкина И.М. посвящено развитию подходов к формированию и передаче сигналов заданной формы в нейроморфных системах с использованием новых типов нейроноподобных генераторов на базе мемристивных устройств, что безусловно актуально в концепции развития компактных нейроморфных систем обработки информации.

Научная новизна, степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций:

Научная новизна исследований заключается в разработке способов генерации нейрональной активности, основанных на интеграции

металлооксидных мемристивных структур в модифицированные схемы генераторов ФитцХью-Нагумо. В диссертационной работе показано, что нелинейность и стохастичность электрофизических характеристик мемристоров при включении в электронную схему нейроноподобного генератора ФитцХью-Нагумо позволяет в ряде случаев получать динамику автоколебательных и возбудимых режимов колебаний и позволяет в перспективе рассчитывать на воспроизведение динамики сложно-порогового нейронального отклика.

Несомненной новизной обладают разработанные решения синхронизации электронных мемристивных генераторов ФитцХью-Нагумо с использованием резистивной и мемристивной связи, демонстрирующие возможность вынужденной синхронизации колебаний, рассматриваемые с позиций обеспечения адаптивного поведения в нейрональных осциллирующих системах. Продемонстрирован вариант использования встречно-параллельного подключения мемристивных устройств для адаптивного изменения силы связи нейронных генераторов на основе моделей ФитцХью-Нагумо.

Обоснованность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается двумя свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ: «Колебательный мемристивный нейрон» (№ 2023616583 от 10.03.2023 г.) и «Адаптивная синхронизация мемристивных нейроноподобных генераторов» (№ 2024613776 от 15.02.2024 г.)

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций

Полученные автором результаты достоверны, подходы к решению поставленных задач отличаются целостностью, анализ и интерпретация экспериментальных данных и основные выводы – логической стройностью. Принятые ограничения обоснованы и четко отмечены автором.

Достоверность результатов представленных в работе модельных расчетов подтверждается использованием экспериментальных данных в качестве входных параметров для используемых вычислительных моделей; результаты моделирования подтверждаются результатами проведенных экспериментальных исследований. Научные положения и результаты диссертационной работы апробированы на 7 российских и международных конференциях, изложены в 15 научных работах, в том числе в 3 статьях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Теоретическая значимость заключается в детальном исследовании особенностей нейроноподобной динамики и квазигармонических колебаний в электронных схемах на базе генераторов ФитцХью-Нагумо и мемристорных элементов с биполярным характером резистивного переключения.

Практическая значимость диссертационной работы определяется разработанными решениями для обеспечения адаптивной синхронизации нейроноподобных осцилляторных систем, а также способов адаптивного изменения связи между ними, позволяющих обеспечить генерацию сложных динамических режимов спайк-берстовых колебаний, имитирующих динамику ионных каналов нейрона.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, дано содержательное описание современного состояния проблемы, сформулирована цель работы и поставленные задачи, указана суть научной новизны и практическая значимость полученных результатов, представлены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается нейроноподобный генератор ФитцХью-Нагумо, основой функционирования которого является неорганическое металл-оксидное мемристивное устройство. Детально описывается математическая модель мемристивного устройства 1-го порядка, учитывающая внутренний транспорт носителей заряда, стохастический разброс параметров, а также характерный гистерезис. Получены основные режимы активности, включая возбудимую нейроноподобную динамику и квазигармонические автоколебания. Представлена двухпараметрическая диаграмма зависимости управляющего параметра от площади электродных контактов мемристивного устройства. Данная диаграмма служит полезным инструментом для выбора необходимого режима генерации. Особое внимание уделено аппаратному внедрению физического мемристивного устройства в модельный генератор, реализованный на макетной плате. Продемонстрировано, что процесс формирования спайковой активности в таком генераторе достигается за счёт окислительно-восстановительных реакций, происходящих внутри проводящего канала мемристивного устройства.

Во второй главе представлено комплексное исследование осциллирующей системы, состоящей из однонаправленно соединённых мемристивных нейроноподобных генераторов ФитцХью–Нагумо. Подключение осуществляется через резистивное и мемристивное устройства. В ходе исследования выявлены адаптивные свойства, присущие мемристивному устройству в составе осциллирующей системы. Определены значения относительного изменения сопротивления мемристивного устройства под воздействием нейроноподобного сигнала. Указанный параметр играет ключевую роль, выступая в качестве характеристики силы связи в математической модели. Автор демонстрирует, что резистивная и мемристивная связь между двумя осцилляторами способствует вынужденной синхронизации сигналов.

В третьей главе разработана биофизическая модель нейрона, способная воспроизводить основные свойства и характеристики потенциала действия. Это достигается за счет использования встречно-параллельного соединения двух неорганических металл-оксидных мемристивных устройств, имеющие различный состав электродных контактов. Установлено, что такая система качественно имитирует стохастическое поведение ионных каналов. Автором выявлено три основных режима активности, включая возбуждение, автоколебания и бистабильность. Показан постсинаптический ответ в виде механизма синаптической потенциации – адаптивного увеличения силы связи, неорганических металл-оксидных мемристивных устройств на периодическое импульсное воздействие.

В заключении приводятся основные результаты диссертационного исследования, свидетельствующие о том, что поставленная цель и задачи достигнуты.

Достоинства и недостатки работы

1. В рамках численного исследования однонаправленной связи между двумя мемристивными нейроноподобными генераторами ФитцХью-Нагумо через мемристивное устройство была разработана динамическая модель мемристора. Автор указывает на использование экспериментальных данных для ее разработки, в качестве которых приводятся квазистатические вольт-амперные характеристики. При этом в работе упоминаются, что характеристики получены при воздействии напряжений прямоугольной формы. В этом случае непонятно, какие именно экспериментальные данные использовались: если квазистатические вольтамперные характеристики, то

они измеряются при подаче пилообразного напряжения на структуру, если динамические – то, как правило, речь идет об исследованиях динамики (времени переключения) переключения при подаче коротких и сверхкоротких импульсов на структуру.

2. Приведенные в таблице 3 параметры металлооксидных мемристивных устройств приводятся без указания единиц измерения, в связи с чем их довольно трудно сопоставить с экспериментальными вольтамперными характеристиками. Неясно по какому участку смоделированной вольтамперной характеристики мемристоров, определялись указанные в таблице 3 параметры, используемые в модели?

3. Не совсем понятно, как зависимость изменения сопротивления мемристивного устройства от амплитуды нейроноподобного сигнала генератора ФитцХью-Нагумо, приведенная на рисунке 31, связана с экспериментальными вольтамперными характеристиками мемристивного устройства, приведенными на рисунке 28? Что имеется в виду под скачками сопротивлений мемристора, указанными на рисунке 31 стрелками? У мемристора с биполярным переключением есть два резистивных состояний – СНС (низкоомное) и СВС (высокоомное). Стрелки показывают изменение сопротивления в пределах одного резистивного состояния (например, СВС в диапазоне 0,5 – 1,5 В), или речь идет что уровень проводимости мемристора меняется, а с изменением амплитуды нейроноподобного сигнала генератора ФитцХью-Нагумо для каждого уровня наблюдается переключение из СВС в СНС? Более того, описание приведенной зависимости в тексте содержит ряд неточностей. Так, автор утверждает, что «изменение амплитуды нейроноподобного сигнала в интервале от 0.5 до 1.5 В приводит к тому, что неорганическое металл-оксидное мемристивное устройство переходит в более высокопроводящее состояние», тогда как согласно рисунку 31 оно переходит в более низкопроводящее состояние. Аналогично, переход из СВС в СНС при варьировании амплитуды нейроноподобного сигнала от 2 до 6 В рассматривается автором, как «переключение в менее проводящее состояние мемристивного устройства». Также неясно, что имеется в виду под «состоянием экстремального сопротивления» в мемристоре при превышении амплитуды нейроноподобного сигнала 6 В? И чем это экстремальное состояние отличается от состояния, наблюдаемого в диапазоне амплитуд 0,5 – 1,5 В?

4. На рисунке 33 приводится зависимость среднего отношения сопротивлений СВС/СНС. Согласно приведенным данным, ее значение

изменяется в диапазоне нескольких десятков. Как эти данные коррелируют с экспериментальными вольтамперными характеристиками рассматриваемого мемристора на рисунке 28 Г?

5. На странице 84 говорится о том, что разработанная нейроноподобная модель ФитцХью-Нагумо «демонстрирует качественное совпадение основных характеристик и свойств потенциала действия, включая существование порогового значения деполяризующего потенциала, выполнение закона «Все или ничего», а также наличие периодов рефрактерности, в том числе абсолютную и относительную рефрактерность». В то же время данные, подтверждающие наличие периодов рефрактерности и выполнения закона «все или ничего» в работе не приводятся.

6. Смущает обилие обозначений с использованием одной и той же латинской буквы F , которая, например, используется и для обозначения среднего относительного изменения сопротивления мемристора (формула 32) и для коэффициента связи мемристивного устройства (формула 29).

7. Смущает повсеместное использование в качестве обозначения подложки мемристорных структур слова «grass» (трава), наряду с редко упоминающимся «glass» (стекло).

Несмотря на отмеченные недостатки работа производит крайне благоприятное впечатление. К несомненным достоинствам работы относится методологичность проведенных исследований, которая вкупе с логикой построения теоретического и экспериментального блоков, обеспечивает подтверждение концептуальной идеи использования нелинейности и стохастических особенностей электрофизических свойств металлооксидных мемристоров для эмуляции нейрональной активности, а также позволяет наметить возможные способы управления ее динамикой.

Заключение

Диссертация представляет результаты комплексного научного исследования, направленного на решение актуальных проблем современной радиофизики. Достигнутые в работе результаты являются новыми, хорошо обоснованными и представляют интерес с теоретической и практической точек зрения.

С учетом вышесказанного, считаю, что представленная диссертационная работа полностью удовлетворяет всем требованиям пп. 9-11, 13-14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к

кандидатским диссертациям, а ее автор, Кипелкин Иван Михайлович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – «Радиофизика».

Официальный оппонент:

Начальник НИЛ «Нейроморфная электроника
и вычисления в памяти»,
профессор кафедры микро- и нанoeлектроники,
Санкт-Петербургского государственного
электротехнического университета «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина),
доктор физико-математических наук
по специальности
01.04.10 – Физика полупроводников

Н.В. Андреева
«29» апреля 2025 года

Я, Андреева Наталья Владимировна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись Н.В. Андреевой заверяю,
начальник отдела диссертационных советов
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,
кандидат экономических наук



Андреева Наталья Владимировна,
E-mail: nvandreeva@etu.ru, nvandr@gmail.com
Телефон: +7 812 346-44-87
197022, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, дом 5, литера Ф
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»