

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.340.03, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО"
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 04.06.2025 г. № 13 .

О присуждении Кипелкину Ивану Михайловичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Генерация и передача сигналов в нейроноподобных генераторах с мемристивной нелинейностью» по специальности 1.3.4. – Радиофизика принята к защите 26 марта 2025 г., протокол № 5, диссертационным советом 24.2.340.03, созданным на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, приказом Рособрнадзора № 105/нк от 11 апреля 2012 г.

Соискатель, Кипелкин Иван Михайлович, 28 января 1997 года рождения, в 2018 году окончил бакалавриат, а в 2020 – магистратуру физического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по специальности «электроника и наноэлектроника». С 2020 по 2024 год обучался в аспирантуре радиофизического факультета по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия направленность 01.04.03 «Радиофизика». В период подготовки диссертации Кипелкин Иван Михайлович работал в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университете им. Н.И. Лобачевского» в должности младшего научного сотрудника НИИ Нейронаук и НИЛ стохастических мультитабильных систем, где и работает по настоящее время.

Диссертация выполнена на кафедре теории колебаний и автоматического регулирования радиофизического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель доктор физико-математических наук Казанцев Виктор Борисович, профессор, заведующий кафедры нейротехнологий института биологии и биомедицины

государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Официальные оппоненты:

1. Андреева Наталья Владимировна, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.10 – физика полупроводников), доцент, начальник НИЛ «Нейроморфная электроника и вычисления в памяти», профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина)»,
2. Захаров Денис Геннадьевич, гражданин Российской Федерации, кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.03 – Радиофизика) ведущий научный сотрудник института когнитивных наук Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Москва, в своем **положительном** отзыве, утвержденном 14.04.2025 г. и подписанном доктором физико-математических наук по специальности 01.04.03. – Радиофизика, Дмитриевым А.С., научным руководителем лаборатории «Информационные и коммуникационные технологии на основе динамического хаоса», указала, что диссертационная работа Кипелкина Ивана Михайловича «Генерация и передача сигналов в нейроноподобных генераторах с мемристивной нелинейностью» отвечает всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а диссертант заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – «Радиофизика».

Соискатель имеет 15 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 12 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, индексируемых WoS, Scopus и RSCI, опубликовано 3 работы. Основные результаты диссертации были представлены на международных и всероссийских конференциях.

Авторский вклад соискателя в опубликованные в соавторстве работы заключается в проведении аналитических исследований, математического моделирования, обработке экспериментальных данных, анализе полученных результатов, формулировании выводов и подготовке текстов публикаций.

Проверка текста диссертации не выявила неправомерных заимствований. Исследования являются оригинальными и представляются к защите впервые. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Kipelkin, I.M.** Mathematical and Experimental Model of Neuronal Oscillator Based on Memristor-Based Nonlinearity / I.M. Kipelkin [et al.] // Mathematics. – 2023. – V. 11. – №. 5. – P 1268.
2. **Кипелкин, И.М.** Синхронизация мемристивных нейронных генераторов / И.М. Кипелкин [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №.4. – С.5.
3. **Kipelkin, I.M.** Memristor-based model of neuronal excitability and synaptic potentiation / I.M. Kipelkin [et al.] // Frontiers in Neuroscience. – 2024. – V. 18. – P.1456386.

На диссертацию и автореферат поступило 6 отзывов от:

1. Щапина Дмитрия Сергеевича, кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03. – Радиофизика, заместителя заведующего отделом нелинейной динамики по научной работе федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород.
2. Бутусова Дениса Николаевича, кандидата технических наук по специальности 05.13.12. – Системы автоматизации проектирования (промышленность), доцента, заведующего кафедрой САПР факультета компьютерных технологий и информатики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.
3. Дёмина Вячеслава Александровича, доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния, первого заместителя руководителя по научной работе Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.
4. Кащенко Сергея Александровича, доктора физико-математических наук по специальности 01.01.02 – Дифференциальные уравнения, математическая физика, профессора, директора Объединенного института математики и компьютерных наук им. А.Н. Колмогорова ФГБОУВО «Ярославский государственный университет имени П.Г. Демидова», г. Ярославль.
5. Прохорова Михаила Дмитриевича, доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика, доцента, профессора РАН, главного научного сотрудника

Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Саратов.

6. Храмова Александра Евгеньевича, доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика, профессора, главного научного сотрудника Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, г. Калининград.

Все отзывы **положительные**. В отзывах отмечается актуальность темы исследования, новизна полученных результатов и их значимость для науки и практики.

В отзывах на диссертацию и автореферат содержатся следующие замечания.

Замечания из отзыва ведущей организации.

Какая взаимосвязь параметров в модельных уравнениях, описывающих динамику нейрона (19), и электронных компонентов в принципиальной аналоговой схеме генератора?

На страницах 43-45 диссертационной работы представлен анализ состояний равновесия, однако его описание носит поверхностный характер. Для повышения научной составляющей рекомендуется подробно расширить данный раздел конкретными числовыми значениями.

В диссертации утверждается, что в перспективе нейроморфные информационно-вычислительные системы (видимо с использованием элементов мемристорного типа) смогут обрабатывать большие потоки информации в режиме реального времени. Но при современном состоянии вычислительной техники такое утверждение нуждается хотя бы в качественном пояснении. В чем собственно преимущество систем с мемристорами по сравнению с другими вычислительными структурами, в том числе классическими?

Замечания из отзыва официального оппонента Андреевой Н.В.

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.

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?

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?

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?

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.

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).

Смущает повсеместное использование в качестве обозначения подложки мемристивных

структур слова «grass» (травя), наряду с редко упоминающимся «glass» (стекло).

Замечания из отзыва официального оппонента Захарова Д.Г.

Второе положение, выносимое на защиту, неудачно сформулировано, поскольку при описании режимов синхронизации не объяснено, что M – целое число, и не указаны диапазон, в котором оно может меняться. Несмотря на то, что в тексте диссертации это было объяснено, на мой взгляд, в положении это тоже необходимо было отразить.

В уравнениях, описывающих математические модели нейроноподобных генераторов, наблюдается неоднозначность в обозначении некоторых параметров. В частности, в уравнении (19) один из параметров обозначен как ρ , тогда как в уравнении (35) аналогичный параметр обозначается как σ .

Диссертация содержит ряд неточностей и неудачных формулировок. Например, на стр. 37 при описании модели ФитцХью-Нагумо диссертант пишет, что «быстрая переменная u описывает трансмембранный потенциал мембраны нейрона (отвечает за генерацию потенциала действия), v является медленной переменной восстановления мембраны (определяет динамику ионного тока, ответственного за восстановление равновесного потенциала нейронной клетки)». Здесь, трансмембранный потенциал мембраны является тафтологией, а «восстановление мембраны» – неверной формулировкой.

Для своих теоретических и экспериментальных исследований диссертант выбрал феноменологическую модель ФитцХью-Нагумо. При этом, в третьей главе, он, при сравнении физических принципов функционирования мемристивных устройств и процессов, протекающих в ионных каналах, апеллирует, по всей видимости, к модели Ходжкина-Хаксли. Хотелось бы понять, с одной стороны, чем обусловлен выбор таких моделей, а, с другой, почему выбраны именно натриевые и калиевые ионные каналы?

Во 2-й главе, во время изучения вынужденной синхронизации нейроноподобных элементов, вводятся параметры R , F , которые являются коэффициентом связи для резистивного и мемристивного подключения. Остаётся не до конца ясным, в каких диапазонах значений данных параметров наблюдаются режимы синхронизации. Хотелось бы увидеть диаграммы с языками Арнольда.

Замечание из отзыва на автореферат Щапина Д.С.

Как видно из рисунка 1 функция $g(u)$ имеет кусочно-линейную ВАХ с двумя наклонами (обозначенными α и β), однако, на принципиальной схеме (рисунок 2) обозначен блок отвечающий этой функции («Блок RL генератора») имеющий только один наклон ВАХ соответствующий значению резистора $R_5 = 1$ кОм, из описания принципиальной схемы, не ясно где блок на схеме отвечающий за второй линейный наклон ВАХ функции $g(u)$, либо безразмерные уравнения (1) и (4) и схема генератора не должны совпадать при описании функции $g(u)$?

Остается не понятным из описания автореферата роль «Выходного блока» (рисунок 2), часть которого исключена автором из нелинейности генератора, хотя именно операционный усилитель ОА3 с резисторами R8, R9 и R10 задает отрицательное сопротивление (отрицательный наклон ВАХ). Будет ли способен данный генератор воспроизводить без отрицательного сопротивления, например, автоколебательный режим, представленный на рисунке 3, только за счет наличия нелинейного мемристивного элемента? Если нет, то не понятно почему этот блок исключен из нелинейности?

Следовало бы, на мой взгляд, так же исключить из названия генератора авторов уравнений ФитцХью и Нагумо, поскольку их уравнения, как известно, являются редуцированием (упрощением) более сложной (высокоразмерной) системы уравнений Ходжкина и Хаксли, и при определенных предположениях сводятся к двумерной системе уравнений с кубической нелинейностью, напротив, описывающая динамику генератора трехмерная система уравнений (4) имеет более сложную ВАХ мемристивного элемента.

Замечание из отзыва на автореферат Бутусова Д.Н.

Отмечается, что мемристоры являются энергоэффективными устройствами, но в тексте отсутствуют формулы для оценки этой энергоэффективности, а также не приведены какие-либо конкретные количественные показатели для сравнения с альтернативными схемотехническими решениями. В автореферате также указано наличие периодов рефрактерности с отсылкой к рисункам 8А и 8Б, однако результаты на этих рисунках не демонстрируют данное свойство модели нейрона.

Замечание из отзыва на автореферат Кащенко С.А.

Была ли учтена и исследована роль временной задержки в рассматриваемых моделях?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается значительным опытом выполнения ими научно-исследовательских работ по тематике диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований установлено следующее:

Разработанная эквивалентная электронная схема и математическая модель нового типа нейроноподобного генератора ФитцХью–Нагумо, основанного на нелинейных свойствах неорганического металл-оксидного мемристивного устройства с биполярным типом переключения, предназначены для генерации импульсных сигналов. Вследствие суперкритической бифуркации Андронова–Хопфа происходит мягкая потеря устойчивости. Представлена двухпараметрическая диаграмма, демонстрирующая зависимость критического значения бифуркационного параметра от площади электродного контакта мемристивного устройства и определяющая границы автоколебательного и возбудимого режимов.

Разработанная система однонаправленного взаимодействия между двумя мемристивными

генераторами ФитцХью–Нагумо, соединённая резистивными и мемристивными компонентами, обеспечивает разнообразие режимов вынужденной синхронизации. Адаптивные свойства мемристивного устройства обусловлены изменением его сопротивления и определяются амплитудой нейроноподобного сигнала. Представлены экспериментальные режимы вынужденной синхронизации как на основном тоне, так и на гармониках. Мемристивное подключение обеспечивает более широкий спектр режимов вынужденной синхронизации, в отличие от резистивного, демонстрируя соотношение частот $M:1$, где $M \in [1; 7]$ — целое число колебаний, которые воспроизводит постсинаптический генератор к единичному колебанию пресинаптического генератора.

Разработанная эквивалентная электронная схема и математическая модель, основанные на нелинейных свойствах встречно-параллельного подключения двух неорганических металл-оксидных мемристивных устройств, имитируют работу нейронных ионных каналов. Изменение амплитуды внешнего воздействия позволяет управлять системой, перебрасывая её в один из трёх основных динамических режимов: возбудимый, бистабильный или колебательный. Стохастическая природа неорганических металл-оксидных мемристивных устройств способствует механизму синаптического потенцирования — адаптивному усилению связей между элементами.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что в диссертации разработан математический и экспериментальный подход к исследованию механизмов генерации, передачи и преобразования сигналов между нейроноподобными элементами, а также выявлены мультистабильные свойства мемристивных устройств, что может быть использовано для построения больших нелинейных систем осцилляторов с мемристивными связями. Полученные результаты диссертации образуют значимый вклад в развитие теории мемристивных устройств.

Значение полученных соискателем результатов для практики определяется возможностью использования предложенных радиофизических моделей в нейроморфных информационно-вычислительных системах нового поколения.

Оценка достоверности полученных результатов в диссертационной работе подтверждается согласованностью данных компьютерного моделирования и натурных экспериментов, соответствием ранее опубликованным результатам других авторов в данной области, а также отсутствием противоречий выводов диссертации с известными теоретическими положениями радиофизики.

Личный вклад соискателя состоит в проведении схемотехнических исследований и математического моделирования, обработке экспериментальных данных, анализе полученных результатов, подготовке научных публикаций.

В ходе защиты диссертации было высказано следующее критическое замечание:

Бакунов М.И.:

Сколько циклов переключения выдерживают мемристивные устройства в процессе ваших экспериментов без деградации параметров?

Соискатель Кипелкин И.М. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и замечание и привел собственную аргументацию:

Мемристивные устройства на танталовом электроде выдерживают порядка миллиона переключений без явной деградации параметров. На рутениевом электроде такие характеристики получить не удалось.

На заседании 04.06.2025 г. диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития радиофизики, присудить Кипелкину И.М. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек из них 9 докторов наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени — 17, против присуждения ученой степени — 1, недействительных бюллетеней — 1.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета



Гурбанов Сергей Николаевич

Клюев Алексей Викторович

04.06.2025