



На правах рукописи

Кипелкин Иван Михайлович

**ГЕНЕРАЦИЯ И ПЕРЕДАЧА СИГНАЛОВ В НЕЙРОНОПОДОБНЫХ
ГЕНЕРАТОРАХ С МЕМРИСТИВНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ**

1.3.4 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2025

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

Научный руководитель:	Казанцев Виктор Борисович доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой нейротехнологий ННГУ, г. Нижний Новгород
Официальные оппоненты:	Андреева Наталья Владимировна доктор физико-математических наук, доцент, начальник НИЛ «Нейроморфная электроника и вычисления в памяти», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург Захаров Денис Геннадьевич кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник института когнитивных наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), г. Москва
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук» (ИРЭ РАН), г. Москва

Защита состоится 4 июня 2025 года в 17 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.340.03, созданного на базе Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте диссертационного совета по адресу: <https://diss.unn.ru/1534>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.340.03.

Автореферат разослан _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.340.03,
доктор физ.-мат. наук, доцент



А.В. Клюев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности

Разработка компактных нейроморфных систем, включая микро- и наночипы, способных имитировать работу нейронов, привлекает значительное внимание исследователей. Это связано с перспективами создания новых поколений систем искусственного интеллекта, функционирующих на принципах мозговой активности. Радиофизическое направление в данной области заключается в разработке и исследовании нейроноподобных генераторов – формирователей импульсных сигналов с использованием энергоэффективных устройств.

Наличие сложной временной динамики нейронов – одна из важных составляющих нейроморфных систем. В данную категорию входят не только нелинейные осциллирующие системы (В.И. Некоркин, Г.В. Осипов, Б.П. Безручко, В.В. Матросов, А.Е. Храмов, L. Abbot, P. Arena, R. Llinas, и др.), но и биологически-релевантные импульсные генераторы (А.С. Дмитриев, В.И. Пономаренко, А.С. Караваев, М.Д. Прохоров, Д.Г. Захаров, Е.М. Izikevich, J.M. Bilbault, A.N. Pisarchik и др.) Данные модели позволяют моделировать и воспроизводить некоторые ключевые особенности динамики нейронных систем (Izhikevich, 2003). Подобные исследования помогают раскрывать принципы функционирования мозга и механизмы, лежащие в их основе. Такие модели также используются для создания новых подходов к диагностике и лечению неврологических расстройств, основанных на идее имитации работы мозга.

Нейроны динамически взаимодействуют друг с другом через сложные нелинейно-биологические соединения – синапсы, характеризуемые двумя основными свойствами. Во-первых, они осуществляют однонаправленную передачу информации в виде электрических и химических сигналов от пресинаптического (передающего) нейрона к постсинаптическому (принимающему), что может приводить к их вынужденным колебаниям и синхронизации. Во-вторых, синаптические соединения обладают адаптивным механизмом изменения силы связи, известным как «синаптическая пластичность». Синаптическая пластичность является одним из фундаментальных свойств живых систем, позволяющих изменять силу связи синапса в ответ на его активность (Citri et al., 2008). Рассмотрением динамики ансамблей нейронов, учитывающих множественные механизмы синаптической пластичности, занимаются исследовательские группы под руководством В.И. Некоркина, В.Б. Казанцева, С.А. Лобова, М.Д. Прохорова, А.Н. Горбаня, Y. Kuramoto, J. Lisman, A. Baddeley, G. Mongillo, и др.

В физической электронике внедрение современных компонентов, основанных на металл-оксидных тонкопленочных структурах, представляет собой инновационный междисциплинарный подход. Примером таких структур можно считать мемристор – пассивный электрический элемент,

способный изменять свою проводимость в зависимости от электрического заряда, проходящего через него (Chua, 1971). Функционирование данного устройства связано с обратимым процессом формирования / разрушения проводящего канала (филамента) в оксидной пленке за счёт миграции ионов кислорода, а также процессов окисления и восстановления. Мемристивные устройства благодаря своей внутренней динамике способны точно имитировать ключевые биологические процессы, включая передачу сигналов и адаптивные перестройки (пластичность) связей (Nadler, 2012). Это предоставляет возможность использования данных устройств при разработке нейроморфных систем, например, для создания электронных моделей нейронов и их интеграции с реальными живыми нейронными системами для дальнейшего совместного функционирования. (Vyazovskiy et al, 2008). В отличие от классических формальных нейронов и нейронных сетей, применяемых при машинном обучении, импульсные нейронные модели обладают собственной динамикой и способны демонстрировать нетривиальные нелинейные эффекты при формировании сложных сигналов.

Мемристивные устройства как инструмент в создании адаптивных нейроморфных систем продолжают привлекать значительное внимание, подтверждая свою заинтересованность со стороны российских (А.Н. Михайлов, В.А. Демин, В.А. Смирнов, Н.В. Андреева, В.Ю. Островский, В.В. Ерохин) и зарубежных (L. Chua, D.B. Strukov, B. Spagnolo, S. Kumar, S. Ambrogio, P. Fantini) ученых.

Несмотря на значительные успехи в исследовании мемристивных устройств, а также непрерывное совершенствование электронных моделей нейронов на их основе, вопросы принципов формирования и передачи сигналов в нейроморфных системах остаются до конца не решенными. В частности, большинство исследований, посвященных мемристивным устройствам, в основном ориентированы на традиционные модели, при этом недостаточное внимание уделяется математическому описанию и фундаментальным эквивалентным электронным схемам, основанным на реальных лабораторных устройствах, а не их функциональных аналогах. Фундаментальная проблема с применением мемристивных устройств в электронных моделях нейронов заключается в том, что эти устройства обладают ярко выраженной стохастической природой. Это означает, что при каждом цикле переключения новое резистивное состояние соответствует совершенно новой конфигурации атомов в локальной области переключения, которая формируется или разрушается при воздействии электрического поля / тока. Неспособность точного контроля этих параметров является критической проблемой при анализе динамических процессов.

Наиболее эффективным способом развития данного направления является объединение методов радиофизики, электронных схем нейроноподобных генераторов и мемристивных устройств, а также проведение анализа динамических режимов и получение условий для

устойчивого формирования сигналов заданной формы.

Цель и задачи диссертационной работы

Цель диссертационной работы заключается в разработке новых нейроноподобных генераторов, использующих нелинейность на основе неорганических металл-оксидных мемристивных устройств, для создания компактных нейроморфных систем обработки информации.

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

1. Разработка математической модели и электронной схемы модифицированного нейроноподобного генератора ФитцХью–Нагумо с нелинейностью, основанной на неорганическом металл-оксидном мемристивном устройстве, а также исследование основных бифуркационных механизмов генерации сигнала.
2. Экспериментальное исследование адаптивного поведения неорганического металл-оксидного мемристивного устройства при воздействии на него нейроноподобного сигнала.
3. Проведение комплексного исследования нейроноподобных мемристивных генераторов ФитцХью–Нагумо с вынужденной синхронизацией на основе мемристивного и резистивного устройств.
4. Исследование математической модели и электронной схемы нейроноподобного генератора, использующего встречно-параллельное подключение двух неорганических металл-оксидных мемристивных устройств, имитирующих ионные каналы нейрона.

Методология и методы исследования

В ходе диссертационного исследования применялись методы теории нелинейных колебаний, численное и имитационное моделирование. Дополнительно к этому проводилось радиофизическое прототипирование и обработка экспериментальных данных с использованием графических представлений и статистических методик.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые исследовано применение неорганического металл-оксидного мемристивного устройства, основанного на биполярном типе переключения, в качестве нелинейного элемента нейроноподобной системы ФитцХью–Нагумо, предназначенной для генерации импульсных сигналов.
2. Впервые проведено исследование однонаправленной связи между двумя мемристивными генераторами ФитцХью–Нагумо с использованием резистивного и мемристивного устройства в качестве электронного синапса. Показано, что мемристивное устройство при таком подключении обладает свойством адаптивного поведения.
3. Впервые продемонстрирован эффект синаптической пластичности

(адаптивного усиления связи) при внешнем импульсном воздействии неорганических металл-оксидных мемристивных устройств, использованных в генераторе на основе нейронной модели ФитцХью–Нагумо.

Научные результаты

1. Разработана математическая модель и электронная схема нейроноподобного генератора ФитцХью–Нагумо, который основан на нелинейности неорганического металл-оксидного мемристивного устройства и демонстрирует возбудимую нейроноподобную динамику и квазигармонические автоколебания.

2. При подключении однонаправленной резистивной и мемристивной связи между мемристивными нейроноподобными генераторами ФитцХью–Нагумо получены режимы подпороговых колебаний, а также вынужденной синхронизации в отношении частот: $1:1$, $2:1$, $3:1$, $M:1$, где $M \in [4; 7]$ – число колебаний, которые воспроизводит постсинаптический генератор к единичному колебанию пресинаптического генератора.

3. Использование встречно-параллельного подключения двух неорганических металл-оксидных мемристивных устройств в системе ФитцХью–Нагумо имитирует динамику ионных каналов нейрона.

4. При повышении амплитуды внешнего импульсного воздействия в неорганических металл-оксидных мемристивных устройствах наблюдается монотонное увеличение амплитуды последующих ответных импульсов, что имитирует эффект синаптической потенциации в биологических нейронах.

Достоверность научных результатов, полученных в диссертационной работе

Достоверность научных результатов, полученных в диссертационной работе, основываются на использовании современных методов исследования, а также на тщательной проверке и верификации всех полученных данных. В ходе работы были соблюдены все необходимые научные стандарты, что позволило обеспечить надежность и высокую степень обоснованности выводов. Сравнение экспериментальных результатов с математическими моделями дополнительно подтверждает их валидность и значимость для дальнейших исследований в данной области.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость проведённых исследований в рамках данной диссертационной работы обусловлена решением ряда задач, связанных с разработкой и развитием нейроморфных информационно-вычислительных систем нового поколения. Полученные результаты открывают перспективы не только для применения подобных систем в качестве моделей нейронов, но и для детального исследования механизмов их адаптивного взаимодействия.

Практическая значимость работы, помимо фундаментальных аспектов, заключается в применении мемристивных устройств при проектировании и реализации массивов нейроноподобных элементов, а также в разработке аппаратных средств биоэлектронных интерфейсов, способных в реальном времени получать и классифицировать нейрональную активность.

Наряду с этим, диссертационное исследование также может быть успешно использовано при подготовке научных материалов учебного процесса для студентов, обучающихся по программе бакалавриата и магистратуры, а также в научно-исследовательских работах аспирантов радиофизического профиля.

Научные положения, выносимые на защиту

1) Интеграция неорганического металл-оксидного мемристивного устройства с биполярным типом переключения в качестве нелинейного элемента в схему модифицированного нейроноподобного генератора ФитцХью–Нагумо обеспечивает формирование возбудимых и автоколебательных режимов генерации сигналов.

2) Нейроноподобная осциллирующая система, реализованная в виде односвязных электронных мемристивных генераторов ФитцХью–Нагумо посредством резистивной и мемристивной связи, способна демонстрировать разнообразие режимов вынужденной синхронизации колебаний в отношении частот: 1:1, 2:1, 3:1 и M:1.

3) Встречно-параллельное подключение неорганических металл-оксидных мемристивных устройств в нейроноподобный генератор ФитцХью–Нагумо способно качественно имитировать динамику ионных каналов нейрона.

4) Импульсное воздействие радиотехнических элементов на основе неорганических металл-оксидных мемристивных устройств обеспечивает механизм синаптического потенцирования – адаптивного изменения силы связи.

Публикации и апробация результатов работы

Диссертационная работа выполнена на кафедре теории колебаний и автоматического регулирования радиофизического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

По теме диссертационного исследования опубликовано 15 работ: 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК (из них 3 по специальности 1.3.4 – радиофизика, и 2 в ведущих изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus), 8 статей в сборниках трудов международных научных конференций, 2 тезиса докладов в сборниках трудов всероссийских научных конференций; 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях:

1. XXIV, XXVIII научные конференции по радиофизике на базе радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород, Россия, 2020, 2024 г.)

2. IX международная конференция «Поляховские чтения» (г. Санкт – Петербург, Россия, 9 – 12 марта, 2021 г.)

3. VI, VII, VIII Научная школа «Динамика сложных сетей и их приложения» (г. Калининград, Россия, 2022, 2023, 2024 г.)

4. VIII, IX, X Всероссийский форум «Микроэлектроника» (г. Сочи, Россия, 2022, 2023, 2024 г.)

5. I Международный форум «Наука без границ» (г. Нижний Новгород, Россия, 1 – 4 ноября, 2022 г.)

6. XIX Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления» (п. Домбай, Карачаево-Черкесская Республика, Россия, 1 – 5 апреля 2024.)

7. I Школа–конференция с Международным участием «Нейроэлектроника и Нейротехнологии будущего» (г. Нижний Новгород, Россия, 25 – 29 ноября, 2024 г.)

Результаты диссертации были использованы при выполнении проектов: «Нейроэлектроника – интеллектуальные нейроморфные и нейрогибридные системы на основе новой электронной компонентной базы» (Договор № 17706413348230000800/96-2023/213 от 15.08.2023 г. с ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» Национального центра физики и математики (направление «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах»), 2023-2025 гг.) и «Нейроморфные системы обработки информации и управления на основе мемристорной наноэлектроники» (Федеральный проект «Развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок» национального проекта «Наука и университеты», Дополнительное соглашение к Соглашению о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ), шифр FSWR-2025-0006 (НИЛ «Лаборатория мемристорной наноэлектроники»), 2025-2027 гг.).

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе, были получены лично автором. В совместных публикациях автор самостоятельно выполнил численное моделирование, провёл анализ динамики моделей, разработал радиотехническое устройство, реализующее модельные уравнения, и осуществил основные экспериментальные измерения. Выбор направления исследований, постановка целей и задач, планирование радиофизических экспериментов, а также интерпретация полученных результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами опубликованных работ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, обзора научной литературы, трех глав, заключения, перечня условных обозначений и сокращений, списка литературы. Объем диссертационной работы составляет 114 страниц машинописного текста, включая 46 рисунков, 35 формул и 3 таблицы. Список используемой литературы содержит 138 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность изучаемой проблемы, приводится краткий обзор существующей научной литературы, формулируется цель и круг решаемых задач, описывается научная новизна и научно-практическая значимость выбранной области исследования.

Первая глава диссертационной работы посвящена разработке математической модели и электронной схемы нейроноподобного генератора ФитцХью–Нагумо (ФХН) с нелинейностью на основе неорганического металл-оксидного мемристоривного устройства.

В качестве базовой модели рассматривается электронная схема нейроноподобного генератора ФХН (Binczak et al, 2006), в которой кубическая нелинейность, основанная на встречно-параллельном подключении диодов, была заменена мемристоривной, экспериментально полученной в результате исследования неорганического металл-оксидного мемристоривного устройства $\text{Au/Zr/ZrO}_2(\text{Y})/\text{TiN/Ti/grass}$. Математическое описание модели вводится на применении законов Кирхгофа с последующей нормировкой переменных:

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = f(u) - v + W_{ex}, \\ \frac{dv}{dt} = \varepsilon(g(u) - v - \eta), \end{cases} \quad (1)$$

здесь u является трансмембранным потенциалом, v «восстанавливающая» переменная, W_{ex} представляет собой внешнее воздействие с заданной скважностью Q и амплитудой A_{ex} , η временная константа, ε малый бифуркационный параметр системы. $g(u)$ – кусочно-линейная функция. $g(u) = \alpha u$ при $u \leq 0$ и $g(u) = \beta u$ при $u > 0$, где α, β – положительные параметры, отвечающие за динамику переменной восстановления.

$f(u) = \gamma \cdot I_m(u) \cdot d$ – мемристоривная нелинейность, определяемая произведением силы тока проходящего через мемристор на его активную нагрузку d . γ – нормировочный коэффициент, рассчитываемый с

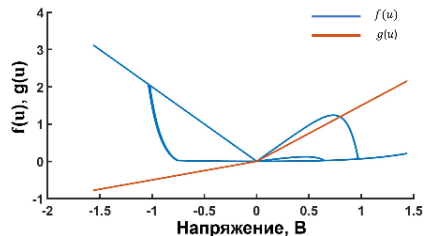


Рисунок 1 – Мемристоривная нелинейность и кусочно-линейная функция.

помощью метода наименьших квадратов аппроксимации вольт-амперной характеристики (ВАХ) и имеющий размерность V^{-1} . Сам ток состоит из произведения плотности тока (j_m) на площадь электродных контактов (S_{el}) мемристивного устройства ($I_m(u) = j_m(u) \cdot S_{el}$).

Модель мемристивного устройства (Chua, 1976) состоит из множества функций, учитывающих экспериментальные параметры и механизмы переноса электронов и ионов внутри устройства при подаче на него напряжения:

$$\begin{cases} j_m = x j_{lin} + (1 - x) j_{nonlin}, \\ j_{lin} = |u|/\rho, \\ j_{nonlin} = |u|B \exp(b\sqrt{|u|} - E_b), \end{cases} \quad (2)$$

где j_m — полная плотность тока мемристивного устройства, которая состоит из линейной составляющей j_{lin} , соответствующей омической проводимости (ρ — коэффициент для омического тока) через проводящие участки устройства, и нелинейной составляющей j_{nonlin} , определяемой переносом носителей заряда через дефектные состояния оксидного материала в области разрыва проводящего канала. Нелинейный перенос носителей заряда (эффективный барьер E_b) описывается законом Пуля – Френкеля.

В уравнении (2) используется переменная внутреннего состояния $x \in [0;1]$, определяемая долей площади устройства, занятой проводящим каналом, изменение которой зависит от миграции кислородных вакансий (эффективный миграционный барьер E_m) (Mishchenko et al., 2022).

Эволюция переменной внутреннего состояния x описывается следующим уравнением:

$$\frac{dx}{dt} = \begin{cases} A \exp(-E_m - \alpha_1 u) \cdot (1 - (2x - 1)^{2p}), & u \geq V_{set} \\ 0, & V_{reset} < u < V_{set} \\ -A \exp(-E_m + \alpha_1 u) \cdot (1 - (2x - 1)^{2p}), & u \leq V_{reset} \end{cases}, \quad (3)$$

В этих уравнениях b , α_1 , A , B — экспериментальные коэффициенты, которые определяются методом квадратичной полиномиальной интерполяции. V_{set} и V_{reset} — пороговые значения напряжения для переключения устройства. В данное уравнение (3) также входит оконная функция $f(x, p) = (1 - (2x - 1)^{2p})$, которая принимает нулевое значение за пределами интервала $(0, 1)$. p — параметр управления функции (Joglekar et al., 2009).

Таким образом, динамика математической модели модифицированного нейроноподобного генератора ФХН с мемристивной нелинейностью будет описываться следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
\frac{du}{dt} &= \gamma \cdot \left(x \frac{|u|}{\rho} + (1-x)|u|B \exp(b\sqrt{|u|} - E_b) \right) \cdot d \cdot S_{el} - v + W_{ex}, \\
\frac{dv}{dt} &= \varepsilon(g(u) - v - \eta), \\
\frac{dx}{dt} &= \begin{cases} A \exp(-E_m - \alpha_1 u) \cdot (1 - (2x - 1)^{2p}), & u \geq V_{set} \\ 0, & V_{reset} < u < V_{set} \\ -A \exp(-E_m + \alpha_1 u) \cdot (1 - (2x - 1)^{2p}), & u \leq V_{reset} \end{cases},
\end{aligned} \tag{4}$$

Результатами численного моделирования без учета внешнего воздействия ($W_{ex} = 0$) продемонстрировано, что характер изменения динамики нелинейной системы (4) соответствует суперкритической бифуркации Андронова-Хопфа с отрицательной первой Ляпуновской величиной и мягкому рождению автоколебаний генератора ФХН. Установлено, что при уменьшении площади электродного контакта неорганического металл-оксидного мемристивного устройства значение бифуркационного параметра ε , при котором происходит рождение устойчивого предельного цикла, увеличивается (Kipelkin, et al., 2023).

Разработанная электронная схема состоит из аналогового электронного генератора ФХН (рисунок 2), содержащего неорганическое мемристивное устройство, образованного тонкопленочной структурой «металл-оксид-металл» – Au/Zr/ZrO₂(Y)/TiN/Ti/grass. Визуализация сигналов и снятие ВАХ устройства проводились с использованием осциллографа C7-334 «АльфаТрек» и анализатора полупроводниковых приборов Agilent B1500A соответственно.

Аналоговый электронный генератор ФХН включает в себя четыре блока. Входной блок состоит из источника питания $V_{battery}$, переменного резистора R_1 , задающий режимы генератора, а также источника внешнего воздействия $V_{external}$. Сигнал, распространяясь по схеме, поступает на RL генератор со значением сопротивления $R = R_5$ и индуктивности $L = C_1 R_4 R_5$. Основой создания импульсов возбуждения является блок нелинейности, содержащий неорганическое металл-оксидное мемристивное устройство Au/Zr/ZrO₂(Y)/TiN/Ti/grass и нагрузочный резистор сопротивлением R_6 . Выходной блок включает в себя конденсатор C_{out} , и регулируемый резистор R_8 , изменяющий амплитуду и длительность колебаний на выходе.

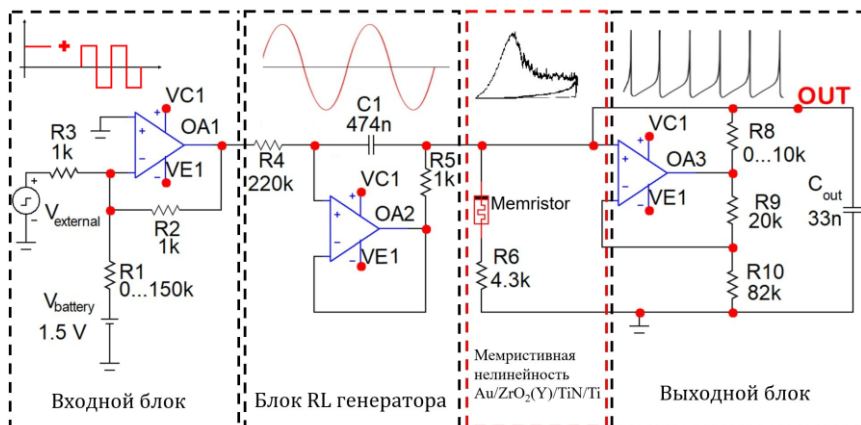


Рисунок 2 – Принципиальная схема генератора ФХН с мемристивной нелинейностью. Нелинейность задается с помощью неорганического металл-оксидного мемристивного устройства $\text{Au/Zr/ZrO}_2(\text{Y})/\text{TiN/Ti/grass}$. Сигнал с выходной точки генератора (*out*) поступает на цифровой осциллограф в виде осциллограммы.

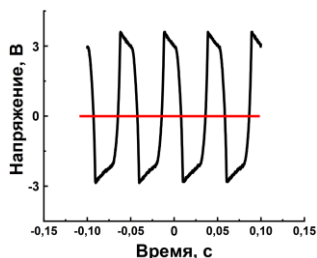


Рисунок 3 – Автоколебательный (черная линия, $R_1 = 95 \text{ k}\Omega$) и возбуждаемый режим (красная линия, $R_1 = 22 \text{ k}\Omega$) колебаний, полученные на выходе генератора ФХН.

Представленная система функционирует следующим образом: сигнал, сформированный аналоговым электронным генератором ФХН, проходя через неорганическое металл-оксидное мемристивное устройство, инициирует процесс переключения, сопровождаемый окислительно-восстановительными механизмами филамента (Ielmini, 2015), что, в свою очередь, приводит к генерации нейроноподобного сигнала. Данный генератор способен демонстрировать как автоколебательную, так и возбуждаемую динамику колебаний (рисунок 3), аналогично математической модели.

Вторая глава диссертационной работы посвящена радиофизическому исследованию динамики односвязных мемристивных нейроноподобных генераторов ФХН с помощью резистивного и мемристивного устройства для изучения режимов вынужденной синхронизации.

Мемристоры – устройства, имеющие два устойчивых состояния, которые отличаются собственным сопротивлением – высоким (СВС) и низким (СНС). Адаптивное поведение устройства определяется изменением его сопротивления, которое в свою очередь зависит от параметров электрического воздействия (Guseinov et al., 2017).

Разработанная осциллирующая система состоит из мемристивного нейроноподобного генератора ФХН (рисунок 2), неинвертирующего усилителя амплитуды с переменным коэффициентом усиления,

резистивного устройства сопротивлением $10\text{ к}\Omega$, неорганического металл-оксидного мемристового устройства $\text{Au/Zr/SiO}_2/\text{TiN/Ti/SiO}_2/\text{Si}$, и нагрузочного резистора сопротивлением $4.3\text{ к}\Omega$ (рисунок 4).

В процессе эксперимента было проведено исследование влияния нейроноподобного сигнала различной амплитуды и частоты на процесс резистивного переключения (РП) мемристового устройства. Для этого устройство было соединено с генератором сигнала по схеме, приведенной на рисунке 4, через точки 1 и 2. Сигнал от генератора подавался на верхний электродный контакт (Au) мемристового устройства, а сигнал с нижнего электрода (Ti) проходил через нагрузочное сопротивление на второй канал осциллографа. Одновременно с этим сигнал от генератора отображался на первом канале осциллографа.

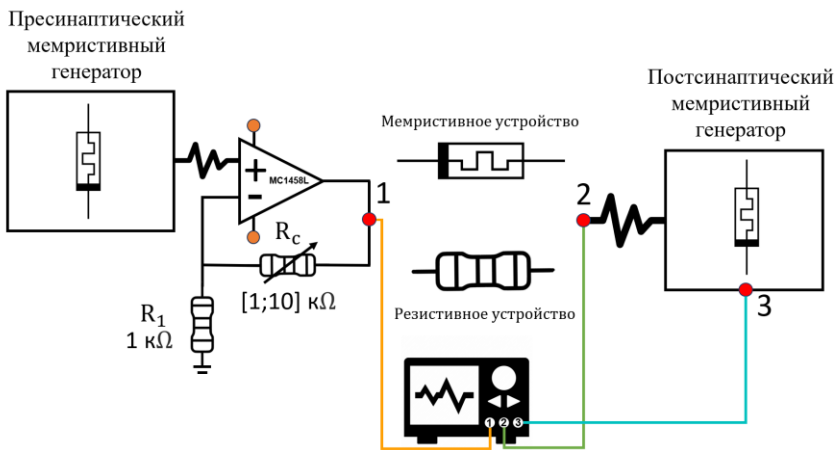


Рисунок 4 – Взаимодействие между пресинаптическим мемристовым генератором ФХН и постсинаптическим мемристовым генератором ФХН через резистивное и мемристовое устройство. R_c – потенциометр, характеризующий силу связи. В пресинаптическом генераторе в качестве нелинейного элемента использовалось мемристовое устройство $\text{Au/Ta/ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)/\text{Pt/Ti/glass}$. В постсинаптическом – $\text{Au/Ru/ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)/\text{Pt/Ti/glass}$. Резистивное устройство использовалось со значением $10\text{ к}\Omega$. Мемристовое устройство – $\text{Au/Zr/SiO}_2/\text{TiN/Ti/SiO}_2/\text{Si}$.

Экспериментально установлено, что значение амплитуды нейроноподобного сигнала пресинаптического генератора ФХН влияет на способность неорганического металл-оксидного мемристового устройства как переключаться из СВС в СНС, так и переходить в более высоко-проводящее состояние (рисунок 5).

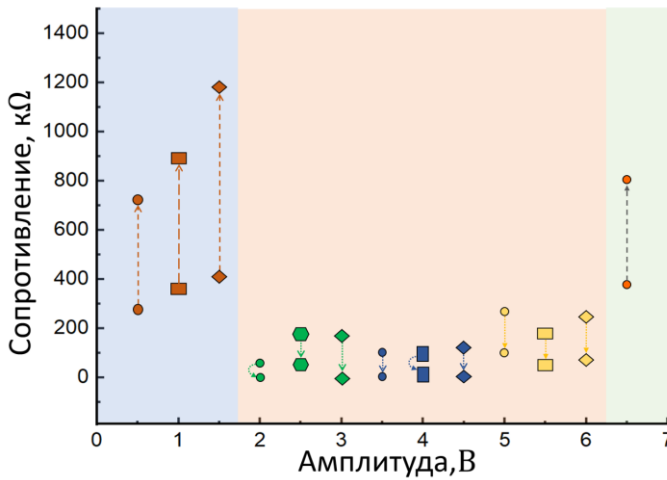


Рисунок 5 – Зависимость сопротивления мемристорного устройства Au/Zr/SiO₂/TiN/Ti/SiO₂/Si от амплитуды нейроноподобного сигнала, поступающий от пресинаптического генератора ФХН. Стрелками указаны скачки значений сопротивления мемристорного устройства.

Полученные экспериментальные результаты соответствуют изменениям в ВАХ данного устройства (Mikhaylov et al., 2020), подтверждая его адаптивные свойства. Это позволяет утверждать, что соединение мемристорных генераторов ФХН посредством неорганического металл-оксидного мемристорного устройства Au/Zr/SiO₂/TiN/Ti/SiO₂/Si способно имитировать свойства синаптической пластичности (Gerasimova et al., 2021).

После проведения электроформовки мемристорных устройств и калибровки генераторов было изучено их поведение при однонаправленном соединении с использованием резистивного и мемристорного устройства. Эксперимент проводился по схеме, изображенной на рисунке 4, где показания, считываемые осциллографом, снимались с точек 1 и 3. В данном случае один из генераторов ФХН находился в режиме автоколебаний, а параметры второго подобраны таким образом, чтобы он не генерировал потенциалы действия при отсутствии внешнего воздействия, то есть находился в возбудимом режиме.

Изменение сопротивления потенциометра R_c в диапазоне от 1.2 до 7.8 кΩ обеспечивает разнообразие режимов вынужденной синхронизации. При резистивном подключении наблюдались соотношения частот 1:1 и 3:1. Мемристорное подключение, в отличие от резистивного, предоставляет более широкий спектр режимов, включая наличие подпороговых колебаний, синхронизацию как на основном тоне, так и на гармониках, реализовывая различные соотношения частот, такие как 1:1, 2:1, 3:1 и $M:1$, где $M \in [4; 7]$ – число колебаний, которые воспроизводит постсинаптический генератор к единичному колебанию пресинаптического генератора (рисунок 6).

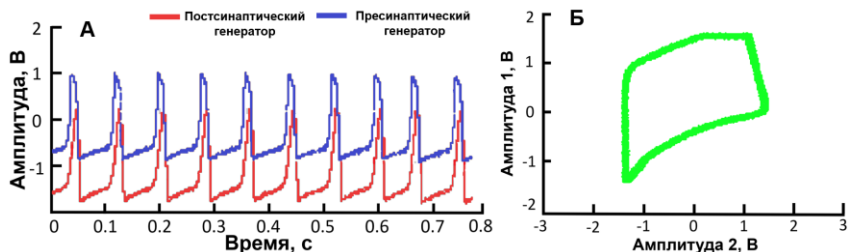


Рисунок 6 – Результаты экспериментального взаимодействия генераторов ФХН через мемристивное устройство $\text{Au/Zr/SiO}_2/\text{TiN/Ti/SiO}_2/\text{Si}$, при синхронизации 1:1. (А) Амплитудная характеристика. Синий цвет – амплитуда пресинаптического генератора. Красный цвет – амплитуда постсинаптического генератора. (Б) Фазовый портрет системы. Ось абсцисс отвечает за амплитуду пресинаптического генератора, а ось ординат – амплитуду постсинаптического.

Вынужденная синхронизация двух мемристивных генераторов ФХН, соединённых неорганическим металл-оксидным мемристивным устройством, устанавливалась следующим образом: при подаче определенного напряжения на мемристивное устройство $\text{Au/Zr/SiO}_2/\text{TiN/Ti/SiO}_2/\text{Si}$ инициировался процесс РП из СВС в СНС, что, в свою очередь, приводило к установлению связи осциллирующей системы. Постсинаптический генератор переходил в автоколебательный режим, при этом колебания синхронизировались. Интервалы для амплитуды пресинаптического генератора (1.6-4.9 В) и сопротивления мемристивного устройства (12-27 кΩ) указывают на достижение различных режимов синхронизации мемристивных нейроноподобных генераторов.

Третья глава диссертационной работы посвящена радиофизическому исследованию модели синаптической связи нейроноподобного генератора на основе встречно-параллельного подключения двух неорганических металл-оксидных мемристивных устройств, имитирующих ионные каналы нейрона.

Для имитации ионных каналов использовались два неорганических металл-оксидных мемристивных устройства биполярного типа переключения на основе $\text{Au/Ta/ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)/\text{Pt/Ti/grass}$ и $\text{Au/Ru/ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)/\text{Pt/Ti/grass}$, имеющие различный состав верхних электродных контактов (рисунок 7).

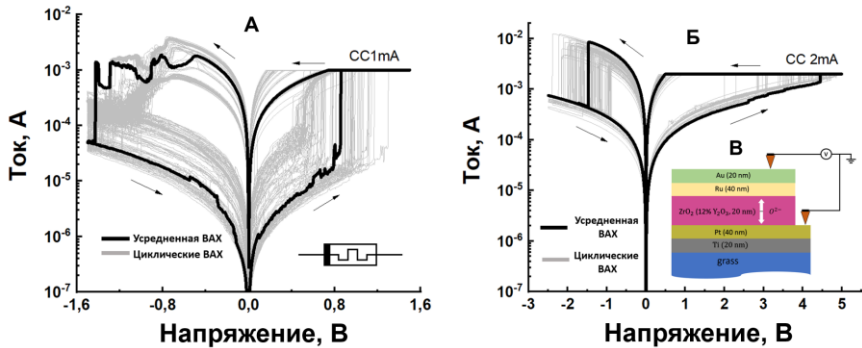


Рисунок 7 – Экспериментальные ВАХ неорганических металл-оксидных мемристивных устройств. (А) Au/Ta/ZrO₂(Y₂O₃)/Pt/Ti/grass, (Б) Au/Ru/ZrO₂(Y₂O₃)/Pt/Ti/grass. Стрелки показывают изменение напряжения. Количество отображенных характеристик составило 200 штук. (В) Схематическое поперечное сечение Au(20 нм)/Ta(40 нм) или Ru(40 нм)/ZrO₂(Y)(20 нм)/Pt(40 нм)/Ti(20 нм)/grass мемристивных устройств.

Динамика нейрона определялась модифицированной моделью ФХН (4) с учетом внешнего прямоугольного воздействия ($W_{ex} \neq 0$) и добавления еще одного мемристивного устройства, подключенного встречно-параллельно. За счет использования такого подключения нелинейная функция выглядит следующим образом:

$$F_{1,2}(u) = \gamma_1 \cdot I_1 \cdot d_1 + \gamma_2 \cdot I_2 \cdot d_2, \quad (5)$$

здесь индексы 1 и 2 обозначают неорганические металл-оксидные мемристивные устройства на основе Au/Ta/ZrO₂(Y₂O₃)/Pt/Ti/grass и Au/Ru/ZrO₂(Y₂O₃)/Pt/Ti/grass соответственно.

В результате численного моделирования, показано, что модель 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 (рисунок 8А и 8Б). В дополнение к этому величиной амплитуды внешнего воздействия можно управлять системой, выбирая один из трех основных динамических режимов – возбудимый, бистабильный и колебательный (рисунок 8В).

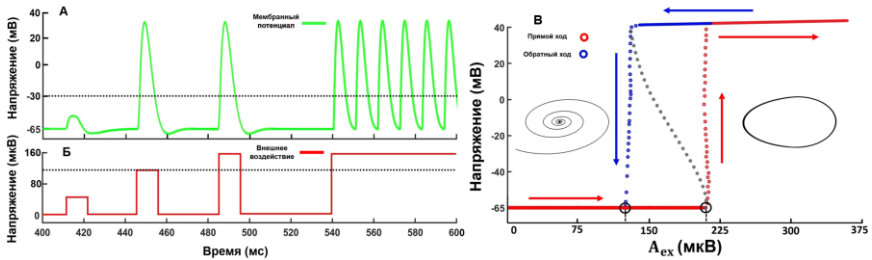


Рисунок 8 – Результаты численного исследования нейроноподобного генератора ФХН, использующего нелинейность (5). (А) Отклик трансмембранного потенциала на одиночное подпороговое, пороговое, сверхпороговое и продолжительное сверхпороговое внешнее импульсное воздействие. Пороговое значение трансмембранного потенциала составляет -30 мВ . (Б) Форма внешнего воздействия. Длительность первых трех воздействий составляет 11 мс. (В) Бифуркационная диаграмма, иллюстрирующая возбудимый, бистабильный и автоколебательный режим нейрона ФХН, снятая при прямом (красные точки) и обратном (синие точки) прохождении диапазона значений амплитуды внешнего воздействия. На диаграмме слева показан пример траектории на плоскости (u, v) для возбудимого режима, а справа – колебательного.

Установлено, что при подборе параметров математическая модель и электронная схема способны демонстрировать поведение, схожее с типичным для реальных нейронов спайк-бёрстовым (пачечным) режимом активности, который характеризуется различным количеством импульсов в каждой пачке при длительном внешнем прямоугольном воздействии. Совокупность двух неорганических металл-оксидных мемристивных устройств, подключённых встречно-параллельно, играет ключевую роль в генерации пачечной активности.

Далее был проведен эксперимент по генерации переменного отклика, в частности определения механизма синаптической пластичности. На рисунке 9 показаны результаты численного моделирования откликов мемристивных устройств на серию импульсных воздействий.

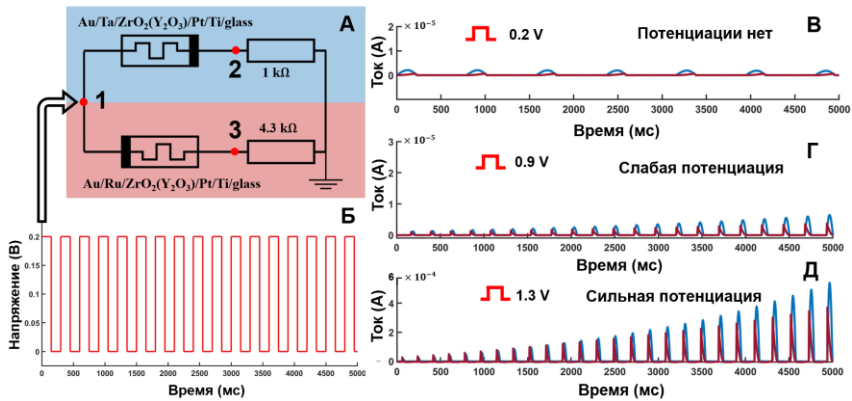


Рисунок 9 – Иллюстрация эффекта синаптического потенцирования в неорганических металл-оксидных мемристивных устройствах. (А) Схема эксперимента с встречно-параллельным подключением мемристивных устройств $Au/Ta/ZrO_2(Y_2O_3)/Pt/Ti/glass$ и $Au/Ru/ZrO_2(Y_2O_3)/Pt/Ti/glass$. Фрагмент всей схемы был взят из блока мемристивной нелинейности, представленного на рисунке 2, с добавлением еще одного устройства, подключенного встречно-параллельно. (Б) Форма воздействия, задаваемая прямоугольными импульсами. Динамика переходных токов с (В) отсутствием, (Г) слабым и (Д) сильным синаптическим потенцированием мемристивных устройств при различных амплитудах внешнего напряжения. Синий цвет соответствует $Au/Ta/ZrO_2(Y_2O_3)/Pt/Ti/glass$, красный – $Au/Ru/ZrO_2(Y_2O_3)/Pt/Ti/glass$.

Стохастическая природа неорганических металл-оксидных мемристивных устройств обуславливает механизм синаптического потенцирования, который приводит к адаптивному увеличению связи между устройствами. Для анализа явления был рассмотрен участок нелинейности в схеме ФХН (рисунок 2), с добавлением еще одного мемристивного устройства, подключенного встречно-параллельно (рисунок 9А). На вход точки 1 подавался положительный прямоугольный импульс различной амплитуды в пределах от 0.2 до 1.3 В и скважностью 0.3. Входное напряжение, проходя через мемристивные устройства, приводит к появлению тока на выходе с учетом внутреннего сопротивления устройств, значения которого снимались с точек 2 и 3 для устройств $Au/Ta/ZrO_2(Y_2O_3)/Pt/Ti/glass$ и $Au/Ru/ZrO_2(Y_2O_3)/Pt/Ti/glass$ соответственно. При подаче подпорогового напряжения, около 0.2 В, проявление механизма синаптической потенциации не наблюдается (рисунок 9В). Однако по мере повышения амплитуды входного напряжения происходит монотонное увеличение проводимости мемристивных устройств, приводя к незначительным механизмам потенцирования и возрастанию токовых откликов со временем (рисунок 9Г). При достаточном уровне входного напряжения, около 1.3 В, в мемристивных устройствах наблюдается устойчивая тенденция к возрастанию амплитуды тока (рисунок 9Д), связанная с усилением механизма синаптической потенциации.

Следующим этапом было выявление синаптического потенцирования во всей аналоговой схеме генератора (рисунок 2) с применением аналогичной нелинейности (рисунок 9А). При моделировании соответствующей динамической системы, было обнаружено, что эффект синаптического усиления может быть вызван последовательностью низкочастотных импульсов порядка 10 Гц (рисунок 10А).

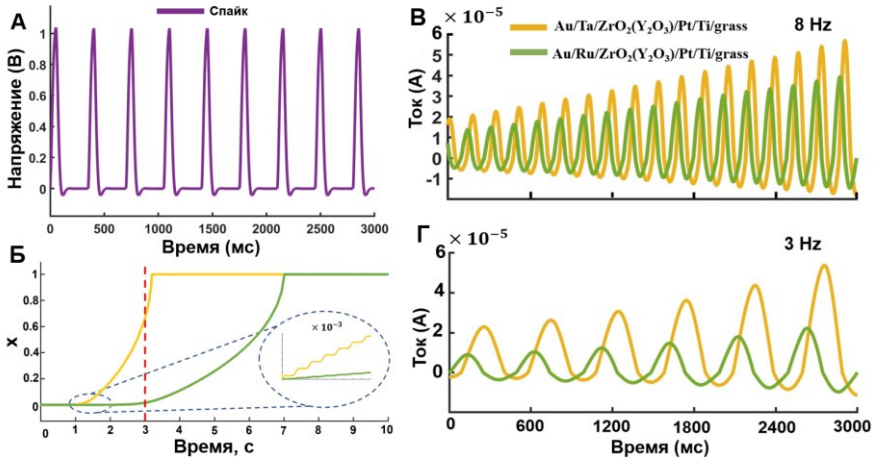


Рисунок 10 – Результаты численного моделирования механизма синаптической потенциации. (А) Пример низкочастотной спайковой активности амплитудой 1 Вольт и частотой 3 Гц. (Б) Функция состояния мемристивных устройств. На вставке изображен увеличенный масштаб. (В) и (Г) Сравнительная характеристика механизма синаптического потенцирования при разных частотах. Желтый цвет соответствует устройству $\text{Au/Ta/ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)/\text{Pt/Ti/glass}$, зеленый – $\text{Au/Ru/ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)/\text{Pt/Ti/glass}$.

Для демонстрации описываемого механизма использовался временной масштаб, определяемый из функций состояния устройств (3). В соответствии с рисунком 10Б в проведенном исследовании был установлен временной интервал продолжительностью до трех секунд. В указанном диапазоне устройства проявляют смешанную динамику, обусловленную внутренней стохастической природой и проявляющуюся через ступенчато-экспоненциальный переход из СВС в СНС. Результаты численного моделирования указывают на изменение формы переходных характеристик тока в зависимости от вида воздействия, что приводит к появлению отрицательных значений. Отметим, что насыщение синаптической потенциации достигается быстрее при уменьшении частоты внешнего воздействия, но с менее выраженным изменением проводимости устройств (рисунок 10В и Г).

В **заключении** приведен краткий вывод, и сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертационного исследования

В рамках данной диссертационной работы были разработаны и представлены новые модели нейроноподобных генераторов, использующих нелинейность на основе неорганических металл-оксидных мемристивных устройств биполярного типа переключения.

Основные результаты, полученные в рамках выполнения диссертационной работы:

1. Разработана математическая модель и электронная схема нейроноподобного генератора ФХН с нелинейностью на основе неорганического металл-оксидного мемристивного устройства. Проанализирована зависимость точки бифуркации от параметров системы, в частности от размера электродного контакта. Экспериментально продемонстрирована автоколебательная и возбудимая динамика колебаний.

2. Проведено радиофизическое исследование динамики односвязных мемристивных нейроноподобных генераторов ФХН с помощью резистивного и мемристивного устройства для изучения режимов вынужденной синхронизации. Установлено, что неорганическое металл-оксидное мемристивное устройство под действием сигнала пресинаптического электронного генератора обладает свойством синаптической пластичности. Получены режимы вынужденной синхронизации с соотношением частот 1:1, 2:1, 3:1, M:1.

3. Проведено радиофизическое исследование модели синаптической связи нейроноподобного генератора на основе встречно-параллельного подключения неорганических металл-оксидных мемристивных устройств. Такое подключение качественно имитирует динамику ионных каналов нейрона. Выявлено три основных режима активности, включая возбуждение, автоколебания и бистабильность. Установлено, что при определенных параметрах математическая модель и электронная схема проявляют поведение, похожее на типичную для реальных нейронов пачечную активность с заданным количеством импульсов в каждой пачке.

4. Показан постсинаптический ответ в виде механизма синаптической потенциации – адаптивного увеличения силы связи, неорганических металл-оксидных мемристивных устройств на периодическое импульсное воздействие.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Научные статьи, опубликованные в журналах перечня ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

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. (Web of Science, Scopus)
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. (Web of Science, Scopus)

Труды конференций и симпозиумов

1. 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.
2. Kipelkin, I. M. Modeling biological-neurons using memristive devices / I. M. Kipelkin, S. A. Gerasimova, V.B. Kazantsev // IX Polyakhov readings. – 2021. – P. 409-411.
3. Kipelkin, I.M. Memristive model of the Fitzhugh-Nagumo neuronal oscillator / I.M. Kipelkin [et al.] // 2022 6th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – IEEE. – 2022. – P. 132-135.
4. Kipelkin, I.M. Memristive Complex Functions for Design of Deep Neural Network / I.M. Kipelkin [et al.] // 2023 7th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – IEEE. – 2023. – P. 133-136
5. Kipelkin, I.M. Simulation of integrated memristive devices and their market prospects / I.M. Kipelkin [et al.] // 2023 7th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – IEEE. – 2023. – P. 137-139.
6. Кипелкин, И.М. Радиоэлектронная модель нейроморфного осциллятора на основе мемристивных устройств / И.М. Кипелкин // Сборник материалов XIX Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2024. – С. 432-434.
7. Кипелкин, И.М. Динамика системы Фитцхью–Нагумо с интеграцией мемристивных материалов / И.М. Кипелкин // Тезисы XXVIII научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород. – 2024. – С. 467.
8. Fedorova, A.Y. Investigating the spinal cord CPG neural circuits with emphasis on STDP mechanism / A.Y. Fedorova, I.M. Kipelkin, M.O. Talanov // 2024 8th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – IEEE. – 2024. – P. 71-74.
9. Кипелкин, И.М. Модель нейроморфного спайкового генератора на

основе мемристивных наноустройств / И.М. Кипелкин // Тезисы докладов школы молодых ученых X Всероссийского форума Микроэлектроника, Сочи. – 2024. – С. 359.

10. Kipelkin, I.M. Inorganic memristive devices-based synaptic mechanisms / I.M. Kipelkin, S.A. Gerasimova, A.N. Mikhaylov, V.B. Kazantsev // Труды первой школы-конференции с международным участием, Нижний Новгород. – 2024. – С. 16.

Патенты и свидетельства об официальной регистрации программного обеспечения

1. Кипелкин И.М., Герасимова С.А., Михайлов А.Н., Казанцев В.Б. Колебательный мемристивный нейрон. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616583 от 10.03.2023г.

2. Кипелкин И.М., Герасимова С.А., Михайлов А.Н., Казанцев В.Б. Адаптивная синхронизация мемристивных нейроподобных генераторов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613776 от 15.02.2024г.

Кипелкин Иван Михайлович

**Генерация и передача сигналов в нейроноподобных генераторах с
мемристивной нелинейностью**

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать _____ г. Заказ № _____

Формат _____. Усл. печ. л 1. Тираж 100 экз.

Типография _____