Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

На правах рукописи

Kunp

Кипелкин Иван Михайлович

# ГЕНЕРАЦИЯ И ПЕРЕДАЧА СИГНАЛОВ В НЕЙРОНОПОДОБНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ С МЕМРИСТИВНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

1.3.4 – радиофизика

# ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук,

профессор

Казанцев Виктор Борисович

Нижний Новгород – 2025

Введение
Обзор литературы13
Нейрон13
Модели нейронов14
Синаптические соединения нейронов
Теоретические основы мемристивных элементов
Мемристивные устройства и переход к нейроморфным системам
Заключение по обзору литературы 34
1. Радиофизическое исследование модели модифицированного генератора ФитцХью–Нагумо на основе мемристивной нелинейности
1.1. Численное исследование
1.1.1. Результаты численного исследования 41
1.2. Экспериментальная часть 52
1.2.1. Материалы и методы 52
1.2.2. Радиофизический эксперимент 55
1.3. Заключение по первой главе 59
2. Радиофизическое исследование динамики односвязных мемристивных
нейроноподобных генераторов посредствам резистивного и мемристивного
устройства
2.1. Численное исследование
2.1.1. Результаты численного исследования
2.2. Экспериментальная часть
2.2.1. Материалы и методы67
2.2.2. Исследование адаптивного поведения неорганического металл- оксидного мемристивного устройства
2.2.3. Экспериментальное исследование вынужденной синхронизации при использовании резистивного устройства
2.2.4. Экспериментальное исследование вынужденной синхронизации при использовании мемристивного устройства
2.3. Заключение по второй главе78
3. Радиофизическое исследование генератора на основе встречно-

3.1. Описание мемристивных устройств	
3.2. Численное исследование	
3.2.1. Результаты численного исследования	
3.3. Радиофизический эксперимент	
3.4. Постсинаптический ответ мемристивных устройств	
3.5. Заключение по третьей главе	
Основные результаты диссертационного исследования	
Благодарности	
Перечень условных обозначений и сокращений	
Список используемой литературы	

# Введение

# Актуальность темы исследования и степень ее 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 нейромофрных 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.М. Bilbault, А.N. Pisarchik и др.) Данные модели позволяют моделировать и воспроизводить некоторые ключевые особенности динамики нейронных систем [1]. 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

изменения силы связи, известным «синаптическая механизмом как пластичность». Синаптическая пластичность является одним ИЗ фундаментальных свойств живых систем, позволяющих изменять силу связи синапса в ответ на его активность [2]. Рассмотрением динамики ансамблей механизмы нейронов, учитывающих множественные синаптической пластичности, занимаются исследовательские группы под руководством В.И. Некоркина, В.Б. Казанцева, С.А. Лобова, М.Д. Прохорова, А.Н. Горбаня, Ү. 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 [3]. 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. 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. В отличие от классических формальных нейронов и нейронных сетей, применяемых при машинном обучении, импульсные нейронные модели обладают собственной линамикой 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 большинство исследований, частности, 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.

 Экспериментальное исследование адаптивного поведения неорганического металл-оксидного мемристивного устройства при воздействии на него нейроноподобного сигнала.

 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 металлоксидного 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 электронная И 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 соотношении частот: 1:1, 2:1, 3:1, М:1, где М ∈ [4; 7] – число колебаний, которые воспроизводит постсинаптический генератор к единичному колебанию пресинаптического генератора.

 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, основывается 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

 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 М:1.

3) Встречно-параллельное подключение неорганических металлоксидных 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 потенциирования – 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 [4-6] (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 [7-16]; 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ [17, 18].

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях:

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

 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.)

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

 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.

# Обзор литературы

# Нейрон

Наиболее сложной системой, обнаруженной у живых существ и вызывающей значительный интерес у учёных, является мозг. Его функционирование напрямую связано с взаимодействием множества ключевых элементов, среди которых особое место занимают нейроны [1]. Нейрон — это особая клетка нервной системы, предназначенная для восприятия, передачи и обработки информации в виде электрических и химических сигналов. Нейроны структурно состоят из тела клетки (сомы), дендритов и аксонов. Дендриты представляют собой входные структуры нейрона, способные принимать внешние сигналы от других нейронов и передавать их в соматическую область клетки. После получения этих сигналов в теле нейрона происходит их суммирование и обработка. Каждый нейрон окружен специализированной мембраной, которая выполняет защитную функцию и способна регулировать транспорт определённых химических веществ. Эта способность зависит от функционального состояния нейрона в данный момент, обеспечивая необходимую селективность для поддержания гомеостаза и эффективной передачи сигналов в нейронной сети. Мембрана нейрона является частично проницаемой, и в ней находятся разные типы ионных каналов, такие как калиевые, натриевые и кальциевые, которые могут открываться и закрываться в зависимости от разницы потенциалов, существующей между цитоплазмой нейрона и внеклеточной средой. Эта разность потенциалов называется трансмембранным потенциалом. Быстрое изменение трансмембранного потенциала на малой части возбудимой клетки называется потенциалом действия. Потенциал действия представляет собой форму электрического импульса, который часто называют «спайком». Генерация спайков в ответ на внешнее воздействие – основа взаимодействия между нейронами.

#### Модели нейронов

Как упоминалось ранее, многочисленные исследования доказали, что один из основных способов передачи информации в мозгу — электрические сигналы (потенциалы действия), создаваемые нейронами в процессе их работы. Однако биологическое описание процесса генерации потенциала действия, будучи качественным, не предоставляет достаточное количество данных для установления количественных закономерностей этого процесса. Для решения этой проблемы можно использовать теоретические подходы — методы численного и математического моделирования.

В 1952 году Алан Ллойд Ходжкин и Эндрю Хаксли сделали открытие, ставшее одним из самых важных в нейронауке: разработали модель гигантского аксона кальмара. Данная модель представляет математическое описание потенциала действия в нервных клетках [19]. Ходжкин и Хаксли установили, что такой аксон имеет три основных тока: потенциал-зависимый установившийся  $K^+$  - ток с четырьмя активационными воротами, потенциалзависимый транзиторный  $Na^+$ - ток с тремя активационными и одним инактивационным, а также омический ток утечки, создаваемый ионами  $Cl^-$ . В рамках этой модели мембрану клетки представляли как плоский конденсатор, используя соотношение между зарядом и емкостью конденсатора:

$$C \cdot U = Q, \tag{1}$$

Дифференцировав по времени (*dt*) правую и левую часть уравнения (1), получили:

$$C \cdot \frac{d}{dt}U = \frac{d}{dt}Q,$$
(2)

Для того чтобы перейти к уравнениям, которые описывают динамику клетки, нужно произвести замену переменных от напряжения U к трансмембранному потенциалу V, от общей емкости C к удельной емкости мембраны на единицу площади  $C_m$ , а дифференциал от заряда Q в правой части уравнения представить в виде суммы токов  $\sum I_m$  для каждого иона,

проходящего через мембрану. Эти замены значительно упрощают протекание процессов, которые происходят в клетке, а также обеспечивают более точное описание ее свойств. Как результат, можно вывести уравнение, которое описывает изменение трансмембранного потенциала нейрона во времени:

$$C_m \cdot \frac{d}{dt} V = \sum I_m \,, \tag{3}$$

Для визуализации полученных математических уравнений часто применяют электронные схемы, представляющие собой нелинейноимпульсные генераторы.

Схематичный переход от мембраны нейрона к электронной схеме модели Ходжкина–Хаксли (XX) представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схематичное изображение нейрона. (А) ионные каналы мембраны; (Б) электронная схема модели XX [19].  $C_m$  – емкость мембраны.  $E_K$ ,  $E_{Na}$ ,  $E_{Cl}$  – потенциалы Нернста для каждого типа ионов, V – трансмембранный потенциал.  $g_K$ ,  $g_{Na}$ ,  $g_{Cl}$  – функции трансмембранного потенциала,  $I_m$  – суммарный ток, проходящий через мембрану.

В данной модели процесс генерации импульсов начинается с того, что внешний сигнал изменяет трансмембранный потенциал клетки, приводя к поочередному открытию ионных каналов. Сначала открываются калиевые каналы, что приводит к выходу ионов калия из клетки и уменьшению трансмембранного потенциала в течение нескольких миллисекунд. После этого начинают открываться натриевые каналы, которые позволяют мощному притоку ионов натрия внутрь клетки и увеличению трансмембранного потенциала. Процесс открытия натриевых каналов занимает больше времени, чем открытие калиевых каналов. Когда потенциал клетки достигает своего максимального значения, натриевые и калиевые каналы закрываются, и клетка снова становится готовой к генерации следующего импульса. Источник малого тока утечки I<sub>cl</sub> позволяет управлять межимпульсными временными интервалами. Стоит отметить, что *I*<sub>Cl</sub> называется током утечки, несмотря на то что ионы  $Cl^{-}$  направлены в клетку. Это объясняется тем, что эти ионы переносят отрицательный заряд внутрь клеточной мембраны, что соответствует потоку положительно заряженных ионов во внеклеточную среду, как, например,  $I_K$ .

Применяя правило Кирхгофа к рисунку 1Б и расписав уравнение (3), приняв за положительное направление тока внутрь клетки, получаем:

$$C_m \dot{V} = I_m - I_K - I_{Na} - I_{Cl}, \tag{4}$$

Чтобы решить уравнение (4), нужно определить, как удельные токи ионных каналов зависят от трансмембранного потенциала. Такую связь можно получить, исследуя эквивалентную электрическую схему.

$$I_{K} = \overbrace{\overline{g}_{K}n^{4}}^{g_{K}} (V - E_{K}),$$

$$I_{Na} = \overbrace{\overline{g}_{Na}m^{3}h}^{g_{Na}} (V - E_{Na}),$$

$$I_{Cl} = \overbrace{\overline{g}_{Cl}}^{g_{Cl}} (V - E_{Cl}),$$
(5)

где  $\bar{g}_K$ ,  $\bar{g}_{Na}$ ,  $\bar{g}_L$  – постоянные величины, представляющие максимальные электрические проводимости ионных каналов. n, m – активационные воротные переменные для  $K^+$  и  $Na^+$  токов, h –инактивационная воротная переменная для  $Na^+$  тока. Данные величины являются безразмерными и определены на интервале (0,1).

Динамика активационных и инактивационной переменных описывается трехмерной системой неоднородных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\dot{n} = \alpha_n(V)(1-n) - \beta_n(V)n,$$
  

$$\dot{m} = \alpha_m(V)(1-m) - \beta_m(V)m,$$
  

$$\dot{h} = \alpha_h(V)(1-h) - \beta_h(V)h,$$
(6)

где α и β – постоянные скорости перехода переменных в «открытое» и «закрытое» состояния соответственно [20].

Изучение трансмембранных токов калия и натрия при фиксированном потенциале является одним из способов получения зависимости постоянных от трансмембранного потенциала. Эта зависимость может отличаться в различных вариантах модели XX, которые используются для описания электрической активности клеток.

Для описания такой зависимости используют выражения [21]:

$$\alpha_{n}(V) = 0.01 \frac{10 - V}{\exp\left(\frac{10 - V}{10}\right) - 1}, \ \beta_{n}(V) = 0.125 \exp\left(\frac{-V}{80}\right),$$

$$\alpha_{m}(V) = 0.1 \frac{25 - V}{\exp\left(\frac{25 - V}{10}\right) - 1}, \ \beta_{m}(V) = 4 \exp\left(\frac{-V}{18}\right), \tag{7}$$

$$\alpha_{h}(V) = 0.07 \exp\left(\frac{-V}{20}\right), \ \beta_{h}(V) = \frac{1}{\exp\left(\frac{30 - V}{10}\right) + 1},$$

Приведенные выражения указаны в оригинальной статье XX [19], соответствующие трансмембранному потенциалу, сдвинутому примерно на 65 мВ, так что потенциал покоя находится на значении  $V \approx 0$ .

Система, содержащая уравнения (4) – (7), образует классическую модель нейрона XX. Данная модель имеет существенный недостаток в том, что ее решение сложно получить с помощью аналитических и даже численных методов.

Для исправления этого недостатка можно перейти к созданию аппаратных реализаций, которые основываются на математическом описании модели XX [22-27], а также к более упрощенным математическим нейромоделям, таким как ФитцХью–Нагумо (ФХН) [28], Хиндмарш–Роуз (XP) [29], Моррис–Лекар (МЛ) [30] и тому подобные [31,32].

Первое упрощенное описание модели нейрона XX было разработано в 1961 году Р. Фитцхью, предложившим дифференциальную двумерную математическую модель первого порядка, которая аппроксимирует электрические характеристики возбудимых клеток [33]. Затем в 1962 году Дж. Нагумо дополнил модель электронным прототипом, используя туннельный диод [34]. Модель ФХН основывается на предположении, что динамика активности нейронов может быть описана с использованием всего двух нелинейных дифференциальных уравнений, одно из которых описывает трансмембранного потенциала, изменение а другое отвечает за восстановление мембраны соответственно [35]:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = V(a-V)(V-1) - w + I_{inj}, \\ \frac{dw}{dt} = bV - cw, \end{cases}$$
(8)

здесь V воспроизводит трансмембранный потенциал, w – медленная «восстанавливающая» переменная мембраны. Параметр a задает форму кубического полинома V(a - V)(V - 1), а параметры b > 0 и  $c \ge 0$  – динамику восстанавливающей переменной. Когда  $b \ll 1$  и  $c \ll 1$ , модель демонстрирует релаксационные колебания. Параметр  $I_{ini}$  описывает выходящий ток инжекции.

Модель нейрона ФХН, подобно модели ХХ, также может быть реализована с помощью эквивалентной электронной схемы (рисунок 2). Данная схема содержит кубический полином с S-образной вольтамперной характеристикой (BAX), что значительно упрощает исследование данной системы [36]. Эта схема состоит из четырех параллельных ветвей с одинаковым падением напряжения V. Индуктивность L, емкость C, резисторы  $R_0$  и R определяют динамическое поведение системы. Кроме того, первая ветвь внутри пунктирных линий на рисунке 2 работает как нелинейный резистор, который в основном построен с использованием классических операционных усилителей TL081CN, аналоговых умножителей AD633JNZ и двух внешних генераторов постоянного напряжения a и b.



Рисунок 2 – Эквивалентная электронная схема модели нейрона ФХН [36]. Вставка демонстрирует ВАХ, создаваемая нелинейным резистором.

Данная модель и её модификации способны воспроизводить ключевые особенности динамического поведения нейронов, включая возбудимость, колебательную динамику и бистабильность [37-41]. Кроме того, она предоставляет возможности для изучения синхронизации [42-48] и мультистабильности [49-51]. Интригующе выглядит дальнейшее практическое применение для нейроморфных приложений и систем [52].

Модель ФХН является популярной среди научного сообщества из-за своей простоты и удобства реализации как математического, так и аппаратного

подхода. Однако из-за того, что модель описывается двумерной дифференциальной системой первого порядка, она не способна точно воспроизводить сложные динамические процессы, такие как хаотические спайк-бёрстовые колебания, что затрудняет ее использование в создании биореалистичных моделей нейронов.

Впервые модель берстовой и хаотической активности нейрона была предложена Дж. Хиндмаршем и Р. Роузем в 1982 году [29]. Нейрон ХР представляет собой простую, но в то же время мощную динамическую модель, используемую для анализа нейронной активности и сложных биологических процессов.

Модель описывается трехмерной системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y - ax^{3} + bx^{2} - z + I, \\ \frac{dy}{dt} = c - dx^{2} - y, \\ \frac{dz}{dt} = r[s(x - x_{R}) - z], \end{cases}$$
(9)

здесь переменная x представляет из себя трансмембранный потенциал нейрона, y и z характеризуют транспорт быстрых и медленных токов через ионные каналы соответственно. I – внешний входной ток, который может моделировать взаимодействия нейронов.  $x_R$  – контрольный параметр, задерживающий и ускоряющий активацию медленного тока. Параметры a, b, c, d, r, s определяют форму и характер динамики нейрона.

В зависимости от значений параметров и величины внешнего тока, эта модель может проявлять как регулярные [53], так и хаотические [54,55] колебания (рисунок 3).



Рисунок 3 – Трехмерная плоскость амплитуд при (А) хаотическом аттракторе модели ХР; (Б) периодической осцилляции нейрона для различных начальных условий; (В) стабильном предельном цикле, связанном с периодическим колебанием нейрона [53].

Помимо математического описания, модель нейрона XP также имеет обширный набор электронных решений [56-62] и различных модификаций [63, 64].



Рисунок 4 – Электронная схема нейрона XP [60].

Представленная схема (рисунок 4) состоит из конденсатора  $C_1$ , катушки индуктивности  $L_3$ , двух линейных резисторов  $R_2$ ,  $R_3$ , источника тока  $j_1$  и источника напряжения  $e_3$ , а также нелинейной катушки индуктивности  $L_2$ , нелинейного резистора  $G_1$ , источника управляемого напряжения  $e_2$ , сетевой карты *NIC*, реализуемой с помощью операционных усилителей, и переключателя  $f(u_1)$ . Явным преимуществом данной модели является её способность демонстрировать разнообразные динамические режимы, включая автоколебательную, пачечную и хаотическую динамику, что делает её более приближенной к биологическим системам. Однако главным ограничением является высокая чувствительность элементов цепи при переключении, что препятствует плавному переходу между режимами генерации. В качестве возможного решения данной проблемы выступает внедрение более современных и компактных компонентов, например мемристоров [65-68].

Еще одним из фундаментальных упрощенных вариантов нейрона XX является модель, предложенная Моррисом и Лекаром в 1981 году [30]. Эта модель основывается на широко известной модели в нейронауке  $I_{Ca} + I_K$ , которая состоит из мгновенного активационного  $Ca^{2+}$  тока, относительно медленного активационного  $K^+$  тока и тока утечки. Динамика предложенной системы описывается уравнениями со следующими выражениями [69]:

$$\begin{cases} C \frac{dV}{dt} = I_{stim} - \overbrace{g_{Ca}m_{\infty}(V - V_{Ca})}^{\text{Мгновенный } I_{Ca}} - \overbrace{g_{K}n(V - V_{K})}^{\text{Медленный } I_{K}} - \overbrace{g_{L}(V - V_{L})}^{\text{Ток утечки } I_{L}}, \\ \frac{dn}{dt} = \varphi \frac{n_{\infty}(V) - n}{\tau_{n}(V)}, \end{cases}$$
(10)

где V – трансмембранный потенциал, n – переменная активации калиевого канала, C – емкость мембраны,  $I_{stim}$  – внешний ток. Параметры  $g_{Ca}$ ,  $g_K$  описывают максимальные проводимости через ионные каналы, а  $g_L$  – проводимость тока утечки.  $V_{Ca}$ ,  $V_K$ ,  $V_L$  – потенциалы реверсии для соответствующих ионных каналов.  $\varphi$  – масштабирующая константа.

Переменные  $m_{\infty}(V)$ ,  $n_{\infty}(V)$  и  $\tau_n(V)$  задаются следующими выражениями:

$$m_{\infty}(V) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \text{th}\left(\frac{V+1}{15}\right) \right],$$
 (11)

$$n_{\infty}(V) = \frac{1}{2} \left[ 1 + th\left(\frac{V+1}{30}\right) \right],$$
(12)

$$\tau_n(V) = \frac{5}{\cosh\left(\frac{V}{60}\right)},\tag{13}$$

 $I_{stim}$  представляет собой постоянное токовое воздействие, которое постоянно поддерживает деполяризацию клетки. Когда достигается критическое значение  $I_{stim}$ , это приводит к переходу от одиночных импульсов к периодической генерации спайков нейрона (рисунок 5 A-B).



Рисунок 5 – Примеры траектории движения уравнения (10) при различном значении *I<sub>stim</sub>*. Красная и зеленая замкнутые кривые на фазовых портретах (Б) и (В) обозначают стабильные и нестабильные предельные циклы соответственно [70].

Уравнения МЛ представляет из себя полноценный инструмент для моделирования динамики быстро реагирующих нейронов, таких как пирамидные нейроны неокортекса [71].

Как и в предыдущих случаях данная модель имеет немало электронных аналогов [72-76]. Пример такой схемы изображен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Электронная схема, имитирующая модель нейрона Морриса–Лекара. Ионные токи разделены красными пунктирными линиями. Ионные токи  $I_{Ca}$ ,  $I_K$  и  $I_L$  суммируются и подаются в интегратор таким образом, что на выходе получается трансмембранное напряжение V нейрона. Функции n(V) и  $m_{\infty}(V)$  реализуются с помощью диодов 1N4148 и операционных усилителей UA741 [72].

Интерпретация модели нейрона МЛ в электронных схемах включает в себя множество нелинейных элементов, что усложняет процесс реализации изза высокой чувствительности этих элементов к температурным и внешним воздействиям. Решением данных проблем, как и в модели XX, на данный момент является использование специализированных программных средств для симуляции на примере SPICE [77-79].

Несмотря на все эти недочеты, предложенная модель нейрона МЛ является одной из немногих, которая наиболее качественно описывает транспорт кальциевой и калиевой проводимости в мембране нейрона.

#### Синаптические соединения нейронов

Синаптическая пластичность – одно из фундаментальных свойств живых нейронных систем, отвечающих за основные когнитивные функции мозга, такие как обучение и память. Сигналы между нейронами передаются через специализированные структуры, известные как синапсы, формируя синаптические связи [80]. Прочность синаптической связи определяется сложными химическими молекулярными преобразованиями, которые происходят как в пресинаптическом (передающем) нейроне, так и в постсинаптическом (принимающем) нейроне. В частности, долговременные изменения силы связи локализуются в основном в постсинаптическом нейроне. При передаче импульса постсинаптическая мембрана, подобно основной возбудимости нейронов, открывает свои ионные каналы, и ионы, в частности  $Na^+$  и  $K^+$ , пересекают мембрану, генерируя постсинаптические потенциалы. Синапс передает серию импульсов, каждый последующий из которых может вызывать реакцию напряжения переменной амплитуды [81]. Если каждый следующий импульс генерирует более сильную реакцию с увеличивающейся амплитудой, то происходит синаптическое потенцирование [82]. Таким образом, синаптическая связь усиливается. В противном случае происходит синаптическая депрессия. Тип синаптической пластичности определяется типом нейрона, а также динамическими характеристиками передаваемых сигналов, например частотой возникновения спайков и/или относительной фазой возникновения спайков [83].

Механизм синаптической пластичности был впервые рассмотрен и исследован в начале 20-го века. Одним из первых исследователей в данной области был Карл Лашли, проводивший свои эксперименты в 1920-х годах. Он установил, что изменения в нейронной активности осуществляются на уровне синапсов — областей контакта между нейронами. Эти изменения, как он предположил, играют ключевую роль в процессах обучения и памяти.

Современное представление о синаптической пластичности И молекулярных механизмах, лежащих в её основе, значительно продвинулось благодаря исследованиям, проведённым в последующие десятилетия. Одной из ключевых концепций, оказавших значительное влияние на изучение этих процессов, стала «теория Хэбба», сформулированная Дональдом Хэббом в 1949 году. Согласно данной теории, изменения в синаптической связи зависят от корреляции активности нейронов: синаптические связи укрепляются, когда два нейрона активируются синхронно, и ослабляются, если их активации происходят асинхронно [84]. Синаптическая пластичность подразделяется на два основных типа в зависимости от продолжительности возникающих эффектов кратковременную И долговременную. Долговременная \_\_\_\_ синаптическая пластичность, в свою очередь, представлена двумя ключевыми формами: долговременной потенциацией (long-term potentiation, LTP) и долговременной депрессией (long-term depression, LTD). Долговременная потенциация характеризуется усилением функциональной связи между нейронами, возникающим в ответ на повторяющуюся активацию, что способствует укреплению передачи сигналов в соответствующих нейронных сетях. Напротив, долговременная депрессия представляет собой процесс, связанный со снижением силы взаимодействия между нейронами на фоне их продолжительной активации, что может быть связано с механизмами адаптации.

Частным случаем кратковременной синаптической пластичности принято считать механизм STDP (Spike Timing-Dependent Plasticity) [85,86]. Механизм STDP — это форма синаптической пластичности в нейронных сетях, которая зависит от времени возникновения импульсов (спайков) в двух связанных нейронах. Данный механизм способствует формированию и укреплению связей между нейронами, основываясь на точном времени возникновения спайков. В частности, если спайк передающего нейрона возникает до спайка принимающего нейрона, что приводит к его возбуждению, то синаптическая сила между ними усиливается. Напротив, если спайк

принимающего нейрона предшествует спайку передающего и приводит к его возбуждению, синаптическая сила ослабевает [87-91].



Рисунок 7 – Кривая пластичности, зависящей от времени возникновения импульса, путем изменения весового коэффициента в зависимости от разницы во времени Δt между пре- (A) и постсинаптическими «В» спайками. Показан дополнительный нейрон (X), который может стимулировать нейрон (B) без какой-либо корреляции со стимуляцией нейроном (A) [90].

На основе вышеуказанных свойств синаптического соединения и характеристик синаптической связи между нейронами в настоящее время исследуются различные типы связей, включая как однонаправленные, так и двунаправленные. Эти связи учитывают механизмы кратковременной и долговременной пластичности, используя двухполюсные электронные компоненты, такие как резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы [92-94]. Особый интерес вызывают исследования, связанные с возможным применением мемристивных элементов в качестве синаптических соединений.

# Теоретические основы мемристивных элементов

Согласно математической соразмерности, в электротехнике выделяют четыре класса электрических характеристик: ток (*i*), напряжение (*u*), заряд (*q*) и поток ( $\varphi$ ). Данные характеристики могут быть взаимосвязаны шестью способами.



Рисунок 8 – Физическое соотношение между четырьмя классами электрических характеристик.

Например, для резистивного устройства R устанавливается связь между током i и напряжением u (нижняя часть), для катушки индуктивности L между током i и магнитным потоком  $\varphi$  (диагональная часть слева), а для конденсатора C – между напряжением u и зарядом q (диагональная часть справа). Однако вплоть до 1971 года не было явного математического и физического соответствия между зарядом q и магнитным потоком  $\varphi$  (верхняя часть). В это время профессор Леон Чуа предложил новый элемент – мемристор M [95], который мог бы заменить этот пропущенное соответствие в теории электрических цепей. На практике мемристор можно рассматривать как нелинейный резистор с эффектом памяти [96], что объясняет его название

«memristor», сочетающее в себе «memory» (память) и «resistor» (резистор). Это устройство способно обратимо изменять и сохранять свое сопротивление под действием протекающего через электрического Первая него заряда. твердотельная физическая модель мемристивного устройства, основанная на эффекте резистивного переключения (РП), была представлена Американской компанией Hewlett-Packard (HP) в 2008 году [97]. Мемристивные устройства сохраняют полученную информацию в виде сопротивления, эволюция которого определяется перестройкой атомной структуры В тонких изолирующих (диэлектрических) слоях толщиной порядка нанометра под воздействием электрического поля / тока. Структура мемристивного устройства, основанного на неорганических материалах, представляет собой тонкий (обычно менее 100 нм) слой диэлектрика (оксида), заключённый между слоями хорошо проводящего материала. Центральной функциональной частью устройства (рисунок 9А) является проводящий канал (филамент). В зависимости от приложенного к металлическим выводам напряжения происходит либо формирование, либо разрушение филамента.

На поведение мемристивного устройства влияет довольно много параметров, в частности, материалы, из которых оно изготовлено, а также методы их синтеза. На данный момент наиболее популярными методами синтеза являются магнетронное распыление [98] и атомно-слоевое осаждение [99], а также импульсное лазерное осаждение [100].

Функционирование мемристивных устройств основано на биполярном переключении анионного типа (Valence-Change Memory – VCM) из состояния с высоким сопротивлением (CBC, high-resistance state – HRS) в состояние с низким сопротивлением (CHC, low-resistance state – LRS) и обратно при приложении напряжения определённой величины и полярности. Процесс перехода из CBC в CHC называется SET, а обратный процесс – RESET. Отличительной особенностью BAX устройства является зажатая петля гистерезиса (рисунок 9Б).



Рисунок 9 – Функционирование мемристивных устройств. (А) Центральная часть неорганического мемристивного устройства; (Б) Типичная ВАХ неорганического металлоксидного мемристивного устройства.  $V_F$  – напряжение электроформовки.  $V_{SET}$ ,  $V_{RESET}$  – напряжения переключения.  $V_R$  – напряжение считывания.

Эффект РП анионного типа, проявляемый в структурах «металл-оксидметалл» (MOM), делает их наиболее совместимыми с традиционным КМОПпроцессом. Такие структуры МОМ лежат в основе элементов памяти ReRAM или RRAM (Resistive Random-Access Memory), а также логических устройств на их основе [101, 102], поскольку заданное резистивное состояние сохраняется при отключении питания в течение долгого времени. ReRAM привлекает огромный интерес как универсальная энергонезависимая память благодаря своему быстродействию, энергопотреблению, количеству циклов перезаписи, времени хранения записанного состояния, величине, характеризующей разницу между состоянием «0» и состоянием «1», диапазону рабочих температур и величине, характеризующей вероятность возникновения ошибок при чтении и/или записи, а также радиационная стойкость [103].

Особенно привлекательной является возможность достижения высокой плотности и трехмерной интеграции массивов ReRAM за счет простой двухполюсной структуры мемристора и локальности эффекта РП в областях порядка нанометра. Кроме того, простая структура мемристора обеспечивает создание сверхплотных и в перспективе трехмерных массивов в

топологии «кросс-бар» матриц [104], которые естественным образом реализуют операции векторно-матричного умножения (ВМУ), лежащие в основе инференса в традиционных искусственных нейронных сетях с глубоким обучением и новых алгоритмов обучения нейронных сетей. Важно отметить, что богатая динамика мемристивных устройств может быть использована для точной имитации многих биологических процессов и функций, которые имеют решающее значение для обучения и памяти, в том числе на интерфейсе с живыми нейронными системами [105].

# Мемристивные устройства и переход к нейроморфным системам

Благодаря систематическим улучшениям в технологиях создания мемристивных устройств и повышению их стабильности, стало возможным устройства В нейромофрных информационноиспользовать данные вычислительных системах. Одним из наиболее перспективных направлений применения нейроморфных систем на основе мемристоров является создание биореалистичных моделей нейронов и нейронных сетей, таких как импульсные (спайковые) сети [106]. Спайковые нейронные сети (Spiking Neural Network, SNN) — это особый тип искусственных нейронных сетей, которые моделируют работу нейрона мозга. Отличие от традиционных глубоких нейронных сетей является то, что информация передается в SNN спайками в виде электрических импульсов.

Другим примером такого использования можно считать рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Network, RNN). Рекуррентные нейронные сети — это класс искусственных нейронных сетей, которые обладают способностью обрабатывать последовательные данные и учитывать информацию из предыдущих состояний. В отличие от спайковых нейронных сетей, RNN могут использовать свою внутреннюю память, которая позволяет им сохранять предыдущее состояние и последовательность во времени [107].

Тем не менее следует подчеркнуть, что как SNN, так и RNN обладают

значительным количеством настраиваемых параметров (весов), которые оптимизируются в процессе обучения. Использование мемристивных архитектур, включая многоуровневые кросс-бар матрицы [108], как описывалось ранее, ускоряют ВМУ, что дает значительные преимущества в энергопотреблении, быстродействии и других важных показателей. Поэтому реализация искусственных нейронных сетей на основе мемристивных устройств является перспективным способом решения вышеуказанных проблем. В нейронных сетях с высокой точностью обучения требуется линейная зависимость изменения веса мемристора от импульса приложенного напряжения. Кроме того, характеристики мемристоров могут варьироваться как от устройства к устройству, так и от цикла к циклу.

Очевидно, что для разработки биореалистичных моделей необходимо взаимодействия между нейронами, которые учитывать могут быть смоделированы с помощью электронных компонентов, способных воспроизводить основные характеристики биологических синапсов. Эти характеристики включают передачу сигналов и адаптивные изменения (пластичность) связей, составляющие основу когнитивных функций [109]. В этом контексте мемристивное устройство представляет собой наиболее подходящий элемент, который может быть интегрирован в электронные осциллирующие системы для передачи и обработки сигналов, функционируя в качестве синаптического элемента.

Такая интеграция открывает широкие возможности ДЛЯ нелинейных проектирования генераторов С различными сложными динамическими режимами, включая хаотические аттракторы, мультистабильность, [110-114]. сложные инвариантные множества Возможность сложной нелинейной динамики И уникальные (биомиметические) электрофизические свойства с энергетической эффективностью сделали мемристоры наиболее перспективными кандидатами для построения биологически правдоподобных моделей нейронов и нейроморфных вычислений [115-117]. В частности, мемристоры

использовались для имитации динамики ионных каналов мембраны нейрона, управляемых напряжением. Реализация довольно простых калиевых каналов обсуждалась в [118-120]. Более сложная модель нейрона XX, использующая как натриевые, так и калиевые каналы, была реализована в [121-123]. Спустя [124] несколько лет была предложена электронная интерпретация редуцированного импульсного нейрона, которая включала два нелинейных элемента: мемристивное и резистивное. Впоследствии такая схема была реализована в интегральном исполнении [125]. Применение мемристивных устройств в сочетании с принципами работы мозга открывает широкие возможности для разработки новых информационно-вычислительных систем [126].

B нелинейность определенной степени мемристивная подобна динамике потенциал-зависимых ионных каналов электровозбудимых мембран [127, 128]. Очевидно, однако, что прямое сравнение мемристоров с нейронами вряд ли возможно вследствие того, что электрический ток в мемристорах опосредован электронно-дырочной проводимостью, а в живых нейронах – исключительно ионами различным типов. Тем не менее, динамические механизмы, приводящие к генерации сигнала в нейронах и в мемристорах, во многом схожи между собой. Мемристоры также успешно используются для эмуляции синаптической пластичности, которая воспроизводит кривую обучения STDP [129]. Эта пластичность динамически регулирует локальный параметр состояния, такой как проводимость, на основе относительного времени появления спайков. В простом случае проводимость мемристивного «синапса» может быть увеличена или уменьшена в зависимости от степени перекрытия между пре- и постсинаптическими импульсами напряжения. Также существуют решения, которые не требуют перекрытия спайков во времени, а вместо этого используют многоуровневую внутреннюю динамику мемристивных устройств (наличие двух или более параметров состояния с динамикой в разных временных масштабах) [130].

# Заключение по обзору литературы

В данной главе, на момент написания диссертационной работы, представлен подробный обзор научных публикаций. Обзор иллюстрирует растущий интерес научного сообщества к разработке радиофизических моделей и аппаратных архитектур, описывающих динамическое поведение нейронов и нейронных сетей с использованием мемристивных устройств.

Несмотря на достигнутый прогресс, выявлены ряд значительных пробелов в текущих знаниях, требующих дальнейшего изучения. Особенно касается вопросов синхронизации, стабильности ЭТО И адаптации мемристивных устройств в контексте нейроморфных систем. Решение указанных проблем обеспечит высокую степень параллелизма и оптимизацию энергопотребления, лелает подобные особенно что исследования актуальными для реализации аналоговых вычислений и моделирования процессов, происходящих в биологических нейронных системах. Успешные разработки в этом направлении могут значительно продвинуть отечественные и международные исследования в области современной радиофизики.

# 1. Радиофизическое исследование модели модифицированного генератора ФитцХью–Нагумо на основе мемристивной нелинейности

диссертационной работы посвящена разработке Первая глава математической модели И электронной схемы модифицированного нейроноподобного ФХН с нелинейностью генератора на основе неорганического металл-оксидного мемристивного устройства Au/Zr/ZrO<sub>2</sub>(Y)/TiN/Ti/grass. Изучен механизм возникновения автоколебаний через бифуркацию Андронова-Хопфа. Проанализирована зависимость расположения точки бифуркации от параметров системы, в частности от площади электродного контакта. Экспериментально получена возбудимая нейроноподобная динамика и квазигармонические автоколебания.

Основные результаты данной главы отображены в публикациях [4, 17]: 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. – Р. 1268 (журнал К1, Q1); 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.

#### 1.1. Численное исследование

В качестве базовой модели рассматривается электронная схема нейроноподобного генератора ФХН [36], в которой кубическая нелинейность, основанная на встречно-параллельном подключении диодов, была заменена мемристивной, экспериментально полученной в результате исследования неорганического металл-оксидного мемристивного устройства Au/Zr/ZrO<sub>2</sub>(Y)/TiN/Ti/grass.

Структурная электронная схема модифицированного нейроноподобного генератора ФХН, как показано на рисунке 10, может быть разделена на две части следующим образом: первая часть (1) задает мемристивную нелинейность, содержащую само устройство *M* и линейный

нагрузочный резистор  $R_n$ . Здесь U и  $I_m$  — это напряжение и ток, протекающие по схеме соответственно. Вторая часть (2) содержит в себе параллельное подключение линейных резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ , катушек индуктивности  $L_1$ ,  $L_2$ , источников питания  $E_1$ ,  $E_2$ , а также емкости C. Пропускание тока в определенном направлении определяет коммутационный кремниевый диод D. Входное напряжение  $V_{ini}$  подается в схему с помощью аналогового переключателя и может управляться с помощью периодического внешнего сигнала  $V_{syn}$ .



Рисунок 10 — Структурная электронная схема модифицированного нейроноподобного генератора ФХН на основе неорганического металл-оксидного мемристивного устройства. Схема была модифицирована из [36] путем замены кубической нелинейности на мемристивную.

Для вывода математической модели используется рисунок 10. Запишем уравнения Кирхгофа для тока (I) и напряжения (V), которые позволят описать
и изучить динамику данных переменных. В результате получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} C \cdot \frac{dV}{d\tau} = I_m - I_1 - I_2, \\ I_1 \cdot \frac{dI_1}{d\tau} = U - I_1 R_1 - E_1, \end{cases}$$
(14a)

Используя кусочно-линейное уравнение ВАХ диода D:

$$\begin{cases} I_2 = 0, & \Pi p \mu U < E_2 + V_d, \\ L_2 \cdot \frac{dI_2}{d\tau} = U - I_2 R_2 - E_2 + V_d, \end{cases}$$
(146)

Задавая условия  $\frac{R_1}{L_1} = \frac{R_2}{L_2}$ ,  $E_2 = -V_d$  и перейдя к системе уравнений в безразмерной форме, получаем:

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = f(u) - v + W_{ex}, \\ \frac{dv}{dt} = \varepsilon(g(u) - v - \eta), \end{cases}$$
(15)

здесь быстрая переменная и 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). Wex представляет собой внешнее воздействие с заданной скважностью Q и амплитудой  $A_{ex}$ . g(u) – кусочно-линейная функция, определяемая полярностью напряжения трансмембранного потенциала.  $g(u) = \alpha u$  если u < 0 и  $g(u) = \beta u$  если  $u \ge 0$ , где  $\alpha$ ,  $\beta$  – константы, определяющие динамику переменной восстановления. є бифуркационный параметр, управляющий уровнем деполяризации, следовательно, определяет динамическую модель нейрона,  $\eta$  является временной константой.  $f(u) = \gamma \cdot I_m(u) \cdot d$  – мемристивная нелинейность, которая определяется произведением силы тока мемристора на его активную нагрузку d.  $\gamma$  – нормировочный коэффициент, контролирующий возбудимость

моделируемого нейрона, также является параметром нормализации. Параметр  $\gamma$  определяется из метода наименьших квадратов аппроксимации ВАХ и имеет размерность В<sup>-1</sup>. Сам ток состоит из произведения плотности тока на площадь электродных контактов ( $S_{el}$ ) мемристора ( $l_m(u) = j_m(u) \cdot S_{el}$ ).

Модель устройства основана на обобщенном определении мемристора как динамической системы [95], учитывая экспериментально определенные параметры, а также механизмы переноса электронов и ионов внутри устройства при воздействии электрического поля / тока. Математические выражения записываются следующим образом:

 $j_{nonlin} = |u|B \exp(b\sqrt{|u|} - E_h),$ 

$$j_m = x j_{lin} + (1 - x) j_{nonlin},$$
  

$$j_{lin} = \frac{|u|}{\rho},$$
(16)

$$\frac{dx}{dt} = \begin{cases} A \exp(-E_m - \alpha_1 u) \left(1 - (2x - 1)^{2p}\right), u \ge V_{set} \\ 0, V_{reset} < u < V_{set} \\ -A \exp(-E_m + \alpha_1 u) \left(1 - (2x - 1)^{2p}\right), u \le V_{reset} \end{cases}$$
(17)

Данный подход предполагает введение внутренней переменной состояния  $x \in [0,1]$ , которая определяет долю площади изолятора, занятой проводящим каналом. При достижении граничного значения x = 1мемристивное устройство находится в состоянии низкого сопротивления (CHC). При x = 0 реализуется состояние высокого сопротивления (CBC). Изменение этого состояния связано с процессами миграции ионов кислорода (вакансий) и высотой эффективного миграционного барьера  $E_m$ . В свою очередь, миграция обеспечивается джоулевым нагревом и приложенным электрическим напряжением и. Ток, проходящий через мемристивное устройство  $j_m$ , может быть разделен на две составляющие: линейную  $j_{lin}$  и нелинейную *j<sub>nonlin</sub>*. Удельное сопротивление *р* материала мемристора обуславливает линейную составляющую плотности тока, тогда как передвижение зарядов через дефекты вызывает нелинейность плотности тока. Закон Пула-Френкеля учитывает эффективный барьер для переноса носителей заряда  $E_b$ . Этот закон определяется свойствами материала и может быть описан на основе ВАХ для СВС. Уравнения (16) и (17) содержат параметры *B*, *b*,  $\alpha_1$ , которые определяются из данных эксперимента, в частности, из аппроксимации ВАХ для соответствующего устройства.  $V_{set}$  и  $V_{reset}$  являются экспериментально определяемыми пороговыми напряжениями для механизма РП.



Рисунок 11 – Мемристивная нелинейность и кусочно-линейная функция.

Мемристивные устройства имеют ограниченный диапазон изменения своего внутреннего состояния, которое соответствует изменению Этот диапазон может быть сопротивления. ограничен физическими параметрами материала, из которого он изготовлен, или конструктивными особенностями устройства. Для учета данных ограничений внутреннее состояние устройства умножается на функцию, которая ограничивает её в определенном интервале. Если значение внутреннего состояния находится вне этого интервала, то данная функция возвращает верхнее или нижнее значение ограничений. Существует множество функций, которые могут использоваться для решения поставленной задачи, но в данной модели выбрана функция Ю. Н. Джоглекара и С. Дж. Вольфа, которая была предложена в [131]:

$$f(x,p) = 1 - (2x - 1)^{2p},$$
(18)

где p – управляющий параметр функции, удовлетворяющий граничным условиям f(0) = f(1) = 0, для всех положительных значений p.



Рисунок 12 — Оконная функция Ю. Н. Джоглекара и С. Дж. Вольфа при различных значениях управляющего параметра *p* [131].

Таким образом, динамика математической модели модифицированного нейроноподобного генератора ФХН с мемристивной нелинейностью будет описываться следующей системой дифференциальных уравнений (19):

$$\frac{du}{dt} = \gamma \cdot \left( x \frac{|u|}{\rho} + (1-x)|u|Bexp\left(b\sqrt{|u|} - E_b\right) \right) \cdot d \cdot S_{el} - \nu,$$

$$\frac{d\nu}{dt} = \varepsilon(g(u) - \nu - \eta), \qquad (19)$$

$$\frac{dx}{dt} = \begin{cases} Aexp(-E_m - \alpha_1 u) \cdot (1 - (2x - 1)^{2p}), u \ge Vset \\ 0, Vreset < u < Vset \\ -Aexp(-E_m + \alpha_1 u) \cdot (1 - (2x - 1)^{2p}), u \le Vreset \end{cases}$$

где первое уравнение системы было получено следующим образом:

Значение линейной *j*<sub>lin</sub> и нелинейной *j*<sub>nonlin</sub> составляющих плотности тока из (16) подставляется в общую формулу плотности тока *j<sub>m</sub>* мемристивного устройства.

2. Общая плотность тока  $j_m$  подставляется в формулу для определения силы тока мемристивного устройства  $I_m(u)$ .

3. Результирующая сила тока умножается на параметры  $\gamma$  и d, получается нелинейная функция f(u), которая затем подставляется в дифференциальное уравнение (19).

Параметр  $\varepsilon$  выбирается в качестве управляющего. Полученная трехмерная система дифференциальных уравнений (19) интегрировалась численным методом решения задачи Коши Рунге-Кутты 4-го порядка (RK4). Процедура интегрирования была выполнена с фиксированным шагом h = 0,02 и ошибкой *err* =  $10^{-10}$  в пакете прикладных программ для решения задач технического расчета MATLAB версии R2020b.

### 1.1.1. Результаты численного исследования

Для изучения динамического механизма возникновения автоколебаний была получена однопараметрическая бифуркационная диаграмма, иллюстрирующая изменение амплитуды колебаний от управляющего параметра. После достаточно длительного переходного процесса 50000 мс траектория (19) сходится к стационарному режиму, который может соответствовать либо состоянию равновесия, либо устойчивому предельному циклу, либо более сложному типу аттрактора, который теоретически может существовать в динамической системе 3-го порядка (19).

Далее была рассчитана двухпараметрическая бифуркационная диаграмма, отображающая зависимость критического значения управляющего параметра, соответствующего точке бифуркации, от площади электродного контакта в мемристивном устройстве. Численное исследование трехмерной динамической системы (19) выявило существование возбудимых и колебательных динамических режимов. В возбудимом режиме модель, подобно живым нейронам, имеет устойчивое состояние равновесия типа узел или фокус. При относительно небольших возмущениях траектории релаксируют в окрестности этого состояния, не приводя к импульсу возбуждения. Однако при достаточно большом возмущении, превышающем некоторый порог, в модели возникает импульс возбуждения достаточно большой амплитуды и формы, схожей с импульсами возбуждения в реальных нейронах (рисунок 13).



Рисунок 13 – Отклик математической модели модифицированного нейроноподобного генератора ФХН с мемристивной нелинейностью на ток возмущения, взятый при разной амплитуде и длительности импульсов, добавленный аддитивно в первое уравнение системы (19). Нижняя панель показывает форму импульса тока: (A) амплитуда – 4.42 B, длительность – 11 мс; (Б) амплитуда – 0.4 B, длительность – 8 мс. Значения параметров:  $\eta = 0.18$ ,  $\varepsilon = 0.74$ .

Определим состояния равновесия системы (19) в автономном режиме  $(W_{ex} = 0)$ . Для этого приравняем производные по каждой переменной к нулю:

$$\frac{du}{dt} = 0,$$

$$\frac{dv}{dt} = 0,$$

$$\frac{dx}{dt} = 0,$$
(20)

Тогда выражения в правой части будут преобразовываться следующим образом:

$$\gamma \cdot \left( x \frac{|u|}{\rho} + (1-x)|u|Bexp\left(b\sqrt{|u|} - E_b\right) \right) \cdot d \cdot S_{el} - \nu = 0$$

$$\varepsilon(g(u) - \nu - \eta) = 0, \qquad (21)$$

$$\pm Aexp(-E_m \pm \alpha_1 u) \cdot (1 - (2x - 1)^{2p}) = 0,$$

Исследуя систему (21) при условии u > 0, получаем, что в системе (19) имеется три состояния равновесия, которые обозначим через  $O_0(u^{(0)}, v^{(0)}, x^{(0)}), O_1(u^{(1)}, v^{(1)}, x^{(1)}), O_2(u^{(2)}, v^{(2)}, x^{(2)}).$ 

Проведем анализ устойчивости данного множества состояний равновесия. Разобьем исходную систему уравнений на функции:

$$F(u, v, x) = \gamma \cdot \left( x \frac{|u|}{\rho} + (1 - x)|u|Bexp(b\sqrt{|u|} - E_b) \right) \cdot d \cdot S_{el} - \nu,$$

$$G(u, v, x) = \varepsilon(g(u) - \nu - \eta), \qquad (22)$$

$$P(u, v, x) = \begin{cases} Aexp(-E_m + \alpha_1 u) \cdot (1 - (2x - 1)^{2p}), & u \ge Vset \\ 0, & Vreset < u < Vset \\ -Aexp(-E_m - \alpha_1 u) \cdot (1 - (2x - 1)^{2p}), & u \le Vreset \end{cases}$$

Далее находим частные производные от каждой функции  $\left(\frac{\partial F}{\partial u}, \frac{\partial F}{\partial v}, \frac{\partial F}{\partial x}\right);$  $\left(\frac{\partial G}{\partial u}, \frac{\partial G}{\partial v}, \frac{\partial G}{\partial x}\right); \left(\frac{\partial P}{\partial u}, \frac{\partial P}{\partial v}, \frac{\partial P}{\partial x}\right)$  и раскладываем определитель системы (21) с последующей подстановкой состояний равновесия  $O_0(u^{(0)}, v^{(0)}, x^{(0)}),$  $O_1(u^{(1)}, v^{(1)}, x^{(1)}), O_2(u^{(2)}, v^{(2)}, x^{(2)}).$ 

$$\Delta(\lambda) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial u} - \lambda & \frac{\partial F}{\partial v} & \frac{\partial F}{\partial x} \\ \frac{\partial G}{\partial u} & \frac{\partial G}{\partial v} - \lambda & \frac{\partial G}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial u} & \frac{\partial P}{\partial v} & \frac{\partial P}{\partial x} - \lambda \end{bmatrix} = 0, \qquad (23)$$
$$\Delta(\lambda) = \left(\frac{\partial F}{\partial u} - \lambda\right) \cdot \begin{vmatrix} \frac{\partial G}{\partial v} - \lambda & \frac{\partial G}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial v} & \frac{\partial P}{\partial v} - \lambda \end{vmatrix} - \frac{\partial F}{\partial v} \cdot \begin{vmatrix} \frac{\partial G}{\partial u} & \frac{\partial G}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial u} & \frac{\partial P}{\partial x} - \lambda \end{vmatrix} + \frac{\partial F}{\partial x} \cdot \begin{vmatrix} \frac{\partial G}{\partial u} & \frac{\partial G}{\partial v} - \lambda \\ \frac{\partial P}{\partial u} & \frac{\partial P}{\partial v} - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (24)$$

Раскрыв вложенные определители:

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial G}{\partial \nu} - \lambda & \frac{\partial G}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial \nu} & \frac{\partial P}{\partial x} - \lambda \end{vmatrix} = \left( \frac{\partial G}{\partial \nu} - \lambda \right) \cdot \left( \frac{\partial P}{\partial x} - \lambda \right) - \frac{\partial P}{\partial \nu} \cdot \frac{\partial G}{\partial x} , \qquad (25)$$

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial G}{\partial u} & \frac{\partial G}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial u} & \frac{\partial P}{\partial x} - \lambda \end{vmatrix} = \frac{\partial G}{\partial u} \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial x} - \lambda\right) - \frac{\partial P}{\partial u} \cdot \frac{\partial G}{\partial x} , \qquad (26)$$

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial G}{\partial u} & \frac{\partial G}{\partial v} - \lambda \\ \frac{\partial P}{\partial u} & \frac{\partial P}{\partial v} \end{vmatrix} = \frac{\partial G}{\partial u} \cdot \frac{\partial P}{\partial v} - \frac{\partial P}{\partial u} \cdot \left(\frac{\partial G}{\partial v} - \lambda\right), \qquad (27)$$

Объединение уравнений системы (23)–(27) приводит к характеристическому уравнению третьей степени.

$$a\lambda^3 + b\lambda^2 + c\lambda + d = 0, (28)$$

где *a, b, c, d* – параметры, полученные в результате подстановки каждого состояния равновесия в уравнение (23). Значения этих параметров влияют на

дискриминант и расположение корней на комплексной плоскости, что, в свою очередь, определяет тип состояния равновесия *0* [132].

Анализ дискриминанта (D > 0) и знаков корней характеристического уравнения  $(Re\lambda_{1,2} < 0, \lambda_3 > 0)$  в точке  $O_0$  позволяет сделать вывод, что данное состояние равновесия представляет собой седло-фокус (рисунок 14А). При указанных условиях двумерное многообразие  $E^s = \{x = 0, (u, v) \in R^2\}$ является устойчивым, а одномерное многообразие  $E^u = \{u = v = 0, x \in R\}$  неустойчивым.

Проведя аналогичные расчеты  $(D < 0, \lambda_{1,2} < 0, \lambda_3 > 0)$  для точки  $O_1$ , можно заключить, что это состояние равновесия является седлом (рисунок 14Б), а плоскость  $E^s = \{x = 0, (u, v) \in R^2\}$  – устойчивым,  $E^u = \{u = v = 0, x \in R\}$  – неустойчивым многообразием этого седла.

Подстановка точки  $O_2$  в уравнение (23) определяет (D > 0,  $Re\lambda_{1,2} < 0$ ,  $\lambda_3 < 0$ ), что состояние равновесия является асимптотически устойчивым и классифицируется как устойчивый фокус (рисунок 14В). При таких условиях состояние равновесия имеет одномерное и двумерное устойчивые многообразия.



Рисунок 14 – Состояния равновесия системы (19) [132]. (А) Седло-фокус с двумерным устойчивым и одномерным неустойчивым многообразиями; (Б) Седло с двумерным устойчивым и одномерным неустойчивым многообразиями; (В) устойчивый фокус с одномерным и двумерным устойчивыми многообразиями.

Далее был проведен анализ динамики системы в окрестности устойчивого состояния равновесия  $O_2$  при изменении управляющего параметра  $\varepsilon$ . Амплитудные характеристики, отражающие затухающие колебания системы, а также траектории в проекции фазового пространства на плоскости амплитуд в 2D и 3D, представлены на рисунке 15 и свидетельствуют о наличии асимптотически устойчивого фокуса ( $\varepsilon = 0.004 - 0.58$ ).



Рисунок 15 – Затухающие колебания. (А) временная серия для переменной u; (Б) временная серия для переменной v; (В) плоскость амплитуд в 2D пространстве; (Г) плоскость амплитуд в 3D пространстве. Параметры системы  $\eta = 0.18$ ,  $\varepsilon = 0.17$ .

Численные параметры затухающих колебаний, полученные в ходе решения модели (19), были рассчитаны и отображены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры модели (в системе СИ), полученные при исследовании затухающих колебаний для переменных *и* и *v*, где  $\Delta$  декремент затухания,  $\lambda$  логарифмический декремент затухания, T - период (секунда), а *V* - частота (Гц). Также в ходе исследования были определены значения добротности Q, циклической  $\omega_0$  и собственной частоты  $\omega$  (секунда<sup>-1</sup>).

Параметр	Переменная и	Переменная v
Δ	2.0204	3.0111
λ	0.7113	0.9916
Т	0.0162	0.0165
V	62.985	62.681
Q	3.8521	2.4145
β	51	69
$\omega_0$	405	402
ω	401	406

С уменьшением управляющего параметра  $\varepsilon$  действительная часть собственных значений уменьшается, что сопровождается, в частности, увеличением длительности затухающих колебаний при релаксации к состоянию равновесия. При дальнейшем уменьшении управляющего параметра состояние равновесия теряет свою устойчивость, и в модели возникает устойчивый предельный цикл, соответствующий периодическим квазигармоническим колебаниям ( $\varepsilon = 0.0039 - 0.0008$ , рисунок 16).



Рисунок 16 – Переход системы в режим периодической генерации. (А) временная серия для переменной u; (Б) временная серия для переменной v; (В) плоскость амплитуд в 2D пространстве; (Г) плоскость амплитуд в 3D пространстве. Параметры системы  $\eta = 0.18$ ,  $\varepsilon = 0.0024$ .

Таблица 2 – Параметры модели (в системе СИ), полученные в ходе исследования периодических колебаний, где A - амплитуда напряжения (В), T - период колебаний (секунда), частота  $V(\Gamma_{II})$  и собственная частота  $\omega$  (секунда<sup>-1</sup>).

Параметр	Переменная и	Переменная v	
A	1.921	0.591	
Т	0.229	0.227	
V	4.366	4.405	
ω	27.42	27.65	

Такой характер изменения динамики нелинейной системы соответствует суперкритической бифуркации Андронова-Хопфа с отрицательной первой Ляпуновской величиной и мягкому рождению автоколебаний в модифицированном нейроноподобном генераторе ФХН.

Для численного подтверждения бифуркационного сценария мягкого рождения автоколебаний была рассчитана однопараметрическая бифуркационная диаграмма для фиксированной площади электродного

48

контакта 50×50 мкм<sup>2</sup> мемристивного устройства. Чтобы обнаружить возможные жесткие режимы генерации или другие аттракторы, численные расчеты проводились для трех различных наборов начальных условий [ $u_0$ , $v_0$ ,  $x_0$ ] со следующими значениями:  $a_1 = [0.04, 0.14, 0.022]$ ,  $a_2 = [-0.08, 0.004, 0.012]$ ,  $a_3 = [0.18, 0.09, 0.03]$ . Время переходного процесса варьировалось в интервале 150 мс < t < 50000 мс с фиксированным шагом интегрирования h = 0,02. Для устранения возможного переходного процесса первые  $10^2$  мс шагов итерации системы (19) были отброшены. Построение бифуркационной диаграммы осуществлялось с применением пошагового алгоритма: при переходе к новому значению параметра бифуркации начальные условия задавались на основе последней точки решения, полученной для предыдущего значения параметра. Амплитуда автоколебаний определялась как разность между максимальными (пиковыми) значениями цикла в пределах одного периода.

На рисунке 17 отображена однопараметрическая бифуркационная диаграмма, демонстрирующая характер изменения временной динамики от бифуркационного параметра *ε*. В процессе эксперимента было выявлено критическое значение параметра *ε*, соответствующий не нулевой амплитуды колебаний.



Рисунок 17 – Однопараметрическая бифуркационная диаграмма для площади электродного контакта 50х50 мкм<sup>2</sup>. Стрелкой показан увеличенный промежуток зависимости. Черная, красная и зеленая зависимости определяются начальными условиями a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> и a<sub>3</sub> соответственно.

В точке бифуркации состояние равновесия теряет свою устойчивость, и слева от нее рождается устойчивый предельный цикл. Близость к точке бифуркации соответствует состоянию равновесия типа сложный фокус, плотность обмотки которого стремится к бесконечности, и переходные процессы длятся дольше по мере приближения к точке бифуркации. Другими словами, траектории при различных начальных условиях при фиксированном времени счета приводят к различным значениям амплитуды, показанным на рисунке 17. Следовательно, численное моделирование демонстрирует, что суперкритическая бифуркация Андронова-Хопфа имеет место быть в трехмерной системе уравнений (19).

Далее было проведено исследование, показывающее смещение критического значения бифуркационного параметра  $\varepsilon$  в зависимости от площади электродного контакта мемристивного устройства. При изготовлении неорганических металл-оксидных мемристивных устройств используются следующие значения площадей: 5x5, 10x10, 20x20, 50x50 мкм<sup>2</sup> и так далее. Рисунок 18 иллюстрирует однопараметрическую бифуркационную диаграмму для наименьшей площади электродного контакта из приведенного списка. Бифуркационные кривые имеют схожую форму с предыдущим случаем. Однако критическое значение управляющего параметра  $\varepsilon$ , при котором происходит рождение устойчивого предельного цикла, увеличивается.



Рисунок 18 – Однопараметрическая бифуркационная диаграмма при площади электродного контакта 5х5 мкм<sup>2</sup>. Черная, красная и зеленая зависимости определяются начальными условиями a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> и a<sub>3</sub> соответственно.

Изменения значения управляющего параметра *є* в зависимости от площади электродного контакта мемристивного устройства представлено на двухпараметрической бифуркационной диаграмме (рисунок 19). На плоскости (є, S) области возбудимой динамики, отмеченной синим цветом, и области колебательной динамики, выделенной красным цветом, разделяет нелинейная кривая.



Рисунок 19 – Двухпараметрическая бифуркационная диаграмма, отображающая границы динамических режимов изучаемой системы. Синий цвет обозначает область возбудимого режима, а красный – область колебательного.

# 1.2. Экспериментальная часть

#### 1.2.1. Материалы и методы

В рассматриваемой электронной схеме модифицированного нейроноподобного генератора ФХН (рисунок 10) нелинейный элемент представлен неорганическим металл-оксидным мемристивным устройством

 $Au/Zr/ZrO_2(Y)/TiN/Ti/grass$ , окисленной изготовленным на кремниевой подложке методом магнетронного распыления<sup>1</sup>. Подробный технологический процесс изготовления данного вида мемристоров можно найти в публикациях [98, 114, 133]. Структурное исследование проводилось методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) поперечного сечения высокого разрешения (XTEM) с использованием электронного микроскопа Jeol JEM-2100F (производство Япония), работающего при ускоряющем напряжении 200 кВ. Данные исследования проводились в специализированной лаборатории для проведения ПЭМ анализа НОЦ ФТНС ННГУ под руководством д.ф.-м.н., профессора Павлова Д.А. и аспиранта ФПиО ФзФ ННГУ Воронцова В.А. Специальная топология была разработана для изготовления массива мемристивных микроустройств (20 × 20 мкм<sup>2</sup>) в архитектуре «кросс-бар» (всего 44 устройства) на кремниевой пластине и смонтированном в стандартном 64-контактном металлокерамическом корпусе. Электрические измерения проводились научно-исследовательской В лаборатории стохастических мультистабильных систем (StoLab) НИФТИ ННГУ под руководством к.ф.-м.н., заведующего лабораторией Михайлова А.Н. и к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника Белова А.И. Циклические ВАХ неорганических металл-оксидных мемристивных устройств были получены при температуре T=300 К с использованием анализатора параметров полупроводниковых приборов B1500A Agilent MFCMU компании Keysight, разрешением 0,1 фА и скоростью сканирования 7.7 В/с. Соединения с контактными площадками устройства осуществлялись при помощи зондовой станции Everbeing EB-6 компании Everbeing Int'l Corp. Массивы кросс-бар, содержащие множество неорганических металл-оксидных мемристивных устройств, необходимы для проведения последующих исследований сложных динамических эффектов в ансамблях нелинейных осцилляторов.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Здесь, как и в последующих главах, описание и изготовление мемристивных устройств представлены с целью обеспечить понимание их использования в экспериментах, а также продемонстрировать внутреннюю стохастическую природу самих устройств.

Послойное изображение ПЭМ для поперечного сечения устройства на основе Au/Zr/ZrO<sub>2</sub>(Y)/TiN/Ti/grass отображено на рисунке 20.



Рисунок 20 – ПЭМ-изображение неорганического металл-оксидного мемристивного устройства на основе Au/Zr/ZrO<sub>2</sub>(Y)/TiN/Ti/grass в поперечном сечении. Толщина слоя ZrO<sub>2</sub>(Y) составляет 40 нм, толщина верхнего электрода Au составляет 40 нм, а толщина нижнего (базового) электрода TiN/Ti составляет 40 нм. Выбор TiN в качестве базового электрода обуславливается низкой шероховатостью и высокой однородностью соединения.

После проведения процесса электроформовки, необходимого для формирования ярко выраженного мемристивного эффекта, неорганическое

металл-оксидное мемристивное устройство демонстрирует биполярное РП. Окно сопротивления между СВС и СНС характеризуется соотношением порядка  $10^4$ , что свидетельствует о высокой контрастности переключения. Значения напряжения при переключении экспериментального устройства  $V_{set} = 4$  В и  $V_{reset} = -3.8$  В.



Рисунок 21 – Экспериментальная ВАХ неорганического металл-оксидного мемристивного устройства Au/Zr/ZrO<sub>2</sub>(Y)/TiN/Ti/grass. Стрелками показана развертка по напряжению. Ограничение по току взято в 1 мА.

# 1.2.2. Радиофизический эксперимент

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

(рисунок 22А, Б). Дальнейшая обработка осуществлялась на персональном компьютере с помощью программного обеспечения OriginPro 2019b.

система функционирует следующим образом: Данная сигнал, сформированный аналоговым электронным генератором ФХН, проходя через неорганическое металл-оксидное мемристивное устройство, инициирует процесс РП, что, в свою очередь, приводит к генерации нейроноподобного сигнала. Аналоговый электронный генератор ФХН состоит из четырех основных блоков. Входной блок схемы состоит из источника питания, представляющего из себя щелочную батарейку размером ААА, имеющую исходное напряжение  $V_{\text{battery}} = 1.5$  вольта, переменного резистора  $R_1 \in$ [0,150] k $\Omega$ , который используется для переключения динамических режимов, также источника внешнего воздействия V<sub>external</sub>. Далее сигнал, a распространяясь по схеме, поступает на связующий RL генератор на операционном усилителе MC1458L 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/ZrO<sub>2</sub>(Y)/TiN/Ti/grass и нагрузочный резистор сопротивлением  $R_6 = 4.3 \text{ k}\Omega$  (рисунок 22В). Выходной блок включает в себя конденсатор C<sub>out</sub>, который создает перепад напряжения, и регулируемый переменный резистор  $R_8 \in [0,10] k\Omega$ , способный изменять амплитуду и длительность колебаний на выходе. С выходной точки генератора (out) сигнал поступает на цифровой осциллограф в виде осциллограммы.



Рисунок 22 – (А) структурная блок-схема эксперимента для получения временных осциллограмм; (Б) устройство для определения ВАХ Agilent B1500A и мемристивный чип в топологии кросс-бар; (В) принципиальная электрическая схема генератора ФХН на мемристивной нелинейности. Нелинейность основе задается помощью с неорганического мемристивного устройства металл-оксидного на основе Au/Zr/ZrO<sub>2</sub>(Y)/TiN/Ti/grass.

После проверки работоспособности генератора путем калибровки неорганическое металл-оксидное мемристивное устройство было подключено к блоку нелинейности. В ходе эксперимента была выявлена способность данного генератора воспроизводить возбудимый и автоколебательный режимы колебаний. Возбудимый режим наблюдался при значении переменного резистора  $R_1$  в диапазоне [0, 43] k $\Omega$ , а автоколебательный – при  $R_1$  в пределах [44, 150] k $\Omega$ .



Рисунок 23 – Временные осциллограммы автоколебательных (черная линия,  $R_1 = 95 \text{ k}\Omega$ ) и возбудимых (красная линия,  $R_1 = 22 \text{ k}\Omega$ ) режимов генератора при различных значениях сопротивления резистора  $R_8$ : (A)  $R_8 = 7.8 \text{ k}\Omega$ ; (Б)  $R_8 = 3.5 \text{ k}\Omega$ ; (В) Пример экспериментального фазового портрета системы, снятого с выхода  $C_{out}$ , где по оси абсцисс отображено напряжение, а по оси ординат — ток.

Процесс РП в неорганическом металл-оксидном мемристивном устройстве с оксидной пленкой ZrO<sub>2</sub> обусловлен изменением локальной области проводимости (частичным окислением и восстановлением проводящего канала) из-за реорганизации структуры диэлектрика под воздействием напряжений различной полярности. Кроме того, увеличивается диффузия ионов кислорода в оксидной пленке ZrO<sub>2</sub>, что приводит к накоплению зарядов различной концентрации. Это уменьшает потенциальный барьер для миграции ионов в соответствии с эффектом Пула–Френкеля [134].

осциллограммы И BAX, полученные Временные В процессе эксперимента, подтверждают механизм РП неорганического металл-оксидного мемристивного устройства, предсказанного математической моделью. Более того, математическая модель демонстрирует близкую динамику, К наблюдаемой, экспериментально даже если учитывать использование мемристора 1-го порядка и характерную стохастичность.

### 1.3. Заключение по первой главе

В первой главе диссертационной работы представлена математическая электронная схема модифицированного нейроноподобного модель И генератора ФХН с нелинейностью на основе неорганического металлоксидного мемристивного устройства Au/Zr/ZrO<sub>2</sub>(Y)/TiN/Ti/grass. Модель с такой нелинейностью описывается трехмерной системой дифференциальных уравнений. Исследован эффект возникновения автоколебаний, основанный на суперкритической бифуркации Андронова-Хопфа. Проанализирована зависимость критической точки от параметров системы, в частности от электродного мемристивного устройства. площади контакта Экспериментально получены автоколебательный и возбудимый режим колебаний.

Кроме того, следует отметить, что генератор ФХН, использованный в его оригинальном исполнении с кубическим полиномом, демонстрирует вычисления с помощью спайков в режимах как интегрирующего, так и интегро-резонансного отклика. В этом плане можно надеяться, что предлагаемая модель модифицированного генератора с мемристивной нелинейностью также будет воспроизводить динамику сложно-порогового отклика, что будет несомненным преимуществом при проектировании нейроморфных систем, основанных на импульсных сигналах.

59

# 1.4. По результатам данной главы на защиту выносится следующее положение:

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

# 2. Радиофизическое исследование динамики односвязных мемристивных нейроноподобных генераторов посредствам резистивного и мемристивного устройства

Вторая глава диссертационной работы посвящена радиофизическому исследованию динамики односвязных мемристивных нейроноподобных генераторов ФХН с помощью резистивного и мемристивного устройства. Проведено исследование адаптивного поведения неорганического металлоксидного мемристивного устройства Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si при воздействии на него нейроноподобного сигнала различной амплитуды и частоты. Получена экспериментальная зависимость среднего относительного изменения сопротивления мемристивного устройства. Численно И получены экспериментально различные режимы вынужденной синхронизации, включая 1:1, 2:1, 3:1, М:1, а также фазовые траектории системы.

Основные результаты данной главы представлены в публикациях [5, 18]: Кипелкин И.М. Синхронизация мемристивных нейронных генераторов / И.М. Кипелкин [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №.4. – С.5; 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.

#### 2.1. Численное исследование

Для создания математической модели, описывающей однонаправленную связь между двумя мемристивными нейроноподобными генераторами ФХН через резистивное и мемристивное устройство, была использована следующая система дифференциальных уравнений (29):

$$\frac{du_1}{dt} = f(u_1) - v_1,$$
$$\frac{dv_1}{dt} = \varepsilon_1(g(u_1) - v_1 - \eta_1,$$
$$\frac{du_2}{dt} = f(u_2) - v_2 + \left(Ru_1 \left| F \overbrace{j(u_1)}^{u_{m_1}} S_{el} d_1 \right)\right)$$
$$\frac{dv_2}{dt} = \varepsilon_2(g(u_2) - v_2 - \eta_2),$$

где  $u_1, u_2$  – напряжение, создаваемое пресинапсическим и постсинапсическим генератором ФХН соответственно.  $u_{m_1}$  – напряжение, проходящее через мемристивное устройство.  $d_1$  – сопротивление нагрузки первого мемристивного устройства,  $j(u_1)$  – функция, описывающая зависимость плотности тока мемристивного устройства от напряжения. R, F – коэффициент связи для резистивного и мемристивного устройства соответственно. Для мемристивного устройства коэффициент был определён экспериментально как среднее относительное изменение сопротивления. А для резистивного он является подгоночным, поскольку резистор берется с определенным и неизменным значением сопротивления. Вертикальной чертой отмечен выбор между резистивным и мемристивным подключением.

В рамках численного исследования системы (29) были созданы динамические модели мемристоров, основанные на экспериментальных данных. Эти модели учитывают ключевые электрические характеристики, такие как биполярное переключение и характерный гистерезис, что позволяет точнее предсказать работу мемристоров в реальных условиях. На рисунке 24 представлены ВАХ неорганических металл-оксидных мемристивных устройств, полученные в результате численного моделирования. Характеристики получены при воздействии напряжения прямоугольной формы разной полярности в пределах от –2 V до +4 V в течение 1500 мс.



Рисунок 24 – ВАХ неорганических металл-оксидных мемристивных устройств, полученные в результате численного моделирования. (А) мемристивное устройство Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass. В рамке содержится зависимость тока, проходящего через мемристивное устройство от напряжения; (Б) мемристивное устройство Au/Ru/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass. Снизу показана форма сигнала, подаваемая на устройство; (В) мемристивное устройство Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si.

Получим и зафиксируем следующие параметры для соответствующих устройств. Данные представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Фиксированные параметры системы и неорганических металл-оксидных мемристивных устройств, применяемые для решения дифференциальных уравнений (29), полученные экспериментально

Устр - во	Au/Ta/ZrO <sub>2</sub> (Y)/Pt/Ti	Au/Ru/ZrO <sub>2</sub> (Y)/Pt/Ti	Au/Zr/SiO <sub>2</sub> /TiN/Ti
Параметр			
γ	0.821	0.582	1.138
ρ	$2.8 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$	$2.1 \cdot 10^{-6}$
В	$5.3 \cdot 10^{21}$	$2 \cdot 10^{21}$	$2.5 \cdot 10^{21}$
b	1.3	0.2	3.2
α <sub>1</sub>	0.29	0.27	0.31
A		109	
E <sub>b</sub>	42.04	39.3	38.6
$E_m$	36.7	27.9	34.8
р	20		
S <sub>el</sub>	10 <sup>-12</sup>	$5 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-12}$
d	1000	4300	
V <sub>Set</sub>	1.1	3	1.5
$V_{Reset}$	-0.75	-2	-2.5

### 2.1.1. Результаты численного исследования

Рассмотрим вынужденную синхронизацию двух нейроноподобных мемристивных генераторов ФХН, анализируя уравнения (29) с варьированием параметров  $\varepsilon_2$ , *F*, *R* при мемристивном и резистивном подключении.



Рисунок 25 – Результаты численного моделирования синхронизации двух мемристивных нейроноподобных генераторов ФХН через мемристивное устройство при фиксированных значениях  $\varepsilon_1 = 0.00126$  и  $\eta_1 = 0.5$ . (А) режим синхронизации 1:1 и соответствующий ему фазовый портрет. Параметры:  $\varepsilon_2 = 0.00915$  и F = 0.2; (Б) режим синхронизации 2:1 и соответствующий ему фазовый портрет. Параметры:  $\varepsilon_2 = 0.00687$  и F = 0.4; (В) режим синхронизации 3:1 и соответствующий ему фазовый портрет. Параметры:  $\varepsilon_2 = 0.00253$  и F = 0.61.

Заметим, что при небольшом уменьшении параметра  $\varepsilon_2$  системы, а также увеличении коэффициента *F* происходит смена режимов синхронизации и трансформация фазового портрета системы. Оптимальное значение *F* для синхронизации 1:1 соответствует *F* = [0.10 – 0.29]. При значениях *F* = [0.36 – 0.50] наблюдается синхронизация 2:1, а при *F* = [0.58 – 0.70] имеем 3:1.

Приведем аналогичные вычисления для резистивного подключения.



Рисунок 26 – Результаты численного моделирования синхронизации двух мемристивных нейроноподобных генераторов ФХН через резистивное устройство при фиксированных значениях  $\varepsilon_1 = 0.00126$  и  $\eta_1 = 0.5$ . (А) режим синхронизации 1:1 и соответствующий ему фазовый портрет. Параметры:  $\varepsilon_2 = 0.00775$  и R = 0.003; (Б) режим синхронизации 2:1 и соответствующий ему фазовый портрет. Параметры:  $\varepsilon_2 = 0.00421$  и R = 0.018; (В) режим синхронизации 3:1 и соответствующий ему фазовый портрет. Параметры:  $\varepsilon_2 = 0.00148$  и R = 0.03.

При данном подключении наблюдается аналогичная тенденция параметров и характеристик, однако коэффициент связи при резистивном подключении примерно на два порядка меньше, чем при мемристивном. Оптимальное значение коэффициента связи для синхронизации 1:1 соответствует R = [0.002 - 0.012]. При значениях R = [0.015 - 0.023] наблюдается синхронизация 2:1, а при R = [0.028 - 0.034] имеем 3:1.

Для наглядной демонстрации данного явления представим зависимость отношения установившихся частот от коэффициента связи при соответствующем подключении.



Рисунок 27 – Зависимость отношений установившихся частот двух нейроноподобных мемристивных генераторов ФХН от коэффициента связи при (А) мемристивном подключении; (Б) резистивном подключении.  $\omega_1$  – установившейся частота пресинаптического генератора,  $\omega_2$  – установившейся частота постсинаптического генератора. Точками отмечены области неоднозначных колебаний.

Результаты численного моделирования демонстрируют, что мемристивное подключение демонстрирует более длительное поддержание вынужденной синхронизации по сравнению с резистивным режимов подключением. Это обеспечивает более эффективное распределение энергии в системе, а также способствует увеличению временного интервала устойчивого функционирования вынужденной синхронизации при различных соотношениях частот.

## 2.2. Экспериментальная часть

### 2.2.1. Методы и материалы

В данном исследовании для экспериментального изучения и выявления различных режимов вынужденной синхронизации были использованы три неорганических металл-оксидных мемристивных устройства биполярного типа переключения, имеющих различные составы оксидных пленок и верхних Для создания неорганических металл-оксидных электродных контактов. мемристивных устройств на стеклянной подложке использовалась вакуумная система для осаждения тонких пленок Torr International® 2G1-1G2-EB4-TH1, а также стандартное оборудование для фотолитографии. Пленки ZrO<sub>2</sub>(Y) и SiO<sub>2</sub> были нанесены методом высокочастотного магнетронного распыления мишени, спрессованной из смеси порошков  $ZrO_2$  (  $\approx 88\%$  мол.) и  $Y_2O_3$  (  $\approx 12\%$ мол.) для структур Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass, Au/Ru/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass и SiO<sub>2</sub> для структуры Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si/glass при температуре подложки 300°С. Максимальная температура при выполнении операций фотолитографии не превышала 120 °C. Слои металлических электродов были нанесены методом магнетронного распыления на постоянном токе при 200°С.



Рисунок 28 – ВАХ неорганических металл-оксидных мемристивных устройств, используемые в эксперименте на основе: (A) Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass; (Б) Au/Ru/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass; (В) Схематическое поперечное сечение Au(20 нм)/Ta(40 нм) или Ru(40 нм)/ZrO<sub>2</sub>(Y)(20 нм)/Pt(40 нм)/Ti(20 нм)/grass мемристивных устройств; (Г) Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si/glass.

Наблюдаемое в эксперименте изменение проводимости обусловлено стохастической природой микроскопических процессов окисления и восстановления проводящего канала внутри устройств. Эти процессы вызваны структурными изменениями диэлектрика воздействием напряжения различной полярности, а также сочетанием различных внутренних транспортных явлений [135]. При этом свойства и механизмы данных процессов существенно зависят от типа используемого металлического контакта, поскольку различные металлы характеризуются различным сродством к кислороду. Это, в свою очередь, приводит к вариациям в протекании окислительно-восстановительных реакций и формировании оксидных дефектов.

Разработанная осциллирующая система состояла ИЗ двух мемристивных нейронопободных генераторов ФХН (рисунок 22B), неивертирующего усилителя амплитуды с переменным коэффициентом усиления  $k \in [1; 10]$ , резистора сопротивлением 10 к $\Omega$ , неорганического металл-оксидного мемристивного устройства Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si и нагрузочного резистора сопротивлением 4.3 кΩ. Путем варьирования сопротивления переменного резистора R<sub>c</sub> было произведено изменение амплитуды одного из устройств для достижения вынужденной синхронизации между двумя нейронопободными генераторами (рисунок 29).



Рисунок 29 – Взаимодействие между пресинаптическим мемристивным генератором  $\Phi$ XH и постсинаптическим мемристивным генератором  $\Phi$ XH через резистивное и мемристивное устройство. R<sub>c</sub> – потенциометр, характеризующий силу связи. В пресинапсическом генераторе  $\Phi$ XH в качестве нелинейного элемента использовалось устройство Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass. В постсинапсическом – Au/Ru/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass. Резистивное устройство использовалось со значением 10 к $\Omega$ . Мемристивное устройство – Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si.

В процессе эксперимента было проведено исследование влияния нейроноподобного сигнала различной амплитуды и частоты на процесс РП мемристивного устройства. Для этого соединили устройство с генератором сигнала по схеме, которая показана на рисунке 29, через точки 1 и 2. Сигнал от генератора подавался на верхний электродный контакт (Au) мемристивного 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.

На рисунке 30 показаны осциллограммы нейроноподобных сигналов (потенциалов действия), создаваемых пресинаптическим генератором при изменении сопротивления переменного резистора  $R_8$ . Каждый из этих сигналов затем был подан на неорганическое металл-оксидное мемристивное устройство Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si в течение 10 секунд с шагом увеличения амплитуды  $\Delta A = 0.5$  B.



Рисунок 30 – Осциллограммы нейроноподобных сигналов, создаваемых пресинаптическим генератором. (А) При значении переменного резистора  $R_8 = 7.7 \text{ к}\Omega$ ; (Б) При значении переменного резистора  $R_8 = 3.1 \text{ k}\Omega$ ; (В) При значении переменного резистора  $R_8 = 1 \text{ k}\Omega$ .

# 2.2.2. Исследование адаптивного поведения неорганического металлоксидного мемристивного устройства

В рамках исследования было обнаружено, что значение амплитуды выходного сигнала нейроноподобного генератора ФХН влияет на способность мемристора как переключаться из СВС в СНС, так и переходить в состояние более высокого сопротивления. Адаптивное поведение устройства определяется изменением его сопротивления, которое, в свою очередь, зависит от параметров электрического воздействия (рисунок 31).



Рисунок 31 – Зависимость изменения сопротивления мемристивного устройства Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si от амплитуды нейроноподобного сигнала генератора ФХН. Каждая фигура задает определенную амплитуду напряжения. Стрелками указаны скачки значений сопротивления мемристора.

Из рисунка 31 следует, 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 высоко-проводящее состояние. Это обусловлено необходимостью достижения

определенного порогового значения напряжения, достаточного для инициирования РП устройства. Аналогичный эффект наблюдается, когда амплитуда нейроноподобного сигнала превышает 6 В, при этом мемристор переходит в состояние экстремального сопротивления и больше не реагирует на каждый всплеск. Таким образом, если напряжение слишком мало (менее 1.5 В) или слишком велико (более 6 В), то атомная структура проводящего канала в устройстве не изменяется, и оно не переключается в проводящее состояние.

При варьировании амплитуды нейроноподобного сигнала от 2 до 6 В происходит скачкообразный переход из CBC (~220 к $\Omega$ ) в CHC (~25 к $\Omega$ ). Важно отметить, что значения сопротивления при начальном и конечном состояниях устройства могут сильно различаться от цикла к циклу из-за свойственной ему стохастической природы процесса РП. Переключение в менее проводящее состояние мемристивного устройства с оксидной пленкой из SiO<sub>2</sub> можно охарактеризовать разрывом связей Si-O-Si под действием электрического поля, сопровождающегося образованием нейтральных кислородных вакансий. Миграция заряженных междоузельных ионов кислорода обеспечивает окисление и восстановление проводящего канала [136].

Для определения коэффициента связи *F* в математической модели и демонстрации стохастического поведения мемристивного устройства была построена зависимость среднего относительного изменения сопротивления (в безразмерных единицах) от амплитуды воздействия нейроноподобного сигнала. Для построения данной зависимости используется следующий алгоритм:

1. Для каждого значения сопротивления вычисляется модуль относительного изменения.

$$\Delta d_i = \left| \frac{d_k - d_0}{d_0} \right|,\tag{30}$$

где  $d_k$  — конечное значение сопротивления для каждой точки,  $d_0$  — начальное значение сопротивления для каждой точки. Для получения оптимального
результата бралось по 15 значений сопротивления при каждом значении амплитуды.

2. Суммируются полученные значения относительного сопротивления для каждой амплитуды.

$$\sum_{n=1}^{15} \Delta d_i = \Delta d_1 + \Delta d_2 + \dots + \Delta d_n , \qquad (31)$$

3. Разделяется полученная сумма на общее количество измерений *n* для получения среднего относительного изменения, и вводится величина *F*.

$$F = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{15} \Delta d_i \,, \tag{32}$$

4. Вычисляется среднеквадратическое отклонение сопротивления в каждой точке.

$$\sigma = \sqrt{\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{15} (\Delta d_i - F)^2\right]},$$
(33)



Рисунок 32 – Зависимость среднего относительного изменения сопротивления неорганического металл-оксидного мемристивного устройства Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si от амплитуды воздействия нейроноподобного сигнала. (А) Радиальная диаграмма. Каждой оси диаграммы соответствует амплитуда напряжения. Значения переменной *F* откладываются от центра наружу; (Б) диаграмма значений среднеквадратического отклонения.

Также в ходе дальнейшего исследования были получены кривые между средним отношением сопротивлений  $\frac{R_{CBC}}{R_{CHC}} = \theta$  в зависимости от частоты  $\nu$  при фиксированном значении амплитуды выходного напряжения (рисунок 33).



Рисунок 33 – Зависимость среднего отношения сопротивлений  $\theta$  от частоты  $\nu$  выходного сигнала. Для наглядности точки соединены плавной линией. В каждой точке было снято по пять значений. Синей линией указана средняя прямая аппроксимации и её коэффициент наклона.

Данная характеристика демонстрирует, что отношение сопротивлений при изменении частоты имеет тенденцию к плавному уменьшению (средняя прямая аппроксимации) [3, 95]. Возможная причина связана с внутренним перемещением ионов в мемристивном устройстве, что приводит к насыщению релаксационных процессов. На зависимости есть еще одна особенность, достойная внимания: при значении частоты, равной 9 Гц, наблюдается её максимум. Объяснение резкого изменения отношения сопротивлений может быть связано с резонансной активацией миграции ионов O<sup>2-</sup> по кислородным вакансиям в пленке SiO<sub>2</sub>.

Стоит подчеркнуть, что при сохранении постоянной амплитуды сигнала изменение его частоты не влияет на характер зависимости, описывающей реакцию системы на нейроноподобный сигнал. Устройство переходит из СВС в СНС состояние, что согласуется с приведенным выше экспериментом, а также с большими значениями напряжения РП при измерении ВАХ данного образца.

Результаты представленных выше экспериментов указывают на адаптивное поведение [44, 137] неорганического металл-оксидного мемристивного устройства Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si. Следовательно, его использование в соединении мемристивных нейроноподобных генераторов ФХН будет имитировать свойство синаптической пластичности.

## 2.2.3. Экспериментальное исследование вынужденной синхронизации при использовании резистивного устройства

После проведения электроформовки мемристивных устройств и калибровки генераторов было изучено их поведение при однонаправленном соединении с использованием резистивного и мемристивного устройства. Эксперимент проводился по схеме, изображенной на рисунке 29, где показания, считываемые осциллографом, снимались с точек 1 и 3. В данном случае один из генераторов ФХН изначально перевели в режим автоколебаний, а параметры второго подобраны таким образом, чтобы он не генерировал потенциалы действия при отсутствии внешнего воздействия, то есть находился в возбудимом режиме. При помощи переменного резистора R<sub>c</sub> проводилось управление амплитудой одного из устройств, чтобы достичь частотной синхронизации между двумя генераторами.



Рисунок 34 – Амплитудные характеристики взаимодействующих генераторов ФХН через резистивное устройство при синхронизации: (А) 1:1; (Б) 3:1, а также соответствующие экспериментальные фазовые портреты системы. Синий цвет – амплитуда постсинапсического генератора, оранжевый цвет – амплитуда пресинаптического генератора. Для наглядности графики были сдвинуты относительно друг друга.

Эксперименты показывают, что при изменении сопротивления R<sub>c</sub> в диапазоне от 1.2 до 4.7 кΩ колебания синхронизируются как 1:1 или 3:1. При более высоких значениях сопротивления наблюдаются асинхронные колебания. Такие изменения в динамике обусловлены снижением уровня взаимодействия между генераторами, что нарушает их способность к поддержке координированных фазовых и частотных соотношений.

76

### 2.2.4. Экспериментальное исследование вынужденной синхронизации

Α 2 2 Амплитуда, В Амплитуда 1, В 1 0 -1 0.3 0.4 0.5 Время, с 0 0.7 0.8 0.1 0.2 0.6 -2 3 -1 0 1 Амплитуда 2, В -3 -2 2 Б 2 2 Амплитуда 1, В Амплитуда, В 1 1 0 0 -1 <sup>3</sup> 0.4 0.5 Время, с -2 0 0.1 0.2 0.3 0.6 0.7 0.8 3 -1 0 1 Амплитуда 2, В -3 -2 2 В 2 2 Амплитуда, В Амплитуда 1, В 1 1 0 0 -1 0.8 0.3 0.4 Время, с 0 0.1 0.2 0.5 0.6 0.7 -2 3 -1 0 1 Амплитуда 2, В -3 -2 2 2 Г Амплитуда, В 1 0 0.8 0.3 0.4 0.5 Время, с 0 0.1 0.2 0.6 0.7

Рисунок 35 – Амплитудные характеристики взаимодействующих генераторов через мемристивное устройство при: (А) подпороговых колебаниях; синхронизации (Б) 1:1; (В) 2:1; (Г) М:1, где М = 5, а также соответствующие экспериментальные фазовые портреты системы. Красный цвет – амплитуда постсинапсического нейрона, синий цвет – амплитуда пресинаптического нейрона. Для наглядности графики были сдвинуты относительно друг друга.

#### при использовании мемристивного устройства

Мемристивное подключение, в отличие от резистивного, предоставляет более широкий спектр режимов. Изменяя сопротивление R<sub>c</sub> в диапазоне от 1.2 7.8 кΩ, наблюдать колебаний, до можно наличие подпороговых синхронизацию на основном тоне и гармониках. Это предоставляет реализовывать различные соотношения частот, такие как 1:1, 2:1, 3:1 и М:1, где М ∈ [4;7] – число колебаний, которые воспроизводит постсинаптический колебанию генератор единичному пресинаптического к генератора. Вынужденная синхронизация двух мемристивных генераторов ФХН, соединённых неорганическим металл-оксидным мемристивным устройством, устанавливалась следующим образом: при подаче определенного напряжения устройство Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si инициировался мемристивное на 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 мемристивного устройства (12-27)кΩ) сопротивления указывают на достижение различных режимов синхронизации мемристивных нейроноподобных генераторов.

#### 2.3. Заключение по второй главе

Bo второй диссертационной работы главе экспериментально адаптивные свойства неорганического металл-оксидного исследованы мемристивного устройства Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si, демонстрирующего характеристику стохастического РП под воздействием нейроноподобного обеспечивает адаптивную сигнала. что связь И синхронизацию нейроноподобных генераторов ΦXH. мемристивных Получена экспериментальная среднего относительного зависимость изменения сопротивления неорганического металл-оксидного мемристивного устройства. Найден интервал частотной синхронизации посредством

мемристивного устройства. Численно и экспериментально изучена динамика односвязных мемристивных нейроноподобных генераторов ФХН с помощью резистивного и мемристивного устройства. Получены различные режимы вынужденной синхронизации, включая 1:1, 2:1, 3:1, М:1, а также фазовые траектории системы.

# 2.4. По результатам данной главы на защиту выносится следующее положение:

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 М:1.

### 3. Радиофизическое исследование генератора на основе встречнопараллельного подключения мемристивных устройств

Третья глава диссертационной работы посвящена математической модели и электронной реализации нейронных ионных каналов на основе встречно-параллельного подключения двух неорганических металл-оксидных мемристивных устройств в систему ФитцХью–Нагумо. Получены основные режимы нейронной активности. Обнаружена спайк-бёрстовая активность системы. Смоделирован постсинаптический ответ неорганических металл-оксидных оксидных мемристивных устройств на импульсное воздействие.

Основные результаты данной главы представлены в публикации [6]: 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.

#### 3.1. Описание мемристивных устройств

Для имитации ионных каналов использовались два неорганических металл-оксидных мемристивных устройства биполярного типа переключения на основе Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/grass и Au/Ru/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/grass, имеющие различный состав верхних электродных контактов (рисунок 28А, Б).

Несмотря на схожее поведение сопротивления мемристивных устройств, существуют ряд различий в параметрах РП, которые тесно связаны различными материалами, используемыми для изготовления верхнего электрода, механизмами переключения и природой электронного переноса. Например, отличие заключаются в динамическом диапазоне сопротивления. В частности, сопротивление  $R_{CBC}$  мемристивных устройств на электроде из «Ru» и «Та» соответствует 10-12 kΩ. Значения сопротивления  $R_{CHC} \approx 700 \Omega$  для «Ta» и  $\approx 200 \Omega$  для «Ru». Из приведенных выше значений можно посчитать примерный диапазон динамического переключения  $R_{CBC}/R_{CHC}$  (Ta)~20 и  $R_{CBC}/R_{CHC}$  (Ru)~60 (рисунок 36). Мемристивные устройства, представленные в исследовании, имеют разброс значения сопротивления в различных резистивных состояниях. Этот разброс значений может варьироваться как от цикла к циклу, так и от устройства к устройству [98].



Рисунок 36 – Статистические характеристики для мемристивных устройств. (А) и (В) Зависимость сопротивления в СВС и СНС от количества циклов РП; (Б) и (Г) Распределение значений переключения V<sub>set</sub> и V<sub>reset</sub> для устройств Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/grass и Au/Ru/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/grass coorветственно.

Приведенные характеристики, изображенные на рисунке 36, полученные в лаборатории StoLab ННГУ старшим научным сотрудником Кругловым А.В. и лаборантом Серовым Д.А., демонстрируют, что данные устройства обладают ключевыми характеристиками для нейроморфных вычислений, обеспечивающими стабильный и постепенный механизм РП биполярного типа с хорошим окном сопротивления.

В дополнение к этому были проведены эксперименты по оценке выносливости (Endurance). Данные испытания проводились с применением программно-аппаратного комплекса National Instruments USB-6341.

81

Последовательно к мемристивному устройству подключались нагрузочное сопротивление (100 Ω) и ограничитель тока (300 мкА) на основе полевого транзистора с управляемым *p-n* переходом. На мемристор подавался сигнал, состоящий из чередующихся положительных и отрицательных переключающих импульсов (амплитудой 1.5–2.0 В) и импульсов чтений (0.25 В).

Структуры с «Та» электродом выдержали свыше 10<sup>6</sup> циклов РП в импульсном режиме и продемонстрировали 4 млн переключений без заметной деградации параметров (с сохранением видимого окна между состояниями) и отсутствием сбоев. На электроде с «Ru» таких характеристик не удалось получить из–за малого количества удачных переключений.

#### 3.2. Численное исследование

Динамика нейрона определялась с помощью модифицированной нейроноподобной модели ФХН (19) с внешним воздействием ( $W_{ex} \neq 0$ ) и добавления еще одного мемристивного устройства, подключенным встречно-параллельно. За счет использования такого подключения нелинейная функция выглядит следующим образом:

$$F_{1,2}(u) = \gamma_1 \cdot I_1 \cdot d_1 + \gamma_2 \cdot I_2 \cdot d_2, \tag{34}$$

здесь индексы l и 2 обозначают неорганические металл-оксидные мемристивные устройства на основе Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/grass и Au/Ru/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/grass соответственно.

Динамическая модель описываемой системы с учетом (15)–(19) и (34) выглядит следующим образом:

$$\dot{u} = (|u| \cdot \sum_{1,2} \gamma_{1,2} \cdot \{x_{1,2} \cdot \sigma_{1,2}^{-1} + (1 - x_{1,2}) \cdot B \cdot e^{b_{1,2}\sqrt{|u|} - E_{b_{1,2}}}\} \cdot S_{1,2} \cdot d_{1,2}) - \vartheta + W_{ex},$$

$$\dot{\vartheta} = \varepsilon \cdot [g(u) - \vartheta - \eta], \qquad (35)$$

$$\dot{x}_{1,2} = \begin{cases} A \cdot exp(-E_{m_{1,2}} - \delta_{1,2}u) \cdot (1 - (2x_{1,2} - 1)^{2p}), u \ge V_{set} \\ 0, V_{reset} < u < V_{set} \\ -A \cdot exp(-E_{m_{1,2}} + \delta_{1,2}u) \cdot (1 - (2x_{1,2} - 1)^{2p}), u \le V_{reset} \end{cases}$$

Результаты численного исследования модели (35) были реализованы с использованием встроенного в МАТLAВ решателя обыкновенных дифференциальных уравнений, основанного на алгоритмах RK4 со следующими фиксированными параметрами:

- ошибка интегрирования:  $\psi = 10^{-10}$ ;
- постоянный шаг: *s* = 0.02;
- начальное состояние системы: (-0.65, 0, 0.00001, 0.00001).

Для описания поведения нелинейной системы использовалась однопараметрическая бифуркационная диаграмма, отображающая значение бифуркационного параметра ( $A_{ex}$ ), взятого в прямом и обратном направлении, от проекции разности пиковых значений трансмембранного потенциала (u). Параметры для системы (35) и мемристивных устройств были взяты из таблицы 3.

#### 3.2.1. Результаты численного исследования

Первое, что было рассмотрено, – реакция электронного нейрона, смоделированного с помощью уравнений (35), на внешние прямоугольные импульсы различной амплитуды ( $A_{ex}$ ). Рисунок 37 иллюстрирует результаты численного моделирования. Увеличение амплитуды импульса выше определенного порога, показанного пунктирной линией на рисунке 37, приводило к генерации ответного импульса. Форма ответного импульса была качественно схожа с возбудимостью нейронов, обусловленной натриевыми и калиевыми трансмембранными токами.



Рисунок 37 – Результаты численного моделирования реакций мемристивного нейрона ФХН на внешнее импульсное воздействие. (А) Отклик трансмембранного потенциала на одиночное подпороговое, пороговое, сверхпороговое и продолжительное сверхпороговое внешнее воздействие. Пороговое значение трансмембранного потенциала составляет -30 мВ; (Б) Форма внешнего воздействия. Длительность воздействия составляет 11 мс. Параметры модели:  $\varepsilon = 0.009$ ,  $\eta = 0.1$ .

Начало потенциала действия представляет собой процесс лавинообразного открытия потенциал зависимых натриевых каналов, приводящий к резкой деполяризации мембраны. При продолжительном внешнем воздействии нейрон переходит в автоколебательный режим и иллюстрирует периодическую последовательность импульсов, качественно напоминающих регулярные колебания трансмембранного потенциала в реальных нейронах 3-его класса возбудимости [35].

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.

84

В дополнение к этому величиной амплитуды внешнего воздействия можно управлять системой, выбирая один из трех основных динамических режимов – возбудимый, бистабильный и колебательный (рисунок 38).



Рисунок 38 – Бифуркационная диаграмма, иллюстрирующая возбудимый, бистабильный и автоколебательный режим нейрона ФХН, снятая при прямом (синие точки) и обратном (красные точки) прохождении диапазона значений амплитуды внешнего воздействия. На диаграмме слева показан пример траектории на плоскости (*u*, *v*) для возбудимого режима, а справа – колебательного.

В соответствии с приведенной бифуркационной диаграммой на рисунке 38 в динамике мемристивного нейрона (35) возникает область бистабильности. Бистабильность в данном случае означает, что в зависимости от начальных условий системы  $(u_0, \vartheta_0, x_{1_0}, x_{2_0})$  нейрон может либо поддерживать либо генерировать периодическую потенциал покоя, импульсов (система имеет два сосуществующих последовательность аттрактора). При используемом наборе параметров область бистабильности реализуется в диапазоне 120 мкВ  $\leq A_{ex} \leq 200$  мкВ. Возбудимый режим, при

котором потенциал покоя устойчив, и при превышении порога генерируется один или несколько импульсов реализуется при  $A_{ex} < 120$  мкВ. При  $A_{ex} > 200$ мкВ нейрон теряет устойчивость и в системе возникает «жесткое» рождение автоколебаний. Следовательно, В фазовом пространстве существует единственный аттрактор – предельный цикл. В точке A<sub>ex</sub> = 120 мкВ наблюдается предельный (складка), двукратный цикл который при возрастании значения внешнего воздействия разделяется на два грубых – устойчивый и неустойчивый. В таком случае траектории, начинающиеся внутри неустойчивого предельного цикла, будут стремиться к состоянию равновесия, а траектории, начинающиеся вне этого цикла, будут наматываться на устойчивый предельный цикл. Второе значение параметра  $A_{ex} = 200$  мкВ соответствует субкритической бифуркации Андронова-Хопфа с положительной первой Ляпуновской величиной. Согласно классификации Ижикевича, представленная нейроноподобная модель может быть определена как бистабильный резонатор [138].

Установлено, что путем подбора параметров ( $\varepsilon \in [0.001; 0.006], \eta \in [0.06; 0.08]$  и  $d_1 \in [840; 985]$  при фиксированном  $d_2 = 4300$ ) модель качественно демонстрирует поведение, похожее на типичную для реальных нейронов спайк-бёрстовую (пачечную) активность с разным количеством импульсов в пачке, при продолжительном внешнем прямоугольном воздействии (рисунок 39).



Рисунок 39 – Результаты численного моделирования динамических режимов мемристивного нейрона (35) в случае регулярной пачечной активности (A) с тремя импульсами в пачке при  $\varepsilon = 0.0028$ ,  $\eta = 0.068$  и  $d_1 = 875$ ; (Б) с шестью импульсами в пачке при  $\varepsilon = 0.0049$ ,  $\eta = 0.074$  и  $d_1 = 927$ ; (В) Форма внешнего воздействия с амплитудой 100 мВ.

На рисунке 40 показаны все возможные сценарии пачечной активности, возникающие при изменении параметров системы.



Рисунок 40 – Трехмерное представление пачечной активности системы (26) в пространстве параметров. Каждая фигура задает свою продолжительность и размер пачки.

87

С дальнейшим ростом параметров системы наблюдается возрастание числа спайков в пачке, сопровождаемое сокращением межпачечного интервала. Данный процесс продолжается до тех пор, пока размер пачки не становится бесконечным, что соответствует переходу системы из режима генерации пачек в режим периодической генерации.

#### 3.3. Радиофизический эксперимент

Для исследования динамических режимов использовалась нелинейная схема на основе модифицированной модели ФХН (представленной в главе 1, на рисунке 22В) путем добавления еще одного мемристивного устройства, подключенного встречно-параллельно, в блок нелинейности. На базе AO1 усилителя реализован операционного суммирующий элемент, предназначенный для сложения постоянного напряжения V<sub>batterv</sub> с внешним V<sub>external</sub>, воздействием который подается от генератора произвольных импульсов KEYSIGHT 33600А. Сигнал, созданный генератором ФХН, был записан на конденсатор Cout, а затем считан с цифрового трехканального осциллографа «АЛЬФАТЕК С7-334». Анализ характеристик мемристивных устройств производился с помощью анализатора Agilent B1500a и выводился на ПК. Блок-схема эксперимента представлена на рисунке 41.



Рисунок 41 — Блок схема эксперимента с нейроноподобным генератором ФХН с добавлением еще одного мемристивного устройства, подключенного встречнопараллельно. Первый канал осциллографа считывал значение на конденсаторе  $C_{out}$ , а второй – сигнал, генерируемый внешним воздействием. Исходные значения нагрузочных резисторов  $R_6 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_7 = 4.3 \text{ k}\Omega$ .

После калибровки генератора и проверки его работы на вход было подано внешнее однополярное воздействие, зависящее от времени. Значения потенциометров  $R_1$  были изменены в диапазоне от 23 до 100 к $\Omega$ , тогда как значения  $R_8$  варьировались от 0 до 5 к $\Omega$ . Это позволило наблюдать различные нейроноподобные сигналы, вызываемые стандартными биологическими механизмами. Такие сигналы включали как одиночные, так и множественные активности с определённым числом спайков, как показано на рисунке 42.



Рисунок 42 – Сигналы спайковой активности, снятые с электронной схемы и генерируемые прямоугольными внешними импульсами заданной длительности и фиксированной амплитуды 120 милливольт. (А) Однократный спайковый отклик на короткий импульс продолжительностью 0,074 секунды; (Б) Два последовательных спайка в ответ на импульс продолжительностью 0,18 секунды; (В) Множественные спайковые активности в ответ на импульс продолжительностью 2 секунды; (Г) Деполяризация постоянного уровня приводит к периодической последовательности спайков.

Механизмы генерации спайковой активности в схеме ФХН на основе мемристоров (рисунок 42) могут быть качественно описаны аналогично процессам деполяризации, реполяризации и гиперполяризации, свойственно живым нейронам, следующим образом (рисунок 43). Проводящие каналы внутри мемристивных устройств возбуждаются одним и тем же напряжением (U) и могут проводить ток в противоположных направлениях. Если достаточно мало (U<120 мΒ), будет напряжение ток проходить преимущественно через один мемристор (M<sub>1</sub>), не вызывая колебаний. В данном случае резистивное состояние M<sub>1</sub> не изменяется, так как приложенное

напряжение оказывается недостаточно высоким для его переключения. В результате конденсатор (C<sub>out</sub>), получая такой ток, будет медленно заряжаться. Однако при достижении некоторого порогового напряжения ( $U \approx 120 \text{ MB}$ ) второй мемристор (M<sub>2</sub>) также начинает пропускать ток, который полностью идет на конденсатор, вызывая скачок напряжения (деполяризация). Важным моментом является то, что РП мемристора М<sub>2</sub> происходит значительно быстрее, что обусловлено его окислительно-восстановительными процессами. После полного перехода мемристора М<sub>2</sub> в СНС мемристор М<sub>1</sub> продолжает находиться в промежуточном состоянии, пропуская через себя значительный отрицательный ток. В результате этого конденсатор C<sub>out</sub>, подвергаясь воздействию отрицательного напряжение тока, снижает ДО нуля (реполяризация). Затем мемристоры переводятся обратно в СВС, где напряжение релаксирует до потенциала покоя (гиперполяризация). После этого цикл может повториться. Описанный выше процесс аналогичен скачку напряжения в биологических нейронах, вызванному последовательным открытием и закрытием ионных каналов  $Na^+$  и  $K^+$ .



Рисунок 43 – Механизм генерации спайков. Черная пунктирная линия обозначает состояние покоя, зеленый цвет указывает на деполяризацию, темно-красный цвет соответствует реполяризации, а синий цвет обозначает гиперполяризацию.

При увеличении значений потенциометров  $R_1$  и  $R_8$ , а также при замене нагрузочного сопротивления  $R_6$  на 700  $\Omega$  (при фиксированном  $R_7$ ) модель начинает генерировать эндогенные (автономные) пачечные активности прямоугольного (*square-wave*) типа в ответ на постоянное внешнее воздействие.



Рисунок 44 – Эндогенная генерация пачек спайков со значениями  $R_1 = 121 \text{ k}\Omega$ ,  $R_8 = 7.8 \text{ k}\Omega$ . Амплитуда внешнего воздействия равна 100 милливольт. Коэффициент заполнения k = 0.497. Для наглядности показаны сигналы двух периодов.

Первый спайк в пачке вызван внешним воздействием, в то время как последующие спайки формируются эндогенно благодаря внутренней стохастической природе неорганических металл-оксидных мемристивных устройств и продолжаются при постоянном воздействии. С математической точки зрения такую активность называют условной, так как повторяющиеся пачки возникают только при определенных значениях параметров системы. Стоит отметить, рассматриваемая модель является минимальной, потому что при исключении одного мемристивного устройства делает невозможной генерацию пачек спайков.

#### 3.4. Постсинаптический ответ мемристивных устройств

В представленной электронной схеме нейрона (рисунок 41) два неорганических металл-оксидных мемристивных устройства, имитирующих натриевый и калиевый ионные каналы, определили нелинейность и возбудимость. Затем была проведена проверка, может ли такая схема генерировать переменную реакцию, например синаптическую пластичность, на серию импульсных воздействий. На рисунке 45 показаны результаты моделирования реакции мемристивного устройства на серию импульсных воздействий. Импульсный сигнал подавался на два встречно-параллельных мемристора, имитирующие ионные каналы  $Na^+$  и  $K^+$ . При относительно низкой амплитуде внешних импульсов последующий ответный импульс имел равные амплитуды. Однако при увеличении амплитуды было обнаружено, что каждый последующий импульс имеет большую амплитуду, чем предыдущий. Другими словами, в системе проявляется эффект накопления заряда, который по своей сути аналогичен синаптическому потенцированию в нейронах. Мемристивные устройства имитируют функционирование постсинаптической части синаптической передачи. Чем больше амплитуда внешнего импульса, тем выше сила потенцирования.



Рисунок 45 — Иллюстрация эффекта синаптического потенцирования в неорганических металл-оксидных мемристивных устройствах. (A) Схема эксперимента с встречнопараллельным подключением мемристивных устройств Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass и Au/Ru/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/grass. Фрагмент всей схемы был взят из блока мемристивной нелинейности, представленного на рисунке 22В, 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 потенциированием мемристивных устройств при различных амплитудах внешнего напряжения. Синий цвет соответствует Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass, красный – Au/Ru/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/grass.

Стохастическая природа неорганических металл-оксидных устройств обуславливает мемристивных механизм синаптического потенцирования, который приводит к адаптивному увеличению связи между устройствами. Для качественного анализа был рассмотрен участок нелинейности в схеме ФХН (рисунок 22В) с учетом блок-схемы (рисунок 41). 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<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass и  $Au/Ru/ZrO_2(Y_2O_3)/Pt/Ti/glass$  соответственно. При подаче подпорогового

94

напряжения, около 0.2 В, проявление механизма синаптической потенциации не отмечается (рисунок 45В). Амплитуда тока для всех периодических импульсов напряжения демонстрирует относительно слабую активность и последующее затухание во времени, поскольку мемристивные устройства остаются в исходном состоянии статической проводимости. Однако по мере повышения амплитуды входного напряжения происходит монотонное мемристивных устройств, увеличение проводимости приводя К незначительным механизмам потенцирования и возрастание токовых откликов со временем (рисунок 45Г). При достаточном уровне входного напряжения, около 1.3 В, в мемристивных устройствах наблюдается устойчивая тенденция к возрастанию амплитуды тока (рисунок 45Д), связанная с усилением механизма синаптической потенциации.

работы было Следующим этапом выявление синаптического потенцирования во всей аналоговой схеме нейроноподобного генератора ФХН (рисунок 22B) с учетом блок-схемы (рисунок 41), основанной на  $Au/Ta/ZrO_2(Y_2O_3)/Pt/Ti/grass$  $Au/Ru/ZrO_2(Y_2O_3)/Pt/Ti/grass.$ При И моделировании соответствующей динамической системы было обнаружено, эффект быть синаптического что усиления может вызван последовательностью низкочастотных импульсов порядка 10 Гц (рисунок 46A).



Рисунок 46 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. Скачок соответствует переключению мемристивного устройства. (В) и (Г) Сравнительная характеристика механизма потенциирования при разных частотах. Желтый цвет соответствует устройству Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass, зеленый  $Au/Ru/ZrO_2(Y_2O_3)/Pt/Ti/glass.$ 

Для демонстрации описываемого механизма использовался временной масштаб, определяемый из функций состояния устройств (уравнение 17). В соответствии с рисунком 46Б 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 ступенчатоэкспоненциальный 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

96

воздействия, но с менее выраженным изменением проводимости устройств (см. рисунок 46B, Г).

#### 3.5. Заключение по третьей главе

В третьей главе диссертационной работы представлено исследование математической модели и электронной схемы нейрона, имитирующих нейронные ионные каналы. Модель реализована при помощи встречнопараллельного подключения неорганических двух металл-оксидных мемристивных устройств основе  $Au/Ta/ZrO_2(Y_2O_3)/Pt/Ti/glass$ на И Au/Ru/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass в систему  $\Phi$ XH. В ходе исследования системы было получено три основных режима возбудимости нейронов, включая режим возбуждения, соответствующий генерации одиночного импульса, режим стабильного автоколебаний предельного цикла с периодическими последовательностями импульсов и бистабильность между фиксированной точкой и предельным циклом. Выявлено, что при определенных параметрах системы реализуется режим спайк-берстовых колебаний. Благодаря эффекту заряда в мемристивных устройствах электронный синапс накопления качественно имитирует реальный биологический синапс с эффектом потенцирования при увеличении амплитуды отклика на последовательность импульсных сигналов.

## 3.6. По результатам данной главы на защиту выносятся следующие положения:

Встречно-параллельное подключение неорганических металлоксидных мемристивных устройств в нейроноподобный генератор ФитцХью– Нагумо имитирует динамику ионных каналов нейрона.

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

#### 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:

Разработана математическая 1. и электронная модель схема нейроноподобного нелинейностью генератора ФХН с на основе неорганического металл-оксидного мемристивного устройства. Проанализирована зависимость критической точки 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 режимов мемристивного устройства для изучения вынужденной И синхронизации. Установлено, что неорганическое металл-оксидное мемристивное устройство под действием сигнала пресинаптического электрического 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 потенциации
 адаптивного увеличения силы связи, неорганических металл-оксидных мемристивных устройств на периодическое импульсное внешнее воздействие.

#### Благодарности

Выражаю глубочайшую благодарность своему научному руководителю, Казанцеву Виктору Борисовичу, за всестороннюю поддержку, оказываемую на протяжении всего моего исследования. Искренне признателен Герасимовой Светлане Александровне и Михайлову Алексею Николаевичу за плодотворную работу и многочисленные обсуждения научных вопросов.

#### Перечень условных обозначений и сокращений

ReRAM – резистивная память с произвольным доступом (англ. Resistive Random-Access Memory);

RK4 – метод Рунге-Кутты 4-го порядка;

RNN – рекуррентные нейронные сети (англ. Recurrent Neural Network);

SNN – спайковые нейронные сети (англ. Spiking Neural Network);

STDP – пластичность, зависящая от взаимных времен импульсов (англ. Spike time dependent plasticity);

LTP – долговременная потенциация (англ. Long-term potentiation);

LTD – долговременная депрессия (англ. Long-term depression);

BAX – вольт-амперная характеристика (англ. Current-voltage characteristics);

ВМУ – векторно-матричное умножение;

МЛ – модель Моррис–Лекара (англ. The Morris-Lekar model);

MOM – структура металл-оксид-металл (англ. structure metal-oxide-metal);

ПЭМ – просвечивающий электронный микроскоп;

 $P\Pi$  – эффект резистивного переключения (англ. The effect of resistive switching);

CBC – состояние с высоким сопротивлением (англ. high-resistance state – HRS);

СНС – состояние с низким сопротивлением (англ. low-resistance state – LRS);

ФХН – модель ФитцХью–Нагумо (англ. The Fitzhugh-Nagumo model);

XP – модель Хиндмарш–Роуз (англ. The Hindmarsh-Rose model);

XX – модель Ходжкина–Хаксли (англ. The Hodgkin–Huxley model);

#### Список используемой литературы

 Carnevale, N. T. The NEURON book / N. T. Carnevale, M. L. Hines // Cambridge University Press. – 2006.

2. Abbott, L. F. Synaptic plasticity: taming the beast / L. F. Abbott, S. B. Nelson // Nature neuroscience. – 2000. – V. 3. – №. 11. – P. 1178-1183.

3. Chua, L. Memristor-the missing circuit element / L. Chua // IEEE Transactions on circuit theory. – 1971. – V. 18. – №. 5. – P. 507-519.

 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.

5. Кипелкин, И.М. Синхронизация мемристивных нейронных генераторов / И.М. Кипелкин [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №.4. – С.5.

 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.

7. 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.

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.

9. 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.

10. 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

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. Кипелкин, И.М. Модель нейроморфного спайкового генератора на основе мемристивных наноустройств / И.М. Кипелкин // Тезисы докладов школы молодых ученых Х Всероссийского форума Микроэлектроника, Сочи. – 2024. – С. 359.

16. 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.

17. 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.

18. 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. 19. Hodgkin, A. L. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve / A. L. Hodgkin, A. F. Huxley // The Journal of physiology.  $-1952. - V. 117. - N_{\odot}. 4. - P. 500.$ 

20. Nelson, M. The Hodgkin Huxley model / M. Nelson, J. Rinzel // The book of genesis. – 1995. – V. 2.

21. Feng, J. Integrate-and-fire and Hodgkin-Huxley models with current inputs/ J. Feng, G. Li //Journal of Physics A: Mathematical and General. – 2001. – V. 34. – №. 8. – P. 1649.

22. Giannari, A. G. Model design for networks of heterogeneous Hodgkin– Huxley neurons / A. G. Giannari, A. Astolfi // Neurocomputing. – 2022. – V. 496. –
P. 147-157.

23. Rutherford, G. H. Analog implementation of a Hodgkin–Huxley model neuron / G. H. Rutherford, Z. D. Mobille, J. Brandt-Trainer, R. Follmann, E. Rosa, // American Journal of Physics. – 2020. – V. 88. – №. 11. – P. 918-923.

24. Melendy, R. F. A Closed-Form Adaptation of the Hodgkin-Huxley Membrane Potential and its Synthesis to a Novel Electric Circuit Melendy / R. F. Melendy, L. Nguyen // bioRxiv. – 2022. – P. 2022.07. 25.501272.

25. Buhry, L. Automated parameter estimation of the Hodgkin-Huxley model using the differential evolution algorithm: application to neuromimetic analog integrated circuits / L. Buhry, F. Grassia, A. Giremus, E. Grivel, S. Renaud, S. Saïghi, // Neural computation.  $-2011. - V. 23. - N_{\odot}. 10. - P. 2599-2625.$ 

26. Indiveri, G. Neuromorphic silicon neuron circuits / G. Indiveri [et al.] // Frontiers in neuroscience. – 2011. – V. 5. – P. 73.

27. Rutherford, G. H. Analog implementation of a Hodgkin–Huxley model neuron/ G. H. Rutherford [et al.] //American Journal of Physics. – 2020. – V. 88. – №. 11. – P. 918-923.

28. Izhikevich, E. M. Fitzhugh-Nagumo model / E. M. Izhikevich, R.
FitzHugh // Scholarpedia. – 2006. – V. 1. – №. 9. – Р. 1349.

29. Hindmarsh, J. L. A model of the nerve impulse using two first-order differential equations / J. L. Hindmarsh, R. M. Rose // Nature. – 1982. – V. 296. – №. 5853. – P. 162-164.

30. Morris, C. Voltage oscillations in the barnacle giant muscle fiber / C.
Morris, H. Lecar // Biophysical journal. – 1981. – V. 35. – №. 1. – P. 193-213.

31. Bressloff, P. C. Metastable states and quasicycles in a stochastic Wilson-Cowan model of neuronal population dynamics / P.C. Bressloff // Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. – 2010. – V. 82. –  $N_{\odot}$ . 5. – P. 051903.

32. Izhikevich, E. M. Hybrid spiking models / E.M. Izhikevich // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.  $-2010. - V.368. - N_{\odot}.1930. - P.5061-5070.$ 

33. FitzHugh, R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane/ R. FitzHugh // Biophysical journal. – 1961. – V. 1. – №. 6. – C. 445-466.

34. Nagumo, J. An active pulse transmission line simulating nerve axon /
J. Nagumo, S. Arimoto, S. Yoshizawa // Proceedings of the IRE. – 1962. – V. 50. –
№. 10. – P. 2061-2070.

35. Izhikevich, E. M. Dynamical systems in neuroscience / E.M. Izhikevich // MIT press. – 2007.

36. Binczak, S. Experimental study of electrical FitzHugh–Nagumo neurons with modified excitability/S. Binczak [et al.] // Neural Networks. – 2006. – V. 19. – №. 5. – P. 684-693.

37. Bashkirtseva, I. Noise-induced oscillating bistability and transition to chaos in Fitzhugh–Nagumo model / I. Bashkirtseva, L. Ryashko, E. Slepukhina // Fluctuation and noise letters. – 2014. – V. 13. – №. 01. – P. 1450004.

38. Semenov, V. V. Delay-induced self-oscillation excitation in the Fitzhugh–Nagumo model: Regular and chaotic dynamics / V. V. Semenov, A. V. Bukh, N. Semenova // Chaos, Solitons & Fractals. – 2023. – V. 172. – P. 113524.

39. Manchein, C. Noise-induced stabilization of the FitzHugh–Nagumo neuron dynamics: Multistability and transient chaos / C. Manchein [et al.] // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. – 2022. – V. 32. – №. 8.

40. Gerasimova, S. A. Design of memristive interface between electronic neurons / S.A. Gerasimova [et al.] // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2018. – V. 1959. – №. 1.

41. Burić, N. Dynamics of FitzHugh-Nagumo excitable systems with delayed coupling / N. Burić, D. Todorović // Physical Review E.  $-2003. - V. 67. - N_{\odot}. 6. - P. 066222.$ 

42. Ambrosio, B. Synchronization and control of coupled reaction– diffusion systems of the FitzHugh–Nagumo type / B. Ambrosio, M. A. Aziz-Alaoui // Computers & Mathematics with Applications. – 2012. – V. 64. – №. 5. – P. 934-943.

43. Soleimanizadeh, A. Synchronization between two coupled fractional order neuron models using the optimized fuzzy logic controller in the presence of external disturbances / A. Soleimanizadeh, M. A. Nekoui, M. Aliyari Shoorehdeli // International Journal of Nonlinear Analysis and Applications. -2023. -V. 14.  $-N_{\odot}$ . 1. -P. 3037-3043.

44. Gerasimova, S. A. Stochastic memristive interface for neural signal processing / S. A. Gerasimova [et al.] // Sensors. – 2021. – V. 21. – №. 16. – P. 5587.

45. Vaidyanathan, S. Adaptive synchronization of the identical FitzHugh-Nagumo chaotic neuron models / S. Vaidyanathan // International Journal of PharmTech Research.  $-2015. - V. 8. - N_{\odot}. 6. - P. 167-177.$ 

46. Baladron, J. Mean-field description and propagation of chaos in networks of Hodgkin-Huxley and FitzHugh-Nagumo neurons / J. Baladron [et al.] // The Journal of Mathematical Neuroscience. – 2012. – V. 2. – P. 1-50.

47. Shim, Y. The chaotic dynamics and multistability of two coupled FitzHugh–Nagumo model neurons / Y. Shim, P. Husbands // Adaptive Behavior. – 2018. – V. 26. – №. 4. – P. 165-176.

48. Parker, J. E. Sigmoidal synaptic learning produces mutual stabilization in chaotic FitzHugh–Nagumo model / J. E. Parker, K. M. Short // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. – 2020. – V. 30. – №. 6.

49. Geltrude, A. Feedback control of bursting and multistability in chaotic systems / A. Geltrude [et al.] // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation.  $-2012. - V. 17. - N_{\odot}. 7. - P. 3031-3039.$ 

50. Jhangeer, A. Multistability and dynamic behavior of non-linear wave solutions for analytical kink periodic and quasi-periodic wave structures in plasma physics / A. Jhangeer [et al.] // Results in Physics. – 2021. – V. 29. – P. 104735.

51. Freire, J. G. Stern–Brocot trees in cascades of mixed-mode oscillations and canards in the extended Bonhoeffer–van der Pol and the FitzHugh–Nagumo models of excitable systems / J. G. Freire, J. A. C. Gallas // Physics Letters A. –  $2011. - V. 375. - N_{\odot}. 7. - P. 1097-1103.$ 

52. Mikhaylov, A. N. Neuromorphic Computing Based on CMOS-Integrated Memristive Arrays: Current State and Perspectives / A.N. Mikhaylov [et al.] // Supercomputing Frontiers and Innovations. – 2023. – V. 10. – №. 2. – P. 77-103.

53. La Rosa, M. Slow regularization through chaotic oscillation transfer in a unidirectional chain of Hindmarsh–Rose models / M. La Rosa [et al.] // Physics Letters A. – 2000. – V. 266. – №. 1. – P. 88-93.

54. Fan, Y. Bifurcations, burstings, chaos and crises in the Rose-Hindmarsh model for neuronal activity / Y. Fan, A. V. Holden // Chaos, Solitons & Fractals.  $-1993. - V. 3. - N_{\odot}. 4. - P. 439-449.$ 

55. Sabbagh, H. Control of chaotic solutions of the Hindmarsh–Rose equations / H. Sabbagh // Chaos, Solitons & Fractals. – 2000. – V. 11. – №. 8. – P. 1213-1218.

56. Ochs, K. An equivalent electrical circuit for the Hindmarsh-Rose model / K. Ochs, S. Jenderny // International Journal of Circuit Theory and Applications.  $-2021. - T. 49. - N_{\odot}. 11. - C. 3526-3539.$ 

57. Heidarpur, M. A digital implementation of 2D Hindmarsh–Rose neuron / M. Heidarpur, A. Ahmadi, N. Kandalaft // Nonlinear Dynamics. – 2017. – V. 89. – P. 2259-2272.

58. Cai, J. Smooth nonlinear fitting scheme for analog multiplierless implementation of Hindmarsh–Rose neuron model / J. Cai [et al.] // Nonlinear Dynamics. – 2021. – T. 104. – C. 4379-4389.

59. Wouapi, M. K. Complex bifurcation analysis and synchronization optimal control for Hindmarsh–Rose neuron model under magnetic flow effect / M. K. Wouapi [et al.] // Cognitive neurodynamics. – 2021. – V. 15. – P. 315-347.

60. Wouapi, K. M. Various firing activities and finite-time synchronization of an improved Hindmarsh–Rose neuron model under electric field effect / M. K. Wouapi [et al.] // Cognitive Neurodynamics. – 2020. – V. 14. – C. 375-397.

61. Hayati, M. Digital multiplierless realization of two-coupled biological Hindmarsh–Rose neuron model / M. Hayati [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs.  $-2015. - V. 63. - N_{\odot}. 5. - P. 463-467.$ 

62. Jenderny, S. A simplified Hindmarsh-Rose model based on power-flow analysis / Jenderny S. [et al.] // 2023 21st IEEE Interregional NEWCAS Conference (NEWCAS). – IEEE, 2023. – P. 1-5.

63. Hrg, D. Synchronization of two Hindmarsh–Rose neurons with unidirectional coupling / D. Hrg // Neural Networks. – 2013. – V. 40. – P. 73-79.

64. Steur, E. Synchronization and partial synchronization experiments with networks of time-delay coupled Hindmarsh–Rose neurons / Steur E. [et al.] // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2016. – V. 26. –  $N_{\odot}$ . 07. – P. 1650111.

65. Usha, K. Hindmarsh-Rose neuron model with memristors / K. Usha, P.
A. Subha // Biosystems. – 2019. – V. 178. – P. 1-9.

66. Jenderny, S. A memristor-based circuit approximation of the Hindmarsh–Rose model / S. Jenderny, K. Ochs, P. Hövel // The European Physical Journal B. – 2023. – V. 96. – №. 8. – P. 110.

67. Vijay, S. D. Superextreme spiking oscillations and multistability in a memristor-based Hindmarsh–Rose neuron model / S. D. Vijay, K. Thamilmaran, A. I. Ahamed // Nonlinear Dynamics. – 2023. – V. 111. – №. 1. – P. 789-799.

 Castanedo-Guerra, I. Synchronization of "light-sensitive" Hindmarsh– Rose neurons / I. Castanedo-Guerra, E. Steur, H. Nijmeijer // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2018. – V. 57. – P. 322-330.

69. Ryashko, L. B. Analysis of additive and parametric noise effects on Morris-Lecar neuron model. / L. B Ryashko, E. S. Slepukhina // – 2017.

70. Tsumoto, K. Bifurcations in Morris–Lecar neuron model / K. Tsumoto [et al.] // Neurocomputing. – 2006. – V. 69. – №. 4-6. – P. 293-316.

71. Lecar, H. Morris-lecar model / H. Lecar // Scholarpedia. – 2007. – V.
2. – №. 10. – Р. 1333.

72. Hu, X. An electronic implementation for Morris–Lecar neuron model
/ X. Hu [et al.] // Nonlinear Dynamics. – 2016. – V. 84. – P. 2317-2332.

73. Hayati, M. Digital multiplierless realization of two coupled biological Morris-Lecar neuron model / M. Hayati [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2015. – V. 62. – №. 7. – P. 1805-1814.

74. Wagemakers, A. Building electronic bursters with the Morris–Lecar neuron model / A. Wagemakers [et al.] // International Journal of Bifurcation and Chaos.  $-2006. - V. 16. - N_{\odot}. 12. - P. 3617-3630.$ 

75. Ochs, K. An optimized morris-lecar neuron model using wave digital principles / K. Ochs, D. Michaelis, S. Jenderny // 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). – IEEE. – 2018. – P. 61-64.

76. Cai, R. State transitions in the Morris-Lecar model under stable Lévy noise / R. Cai [et al.] // The European Physical Journal B. – 2020. – V. 93. – P. 1-9.

77. Jenderny, S. Wave digital model of calcium-imaging-based neuronal activity of mice / S. Jenderny, K. Ochs // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. – 2023. – V. 36. – №. 2. – P. e3053.
78. Nakada, K. An analog CMOS central pattern generator for interlimb coordination in quadruped locomotion / K. Nakada, T. Asai, Y. Amemiya // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2003. – V. 14. – №. 5. – P. 1356-1365.

79. Morris, J. A Subthreshold Layout Strategy for Faster and Lower Energy Complex Digital Circuits / Morris J. [et al.] // Journal of Low Power Electronics and Applications.  $-2022. - V. 12. - N_{\odot}. 3. - P. 43.$ 

80. Kreshuk, A. Automated detection and segmentation of synaptic contacts in nearly isotropic serial electron microscopy images / Kreshuk A. [et al.] // PloS one.  $-2011. - V. 6. - N_{\odot}. 10. - P. e24899.$ 

81. Farina, D. Common synaptic input to motor neurons, motor unit synchronization, and force control / D. Farina, F. Negro // Exercise and sport sciences reviews.  $-2015. - V. 43. - N_{\odot}. 1. - P. 23-33.$ 

82. Ramasamy, M. Effect of external excitation on synchronization behavior in a network of neuron models / Ramasamy M. [et al.] // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2023. – V. 625. – P. 129032.

83. Magee, J. C. Synaptic plasticity forms and functions / J. C. Magee, C.
Grienberger // Annual review of neuroscience. – 2020. – V. 43. – №. 1. – P. 95-117.

84. Abraham, W. C. Metaplasticity: the plasticity of synaptic plasticity / W.
C. Abraham, M. F. Bear // Trends in neurosciences. – 1996. – V. 19. – №. 4. – P. 126-130.

85. Caporale, N. Spike timing-dependent plasticity: a Hebbian learning rule / N. Caporale, Y. Dan // Annu. Rev. Neurosci. – 2008. – V. 31. – P. 25-46.

86. Krunglevicius, D. Modified STDP triplet rule significantly increases neuron training stability in the learning of spatial patterns / D. Krunglevicius // Advances in Artificial Neural Systems. – 2016. – V. 2016.

87. Kheradpisheh, S. R. STDP-based spiking deep convolutional neural networks for object recognition / S. R. Kheradpisheh [et al.] // Neural Networks. – 2018. – V. 99. – P. 56-67.

88. Zhou, W. Forgetting memristor based STDP learning circuit for neural networks / W. Zhou [et al.] // Neural Networks. – 2023. – V. 158. – P. 293-304. 89. George, T. M. Rapid learning of predictive maps with STDP and theta phase precession / T. M. George [et al.] // Elife. – 2023. – V. 12. – P. e80663.

90. Lobov, S. A. STDP-Driven Rewiring in Spiking Neural Networks under Stimulus-Induced and Spontaneous Activity / S. A. Lobov [et al.] // Biomimetics.  $-2023. - V. 8. - N_{\odot}. 3. - P. 320.$ 

91. Lobov, S. A. Spatial properties of STDP in a self-learning spiking neural network enable controlling a mobile robot / S. A. Lobov [et al.] // Frontiers in neuroscience. – 2020. – V. 14. – P. 88.

92. Zhou, P. A piezoelectric sensing neuron and resonance synchronization between auditory neurons under stimulus / P. Zhou [et al.] // Chaos, Solitons & Fractals. – 2021. – V. 145. – P. 110751.

93. Yao, Z. Synchronization realization between two nonlinear circuits via an induction coil coupling / Z. Yao [et al.] // Nonlinear Dynamics. – 2019. – V. 96. – P. 205-217.

94. Huang, P. Energy-induced resonance synchronization in neural circuits
/ P. Huang [et al.] // Modern Physics Letters B. – 2021. – V. 35. – №. 26. – P. 2150433.

95. Chua, L. O. Memristive devices and systems / L. O. Chua, S. M. Kang
// Proceedings of the IEEE. – 1976. – V. 64. – №. 2. – P. 209-223.

96. Wang, F. Z. Φ memristor: real memristor found / F. Z. Wang [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2019. – V. 125. – №. 5.

97. Strukov, D. B. The missing memristor found / D. B. Strukov [et al.] // Nature. - 2008. - V. 453. - №. 7191. - P. 80-83.

98. Gorshkov, O. N. Resistive switching in metal-insulator-metal structures based on germanium oxide and stabilized zirconia / O. N. Gorshkov [et al.] // Technical Physics Letters. – 2014. – V. 40. – P. 101-103.

99. Yang, J. J. Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices / J. J. Yang [et al]. // Nature nanotechnology. – 2008. – V. 3. – №. 7. – P. 429-433.

100. Emel'yanov, A. V. Effect of the thickness of the TiO x/TiO 2 layers on their memristor properties / A. V. Emel'yanov [et al.] // Technical Physics. – 2015.
– V. 60. – P. 112-115.

101. Zidan, M. A. The future of electronics based on memristive systems /
M. A. Zidan, J. P. Strachan, W. D. Lu // Nature electronics. – 2018. – V. 1. – №. 1.
– P. 22-29.

102. Vourkas, I. Emerging memristor-based logic circuit design approaches: A review / I. Vourkas, G. C. Sirakoulis // IEEE circuits and systems magazine.  $-2016. - V. 16. - N_{\odot}. 3. - P. 15-30.$ 

103. Ielmini, D. Resistive switching: from fundamentals of nanoionic redox processes to memristive device applications. / D. Ielmini, R. Waser // John Wiley & Sons. – 2015.

104. Xia, Q. Memristive crossbar arrays for brain-inspired computing / Q.
Xia, J. J. Yang // Nature materials. – 2019. – V. 18. – №. 4. – P. 309-323.

105. Mikhaylov, A. Neurohybrid memristive CMOS-integrated systems for biosensors and neuroprosthetics / A. Mikhaylov [et al.] // Frontiers in neuroscience. - 2020. - V. 14. - P. 358.

106. Sung, C. Perspective: A review on memristive hardware for neuromorphic computation / C. Sung, H. Hwang, I.K. Yoo // Journal of Applied Physics. – 2018. – V. 124. – №. 15.

107. Gerasimova, S. A. Memristive Neural Networks for Predicting Seizure Activity / Gerasimova S. A. [et al.] // Современные технологии в медицине. – 2023. – V. 15. – №. 4 (eng). – Р. 30-37.

108. Jun, L. A spintronic memristor crossbar array for fuzzy control with application in the water valves control system / L. Jun [et al.] // Measurement and Control.  $-2019. - V.52. - N_{\odot}.5-6. - P.418-431.$ 

109. Carruthers, P. The cognitive functions of language / P. Carruthers // Behavioral and brain sciences. – 2002. – V. 25. – №. 6. – P. 657-674.

110. Minati, L. A chaotic circuit based on a physical memristor / L. Minati
[et al.] // Chaos, Solitons & Fractals. - 2020. - V. 138. - P. 109990.

111. Huang, H. M. Quasi-Hodgkin–Huxley Neurons with Leaky Integrateand-Fire Functions Physically Realized with Memristive Devices / Huang H. M. [et al.] // Advanced Materials. – 2019. – V. 31. – №. 3. – P. 1803849.

112. Pickett, M. D. A scalable neuristor built with Mott memristors / M. D. Pickett, G. Medeiros-Ribeiro, R. S. Williams // Nature materials.  $-2013. - V. 12. - N_{\odot}. 2. - P. 114-117.$ 

113. Ignatov, M. A memristive spiking neuron with firing rate coding / M. Ignatov [et al.] // Frontiers in neuroscience. -2015. - V. 9. - P. 376.

114. Emelyanov, A. V. Yttria-stabilized zirconia cross-point memristive devices for neuromorphic applications / A. V. Emelyanov [et al.] // Microelectronic Engineering. – 2019. – V. 215. – P. 110988.

115. Itoh, M. Memristor oscillators / M. Itoh, L. O. Chua // International journal of bifurcation and chaos. – 2008. – V. 18. – №. 11. – P. 3183-3206.

116. Mannan, Z. I. Chua corsage memristor: Phase portraits, basin of attraction, and coexisting pinched hysteresis loops / Z.I. Mannan [et al.] // International Journal of Bifurcation and Chaos.  $-2017. - V. 27. - N_{\odot}. 03. - P.$  1730011.

117. Zhevnenko, D. Simulation of memristor switching time series in response to spike-like signal / D. Zhevnenko [et al.] // Chaos, Solitons & Fractals. – 2021. – V. 142. – P. 110382.

118. Yan, D. Chaotic attractors generated by a memristor-based chaotic system and Julia fractal / Yan D. [et al.] // Chaos, Solitons & Fractals. – 2021. – V. 146. – P. 110773.

119. Kumar, S. Chaotic dynamics in nanoscale NbO2 Mott memristors for analogue computing / S. Kumar, J.P. Strachan, R.S. Williams // Nature. – 2017. – V. 548. – №. 7667. – P. 318-321.

120. Danilin, S. N. Perspective element base of specialized computers of modern radar based on memristors / S. N. Danilin, S. A. Shchanikov // Radio Eng. Telecommun. Syst. – 2015. – V. 3. – P. 13-19.

121. Danilin, S. N. The research of memristor-based neural network components operation accuracy in control and communication systems / S. N. Danilin, S.A. Shchanikov, A.I. Galushkin // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE. – 2015. – P. 1-6.

122. Bao, B. Three-Dimensional Memristive Hindmarsh–Rose Neuron Model with Hidden Coexisting Asymmetric Behaviors / B. Bao [et al.] // Complexity.  $-2018. - V. 2018. - N_{\odot}. 1. - P. 3872573.$ 

123. Guo, M. Multistability in a physical memristor-based modified Chua's circuit / M. Guo [et al.] // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science.  $-2019. - V. 29. - N_{\odot}. 4.$ 

124. Ranjan, R. Integrated circuit with memristor emulator array and neuron circuits for biologically inspired neuromorphic pattern recognition / R. Ranjan [et al.] // Journal of Circuits, Systems and Computers.  $-2017. - V. 26. - N_{\odot}. 11. - P.$  1750183.

125. Chang, T. Building neuromorphic circuits with memristive devices / T.
Chang, Y. Yang, W. Lu // IEEE Circuits and Systems Magazine. – 2013. – V. 13. – №. 2. – P. 56-73.

126. Truong, S. N. Memristor circuits and systems for future computing and bio-inspired information processing / S. N. Truong [et al.] // IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS). – IEEE, 2016. – P. 456-459.

127. Du, N. Synaptic Plasticity in Memristive Artificial Synapses and Their Robustness Against Noisy / N. Du, X. Zhao, Z. Chen // Front. Neurosci. – 2021– V.
15.

128. Kim, S. Experimental Demonstration of a Second-Order Memristor and Its Ability to Biorealistically Implement Synaptic Plasticity / S. Kim, C. Du, P. Sheridan, W. Ma, S. Choi, W.D. Lu // Nano Lett. – 2015. – V. 15. – P. 2203-2211.

129. Du, C. Biorealistic Implementation of Synaptic Functions with Oxide Memristors through Internal Ionic Dynamics / C. Du, W. Ma, T. Chang, P. Sheridan,
W.D. Lu // Advanced Functional Materials. – 2015. – V. 25. – P. 4290–4299.

130. Kumar, S. Third-order nanocircuit elements for neuromorphic

engineering / S. Kumar, R.S. Williams, Z. Wang // Nature. – 2020. – V. 585, №. 7826. – P. 518–523.

131. Joglekar, Y. N. The elusive memristor: properties of basic electrical circuits / Y. N. Joglekar, S. J. Wolf // European Journal of physics.  $-2009. - V. 30. - N_{\odot}. 4. - P. 661.$ 

132. Некоркин, В.И. Лекции по основам теории колебаний: учебное пособие / В.И. Некоркин. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, – 2011. – 233 с.

133. Mikhaylov, A. N. Effect of ion irradiation on resistive switching in metal-oxide memristive nanostructures / A. N. Mikhaylov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – V. 1410. –  $N_{\odot}$ . 1. – P. 012245.

134. Mishchenko, M. A. Inverted spike-rate-dependent plasticity due to charge traps in a metal-oxide memristive device / M. A. Mishchenko [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics.  $-2022. - V.55. - N_{\odot}.39. - P.394002.$ 

135. Mikhaylov, A. N. One-board design and simulation of double-layer perceptron based on metal-oxide memristive nanostructures / A. N. Mikhaylov [et al.] // IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence. – 2018. – V. 2. – No. 5. – P. 371-379.

136. Mikhaylov, A. N. Bipolar resistive switching and charge transport in silicon oxide memristor / A. N. Mikhaylov [et al.] // Materials Science and Engineering: B. – 2015. – V. 194. – P. 48-54.

137. Montesi, L. Nanosecond analog programming of substoichiometric silicon oxide resistive RAM / Montesi L. [et al.] // IEEE Transactions on Nanotechnology.  $-2016. - V. 15. - N_{\odot}. 3. - P. 428-434.$ 

138. Moehlis, J. Dynamical Systems in Neuroscience: The geometry of excitability and bursting / J. Moehlis // JSTOR. – 2008. – V. 50. – №. 2. – P. 397-401.