

На правах рукописи



Большаков Денис Иванович

Электронное моделирование и исследование динамики
нейроноподобного генератора на базе системы фазовой
автоподстройки частоты

Специальность 1.3.5. – Физическая электроника
Специальность 1.3.4 – Радиоп физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2022

Работа выполнена на кафедре теории колебаний и автоматического регулирования радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научные руководители: **Матросов Валерий Владимирович**
доктор физико-математических наук, профессор,
декан радиофизического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород;

Сысоев Илья Вячеславович
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», г. Саратов; ведущий научный сотрудник ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород

Официальные оппоненты: **Куркин Семён Андреевич**
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта», г. Калининград

Щапин Дмитрий Сергеевич
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской Академии наук», г. Нижний Новгород

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», г. Москва

Защита состоится 23 декабря 2022 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.392.01 в Саратовском национальном исследовательском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Московская, 155, 10 корпус, 511 аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского и на сайте диссертационного совета по адресу: https://www.sgu.ru/sites/default/files/dissertation/2022/09/26/disertaciya_bolshakov_16.09.22-1_0.pdf

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Председатель диссертационного совета 24.2.392.01



В. М. Аникин

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы диссертации

В современной междисциплинарной науке одним из наиболее актуальных направлений является изучение принципов работы мозга. Помимо фундаментального характера исследований данное направление имеет выраженную практическую значимость в области разработки интеллектуальных устройств, воспроизводящих принципы обработки информации мозгом. Это связано с тем, что несмотря на высокий уровень развития вычислительной техники и различных роботизированных платформ, даже самые большие компьютерные системы, например, разработанные в рамках проекта Blue Brain, могут воспроизводить только очень ограниченные подсистемы мозга.

Построение электронных моделей нейронов – быстро развивающаяся область физической электроники, в которой за последние 30 лет с момента первой публикации достигнуты существенные результаты. Основные цели здесь состоят как в моделировании и протезировании отдельных подсистем мозга, так и в использовании моделей для лучшего понимания функционирования реальной нервной системы. При этом все созданные реализации можно условно разделить на макромасштабные для которых можно довольно точно задавать характеристики и режимы поведения и микромасштабные, в которых характеристики индивидуальных нейронов воспроизводятся только в среднем, зато благодаря большому количеству можно моделировать сети из сотен и даже тысяч элементов. При этом большинство работ нацелены на электронную реализацию в виде полупроводниковых приборов тех или иных математических моделей нейронов, которых на сегодняшний день известно большое количество, отличающихся уровнем детализации и математической абстракции.

Можно выделить класс математических моделей, отражающих временную динамику нейронов. К этому классу можно отнести как упрощенные осцилляторные модели (изучением подобных систем занимаются группы L. Abbot, J. Kurths, S. Dana, A. Pikovski, I. Segev, P.M. Борисюка, Я.Б. Казановича, В.И. Некоркина, Г.В. Осипова и др.), так и более биологически-релевантные импульсные, или спайковые, модели (S. Boccaletti, G. Deco, W. Gerstner, E. Izhikevich, В.Б. Казанцев, Д.Г. Захаров, А.Е. Храмов и др.). Применение динамических моделей позволяет реализовать многие колебательные режимы функционирования мозга, в том числе переходные и нестационарные, признанные в последние годы существенными для моделирования многих нормальных и патологических процессов в мозге.

Электронное моделирование нейронов на физическом уровне развивается по двум направлениям. Одно представляет собой воплощение

биологически-релевантных математических моделей в электронном виде, другое направлено на разработку электронных устройств, которые демонстрируют нейроподобную динамику, при этом структурно они мало напоминают реальные нейроны. Возможность генерации и передачи от одного элемента сети к другому отдельных импульсов (спайков) и пачек импульсов (бёрстов) является ключевой при моделировании нейросистем вне зависимости от происхождения и элементной базы самих генераторов.

В работе¹ была предложена и исследована математическая модель нейроподобного элемента на основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАП), описываемая системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{d\tau} = y, \frac{dy}{d\tau} = z, \\ \varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{dz}{d\tau} = \gamma - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)z - (1 + \varepsilon_2 \cos\varphi)y \end{cases} \quad (1)$$

где ε_1 , ε_2 и γ параметры фильтра и начальной частотной расстройки системы ФАП. Модель (1) демонстрирует не только периодические, но и пачечные типы колебаний, характерные для реальных нейронов.

Системы фазовой синхронизации получили широкое распространение в радиотехнике и связи. Эти системы разрабатывались для решения задач синхронизации, стабилизации частоты, управления частотой и фазой колебаний, фильтрации, демодуляции, формирования и обработки сигналов, а также ряда других задач. Высокая надежность, управляемость, технологичность и способность генерировать сигналы различной сложности, вплоть до хаотических делают системы фазовой автоподстройки частоты привлекательными для разработки на их основе нейроподобных генераторов².

Стоит отметить, что богатая динамика нейронных сетей мозга обусловлена не только динамикой нейронов, но и динамическим изменением силы взаимодействия между нейронами в сети под воздействием их активности — эффектами синаптической пластичности. Учёт пластичности связей позволяет еще больше расширить возможности кодирования информации в нейронных сетях, в частности использовать пространственно-временное кодирование. Кроме того, за счёт динамически изменяющихся весовых коэффициентов связей появляется возможность автоматической адаптации сети под внешнее воздействие — эффект обучения нейронной сети.

¹ Мищенко М.А., Шалфеев В.Д., Матросов В.В. //Известия вузов. ПНД. 2012. Т. 20. №. 4. С. 122-130.

² Шалфеев В.Д., Матросов В.В. Нелинейная динамика систем фазовой синхронизации, Нижний Новгород: изд-во ННГУ, 2013. 366 с.

Исследованиями динамики нейронных сетей с учетом различных механизмов синаптической пластичности занимаются группы М. Tsodyks, В.Б. Казанцева, С.А. Лобова, В.В. Клиньшова и др. Поэтому моделирование работы синапсов привлекает усилия и внимание сопоставимое с усилиями в области моделирования самих нейронов.

Мощный толчок развитию данного направления дало исследование мемристивных устройств, активно развивающееся с 2008 года³. Мемристивные устройства считаются идеальным кандидатом на роль синаптических связей в электронной нейронной сети, позволяя воспроизводить эффекты пластичности и организовывать обучение.

В связи со всем вышесказанным, разработка электронных нейронов и их сетей и исследование их динамики являются актуальной и востребованной задачей.

Цель работы – электронное моделирование нейроноподобных генераторов с использованием систем ФАП и их ансамблей, а также анализ их динамики.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- электронная реализация автоколебательной модели нейроноподобного генератора на основе системы ФАП, демонстрирующая режимы пачечной активности, выделение в пространстве параметров областей различной динамикой;
- разработка метода реконструкции параметров генератора нейроноподобных импульсов на базе ФАП, позволяющего количественно оценить степень соответствия электронной аппаратной реализации его математической модели;
- модификация цепи управления автоколебательной модели нейроноподобного генератора на основе системы ФАП, с целью добавления функции возбудимого режима, анализ динамики модифицированной модели;
- анализ коллективной динамики двух нейроноподобных генераторов, связанных через мемристивный элемент, исследование свойств синаптического контакта на основе мемристивного элемента.

Научная новизна диссертационной работы заключается, во-первых, в теоретическом и практическом изучении процессов генерации и синхронизации нейроноподобных колебаний системами фазовой автоподстройки частоты. Во-вторых, в использовании для определения степени соответствия электронной аппаратной реализации математической модели разработанного метода реконструкции параметров по временным

³ Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. // Nature. 2008. V. 453. №. 7191. P. 80-83.

рядам. В частности, в методе впервые применена комбинация численного дифференцирования и интегрирования для реконструкции вектора состояния, используется подход к реконструкции интегрированных по времени уравнений, вводятся поправки на масштабирование и смещение, имеющее место при измерениях. В-третьих, в применении модели синаптического контакта на основе мемристового элемента для связывания генераторов в ансамбль и исследования коллективной динамики.

Основные научные результаты:

1. Разработана и исследована электронная модель нейроподобного генератора на базе системы ФАП качественно повторяющая автоколебательную динамику мембранного потенциала биологического нейрона.
2. Проведена реконструкция параметров генератора по его экспериментальным временным рядам. В результате реконструкции достигнуто хорошее количественное соответствие со значениями, рассчитанными исходя из номиналов электронных компонентов в соответствии с математической моделью.
3. Предложена модификация цепи управления системы ФАП дополняющая автоколебательную динамику электронного нейрона возбудимым режимом. Исследована динамика модифицированной модели при внешнем импульсном воздействии. Показано, что переход от возбудимого режима к колебательному зависит только от площади воздействующего импульса.
4. Установлено, что модель синаптической связи на основе мемристового элемента имеет нелинейную зависимость проводимости от частоты следования импульсов. Синхронизация двух связанных через синаптический узел нейроподобных генераторов носит временный характер и определяется текущим значением проводимости мемристового элемента.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается использованием при анализе динамики математических моделей качественно-численных методов теории нелинейных колебаний и теории бифуркаций, совпадением полученных экспериментальных результатов импульсной активности разработанных электронных нейронов с результатами численного моделирования, совпадением изложенных в диссертации результатов с результатами исследований отечественных и зарубежных авторов в данной области, а также научной экспертизой на конференциях при публикации материалов в рецензируемой научной печати.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы состоит в том, что показана возможность создания электронного устройства, основанного на системе

ФАП с полосовым фильтром, генерирующего нелинейные колебания различных типов (одиночные импульсы, периодические и хаотические пачки импульсов), свойственные реальным нейронам. Таким образом, продемонстрировано, что нейроподобные режимы, в том числе режимы коллективной динамики в полупроводниковых устройствах можно получить не только путём реализации составленных из биофизических принципов уравнений «в железе», но и путём феноменологического моделирования именно самих режимов активности без привязки к происхождению уравнений математической модели генератора.

Также теоретическая значимость состоит в результатах исследования возбуждения и коллективной динамики аппаратных моделей нейроподобных генераторов, связанных через мемристивный элемент.

Практическая значимость результатов данной работы заключается в возможности использования относительно простой и стабильно работающей модели нейроподобного генератора на основе системы фазовой автоподстройки частоты, а также модели рассмотренного синаптического контакта на основе мемристивного элемента для реализации аппаратных биологически правдоподобных нейронных сетей. Такие нейронные сети в свою очередь могут применяться в адаптивных робототехнических системах, системах потоковой обработки видео и машинного зрения, системах классификации паттернов активности мозга и мышц человека, системах нейропротезирования и искусственного интеллекта.

Положения, выносимые на защиту

1. Электронная реализация модели нейроподобного генератора на основе системы фазовой автоподстройки частоты на твердотельных полупроводниковых элементах с полосовым фильтром позволяет получить режимы единичных импульсов (спайков) и пачек импульсов (бёрстов), как периодические, так и хаотические, и адекватна математической модели.
2. Предложенный специально для исследуемой системы на основе ФАП с полосовым фильтром новый подход к реконструкции параметров позволяет количественно оценить соответствие аппаратной электронной реализации математической модели, поскольку реализует реконструкцию всего вектора состояния модели по одной скалярной наблюдаемой, учитывает смещение и масштабирование при измерении и имеет низкую чувствительность к шумам за счёт реконструкции уравнений, интегрированных по времени.
3. Электронная реализация нейроподобного генератора на основе ФАП с модифицированной добавлением электронно-управляемого ключа цепью управления позволяет реализовать возбудимый режим, в котором генерация возможна как отклик на внешний импульс.

4. Использование мемристового элемента позволяет воспроизвести частотную зависимость пластичности синапса при связывании двух нейроноподобных генераторов на основе систем ФАП и достичь их синхронизации.

Публикации и апробация результатов

Результаты работы опубликованы в журналах: Письма в Журнал технической физики (2017, 2022) [A1,A2], IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs (2022) [A3], Journal of Physics D: Applied Physics (2022) [A4]. По теме диссертации опубликованы 28 научных работ, включая 4 статьи в международных журналах и журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК [A1-A4] и 24 работы в сборниках трудов конференций.

Основные результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях, включая: XX-XXV научные конференции по радиофизике (Н. Новгород, 2015-2021), XVII-XVIII научная школа «Нелинейные волны» (Н. Новгород, 2016, 2018), XI-XII Международная школа - конференция «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов, 2016, 2019), XXII - XXIII нижегородская сессия молодых ученых. Естественные, математические науки (Н. Новгород, 2017, 2018), XII и XV Всероссийские конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», (Саратов, 2017, 2020), международная конференция «VOLGA NEUROSCIENCE MEETING 2018» (Н. Новгород, Самара, 2018), международная конференция «11th FENS Forum of Neuroscience» (Берлин, 2018), XX международная конференция «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии» (Н. Новгород, 2020), XXIX Всероссийская научная конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (Саратов, 2021), V Международная конференция «Информационные технологии и технические средства управления» (Астрахань, 2021).

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательских работ по следующим темам: РФФИ 16-32-00643-мол-а, 18-29-23001-мк; государственного задания Министерства науки и высшего образования 0729-2020-0040; программы развития региональных научно-образовательных математических центров № 075-02-2020-1483 «Математика технологий будущего»; грантов Президента РФ МК-2726.2017.2, МД-3006.2021.1.2.

Личный вклад автора

Все полученные результаты диссертационной работы получены лично автором. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Автором работы самостоятельно были выполнены аналитические

исследования, проведено численное и схемотехническое моделирование, разработан и изготовлен лабораторный прототип нейроноподобного генератора, выполнено экспериментальное исследование динамики лабораторного прототипа, а также проведено сопоставление результатов экспериментального исследования с результатами численного моделирования. Постановка задачи и обсуждение полученных результатов проводилось совместно с научными руководителями.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит 121 страницу, включая 53 рисунка, 189 наименований цитируемой литературы, 28 научных публикаций по теме диссертации (из них 4 статей в реферируемых изданиях)

Краткое содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность изучаемой проблемы, приводится краткий обзор научной литературы по теме диссертационной работы, формулируется цель и определяется круг решаемых задач, описывается научная новизна и научно-практическая значимость диссертационных исследований.

Первая глава посвящена разработке электронной модели нейроноподобного генератора на базе системы ФАП с полосовым фильтром, исследованию возможных режимов генерации и исследованию динамики данной модели под внешним воздействием.

Разработана электрическая принципиальная схема аппаратной реализации нейроноподобного генератора на основе системы ФАП с полосовым фильтром, на основе которой изготовлен полнофункциональный макет генератора на основе твердотельных электронных компонентов.

За основу макета генератора взята микросхема фазовой автоподстройки частоты CD4046 фирмы Texas Instruments. Микросхема состоит из фазового дискриминатора, реализующего операцию булевой алгебры «Исключающее ИЛИ», генератора управляемого напряжением с линейной характеристикой управляющего элемента, и позволяет конструировать кольцо управления системы ФАП. В макете цепь управления представлена фильтром второго порядка, реализованным в виде двух последовательно связанных RC - и CR -фильтров.

На разработанном макете продемонстрирована возможность генерации нейроноподобных колебаний различной сложности: регулярные одиночные импульсы, пачки импульсов с различным количеством импульсов в пачке, хаотическая импульсная динамика. Осциллограммы различных динамических режимов представлены на рис. 1.

Определены области существования основных динамических режимов в сечениях пространства параметров, представленные на рис. 2.

Графики, представленные на рис. 1, 2, хорошо качественно согласуются с результатами численного исследования математической модели (1), проведенного в работе⁴.

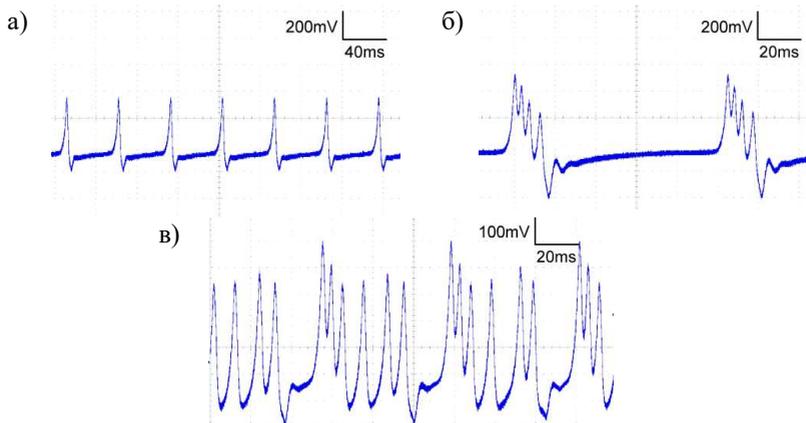


Рис. 1. Примеры экспериментально записанных осциллограмм режимов генерации аппаратной модели нейроноподобного генератора. Режим периодической генерации одиночных импульсов (а); режим генерации пачек (берстов) (б); хаотический режим генерации (в);

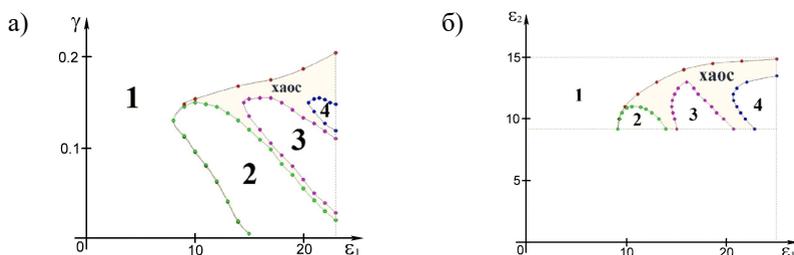


Рис. 2. Области существования автоколебательных режимов аппаратной модели нейроноподобного генератора, где цифровое обозначение областей совпадает с числом импульсов в пачке реализуемого в данной области режима

Получены осциллограммы откликов аппаратной реализации нейроноподобного генератора на периодическое импульсное воздействие, представленные на рис. 3. При их анализе был обнаружен эффект изменения периода откликов в зависимости от размеров подаваемых стимулов, описанный ранее для математической модели генератора⁵.

⁴ Мищенко М. А., Шалфеев В. Д., Матросов В. В. //Известия вузов. ПНД. 2012. Т. 20. №. 4. С. 122-130.

⁵ Мищенко М.А., Ковалева Н.С., Половинкин А.В., Матросов В.В. // Известия вузов. ПНД. 2021. Т. 29. № 2. С. 240–253.

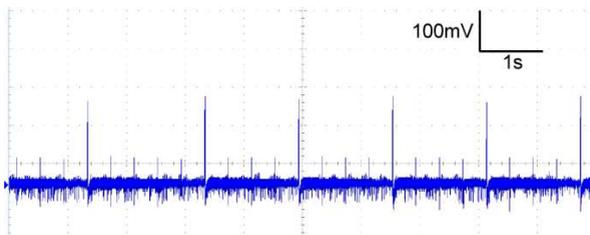


Рис. 3. Пример осциллограммы откликов нейроподобного генератора на последовательность прямоугольных импульсов с периодом следования 400мс, амплитудой 80 мВ и длительность импульса 4мс

Суть данного эффекта заключается в том, что при малых амплитудах стимуляции на периодический стимул не следует более одного надпорогового отклика подряд, при увеличении амплитуды воздействия отклики начинают появляться не реже, чем на каждый второй входной стимул, в случае больших амплитуд могут возникать серии из нескольких надпороговых откликов подряд, причем эти серии разделяются одним подпороговым откликом. Зависимости соотношения межимпульсных интервалов на входе и выходе нейроподобного генератора от амплитуды стимула представлены на рис. 4.

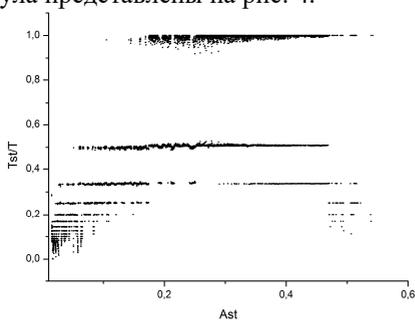


Рис. 4 Результаты экспериментального исследования зависимости соотношения межимпульсных интервалов на входе и выходе (T_{st}/T) нейроподобного генератора от амплитуды стимула (A_{st})

Результаты экспериментального исследования свидетельствуют, что представленные зависимости имеют схожую ступенчатую структуру, что согласуется с результатами численного исследования математической модели генератора.

Во второй главе описана разработка метода реконструкции параметров математической модели нейроподобного генератора по временным рядам электронного генератора с целью верификации модели. В методе реконструкции параметров по временным рядам, предложенном в работе⁶,

⁶ Сысоева М.В., Сысоев И.В., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. // Известия вузов. ПНД. 2020. Т. 28, №. 4. С. 397-413.

для исследуемой модели нейроноподобного генератора выявлен ряд недостатков:

1) необходимость двойного дифференцирования наблюдаемой величины, что в случае экспериментально наблюдаемого сигнала, содержащего высокочастотные и шумовые компоненты, приводит к существенному искажению результатов;

2) наблюдаемая переменная способна принимать нулевые значения, что может привести к некорректным результатам, поскольку она находится в знаменателе;

3) в наблюдаемой переменной присутствует некоторое неизвестное смещение, не учтенное в математической модели;

Для устранения указанных недостатков предложена модификация метода реконструкции заменой численного дифференцирования интегрированием и алгоритм поиска величины смещения наблюдаемой.

Для реконструкции параметров были рассмотрены семь различных режимов генерации, из которых шесть с регулярными колебаниями с различным количеством импульсов в пачке (от 1 до 6) и один хаотический. Так же следует отметить, что параметры исходной математической модели $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ и γ напрямую реконструировать невозможно. Возможна реконструкция лишь некоторых их комбинаций: $\beta_0 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_1 \varepsilon_2}$; $\beta_1 = \frac{\gamma}{\varepsilon_1 \varepsilon_2}$.

Результаты реконструкции параметров β_0 и β_1 в сопоставлении с их теоретически ожидаемыми (рассчитанными из номиналов элементов электронного генератора) значениями приведены на рис. 5.

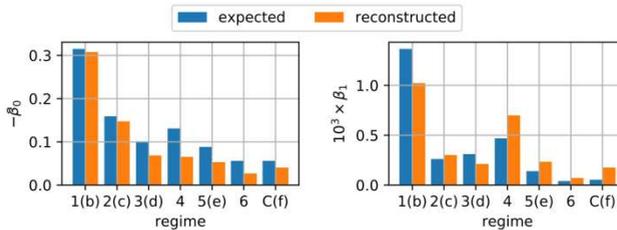


Рис. 5 Результаты реконструкции параметров β_0 и β_1 (голубым) и их теоретически ожидаемые (оранжевым), рассчитанные на основе номиналов использованных при построении установки элементов, значения.

Результаты реконструкции β_0 показывают относительно небольшую погрешность (от 2% до 52%) в разных режимах. Относительная ошибка реконструкции параметра β_1 , в большинстве случаев гораздо больше, чем ошибка параметра β_0 . Это связано с тем, что, во-первых, значение β_1 пропорционально параметру частотной расстройки γ , который обычно очень мал и близок к нулю, а во-вторых, параметр β_1 зависит от постоянного

смещения, присутствующего в системе, определение которого тоже имеет погрешность.

Результаты реконструкции функции фазового детектора $f_4(\psi)$ показали, что в целом функция для всех режимов похожа на синусоиду с трендом, как это следует из уравнений исходной математической модели генератора, но имеются существенные отличия:

1) в области части максимумов имеются существенные неоднозначности; общая закономерность такова, что для регулярных режимов области неоднозначного поведения имеют место на каждом n -ном максимуме для режима с n импульсов в пачке;

2) амплитуда колебаний непостоянна во всех режимах, кроме пачечного — сразу после неоднозначности она мала, затем возрастает;

3) форма в общем случае заметно отличается от гармонической даже для простейшего пачечного режима с двумя импульсами в пачке.

На основании полученных результатов следует признать, что заложенное в предложенную в работе⁷ модель предположение, что функция фазового детектора — гармоническая, явно не подтверждается.

Третья глава посвящена электронной реализации модели нейроноподобного генератора на основе системы ФАП с модифицированной цепью управления, исследованию её динамики и выводу математической модели.

При исследовании генератора, описанного в первой главе, были выявлены два недостатка: отсутствие характерного для нейронов возбудимого режима и инверсия амплитуды колебаний при переходе в область параметров $\gamma < 0$. Для устранения данных недостатков было принято решение модифицировать цепь управления ФАП, путем переключения на интегрирующий фильтр в случае отрицательных значений γ . Предложенное решение позволило не только устранить инверсию колебаний, но и реализовать возбудимый режим.

В новую схему цепи управления добавлен электронно-управляемый ключ, а также дополнительная петля слежения за сигналом, на основе состояния которой происходит управление электронным ключом. Функциональная схема полученной цепи представлена на рис. 6.

⁷ Шалфеев В. Д. // Известия вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11. № 3. С. 397–406

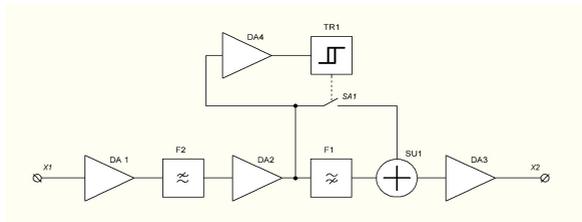


Рис. 6. Функциональная схем модифицированной цепи управления

Элементы DA1, DA2, DA3, F1 и F2, являются компонентами исходного полосового фильтра, элементы DA4 и TR1 являются элементами цепи слежения за состоянием системы, а элемент SA1 – электронный ключ, управляемый цепью слежения, выполненный на основе триггера Шмитта.

На рис. 7 представлена осциллограмма напряжения на выходе цепи управления системы ФАП, лежащей в основе модифицированного нейроноподобного генератора.

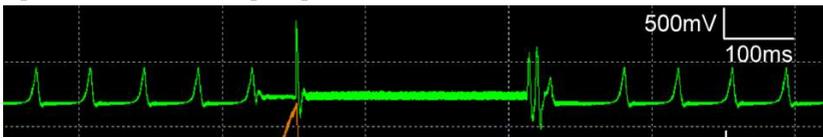


Рис. 7. Пример экспериментально записанной осциллограммы на выходе цепи управления при переходе системы от автоколебательного к возбудимому режиму и обратно.

Представленная осциллограмма отражает процесс перехода от автоколебательного режима к возбудимому и обратно, осуществлённый путём принудительного изменения параметра Y от положительного значения к отрицательному, при этом на осциллограмме регулярные колебания сменились на постоянный сигнал. После установления возбудимого режима параметр Y был возвращён в область положительных значений и колебания восстановились.

Таким образом, в модифицированной модели нейроноподобного генератора показано существование возбудимого режима. Для доказательства сохранения исходной колебательной динамики в модифицированной модели нейроноподобного генератора в случае разомкнутого ключа построены разбиения пространства параметров на области, приведённые на рис. 8.

Результаты, полученные в экспериментальном исследовании модифицированной модели нейроноподобного генератора на основе системы ФАП, качественно похожи на результаты исследований математической модели (1).

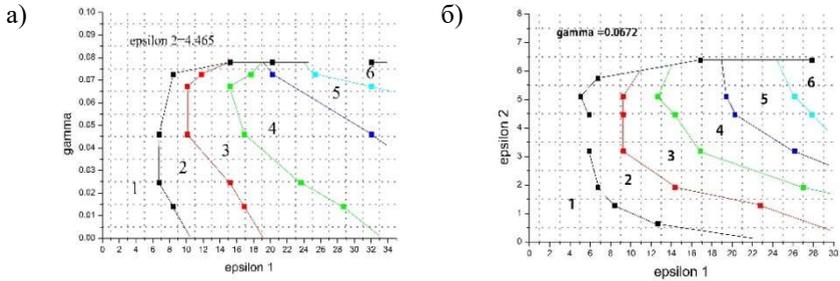


Рис. 8. Области существования динамических режимов модифицированного нейроноподобного генератора в пространстве параметров при фиксированном параметре $\epsilon_2=4,465$ (а) и фиксированном $\gamma=0,0672$ (б).

Проведено исследование модифицированной модели в возбуждимом режиме. В возбуждимом режиме модель нейроноподобного генератора находится в состоянии равновесия. Для того, чтобы система покинула состояние равновесия, необходимо оказать воздействие на генератор. Данное воздействие направлено на исчезновение данного состояния равновесия, что легко достигается изменением значения параметра γ в положительную сторону.

В результате исследования модели в возбуждимом режиме получена зависимость минимальной площади импульса S , необходимой для возбуждения отклика в нейроноподобном генераторе, от значения параметра γ , определяющего удаленность в пространстве параметров от границы автоколебательного режима. При уменьшении γ нужно подавать больший по площади импульс для выведения системы из состояния равновесия.

Разработана математическая модель нейроноподобного генератора на основе системы ФАП с модифицированной цепью управления. Данная математическая модель представлена системой дифференциальных уравнений (2):

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{d\tau} = y, \frac{dy}{d\tau} = z \\ \epsilon_1 \epsilon_2 \frac{dz}{d\tau} = \gamma - (\epsilon_1 + \epsilon_2)z - (1 + \epsilon_2 \cos\varphi + S \epsilon_2 \cos\varphi)y - S \sin\varphi \end{cases} \quad (2)$$

где $S = \begin{cases} 1, & \text{при } U_{\text{упр}} \geq U_{\text{пор2}} - (U_{\text{пор2}} - U_{\text{пор1}}) * S_{\text{old}} \\ 0, & \text{при } U_{\text{упр}} < U_{\text{пор2}} - (U_{\text{пор2}} - U_{\text{пор1}}) * S_{\text{old}} \end{cases}$

где ϵ_1, ϵ_2 параметры фильтра, γ – параметр начальной частотной расстройки системы ФАП, $U_{\text{упр}}$ – входное напряжение управления состоянием триггера Шмитта, поступающее с выхода фильтра нижних частот, $U_{\text{пор}}$ – напряжение,

на котором осуществляется переключение, S и S_{old} – параметры текущего и предыдущего состояния триггера Шмитта соответственно.

Система (2) отличается от системы (1) наличием слагаемого $\sin\varphi$ в случае, когда $S = 1$. В результате наличия данного слагаемого в системе (2), в отличие от системы (1), существуют два состояния равновесия, одно из которых устойчивое, а другое – седловое, в результате чего в системе реализуется режим глобальной асимптотической устойчивости, что в свою очередь ведет к возникновению синхронизации в системе ФАП, или иными словами возбудимого режима в нейроноподобном генераторе.

Четвертая глава посвящена исследованию коллективной динамики двух нейроноподобных генераторов, связанных через мемристивное устройство. В качестве мемристивного устройства использована модель мемристора второго порядка, построенная на основе динамической модели Чуа⁸. Кроме переменной состояния мемристора, которая отражает состояние проводимости мемристора, в модели учитывается переменная, отражающая концентрацию ионных ловушек в структуре мемристора. В работах⁹ [A4] было проведено теоретическое и экспериментальное исследование такого мемристивного элемента и показано, что он демонстрирует эффект частотной зависимости, связанный с заполнением и опустошением ионных ловушек.

В рамках работы проведено исследование проводимости мемристивного элемента, находящегося под воздействием нейроноподобного генератора в различных динамических режимах. Была установлена нелинейная зависимость перестройки переменной проводимости мемристора от частоты импульсов нейроноподобного генератора.

При экспериментальном исследовании влияния пачечной активности обнаружено, что эффект изменения проводимости мемристора происходит неравномерно в ответ на импульсы в пачке и сильно зависит от конкретного набора импульсов в пачке. Это справедливо и при хаотическом пачечном воздействии с переменным числом и переменной амплитудой импульсов. С одной стороны, это связано с вариациями амплитуд импульсов внутри пачки, а с другой – влиянием накапливающегося заряда на ловушках, что приводит к увеличению потенциального барьера для миграции ионов. Последний эффект возникает лишь при достаточной частоте следования импульсов, когда ловушки не успевают полностью опустошаться.

Проведена проверка возможности синхронизации двух нейроноподобных генераторов, соединённых однонаправленной связью

⁸ Chua L. O., Kang S. M. //Proceedings of the IEEE. 1976. V. 64. №. 2. P. 209-223.

⁹ Mikhaylov A. et al. //Advanced Materials Technologies. 2020. V. 5. №. 1. P. 1900607.

через мемристивный элемент. Выявлено, что в случае взаимодействия двух нейроноподобных генераторов, находящихся в автоколебательном режиме с различными собственными частотами, ведущий нейрон последовательно каждым спайком изменяет состояние мемристора в сторону увеличения проводимости, что, в свою очередь, приводит к увеличению тока, протекающего через мемристор, и, как следствие, к увеличению силы взаимодействия двух нейронов. Такое увеличение силы взаимодействия делает возможным синхронизацию двух нейронов, что подтверждается совпадением частот колебаний и медленным изменением разности фаз колебаний. Но в дальнейшем состояние мемристивного элемента продолжает смещаться в сторону проводящего состояния, и слишком сильная связь нарушает синхронизацию. Из анализа результатов данного исследования следует, что синхронизация двух связанных нейроноподобных генераторов имеет временный характер и сильно зависти от текущего состояния мемристивного элемента.

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

Выводы

В рамках выполнения задач, поставленных в данной работе, спроектирована и выполнена электронная реализация нейроноподобного генератора на основе системы ФАП. На электронном генераторе получены осциллограммы сигналов, имеющие прототипы в реальных нейрофизиологических экспериментах. Наблюдаемые экспериментально динамические режимы полностью повторяют динамику математической модели. Построены разбиения пространства параметров на области существования основных динамических режимов аппаратной реализации генератора, совпадающие с областями существования этих режимов в исходной математической модели. Получены и исследованы осциллограммы откликов нейроноподобного генератора на внешнее периодическое воздействие.

Выполнена реконструкция параметров исходной математической модели генератора ФАП с полосовым фильтром по экспериментально полученным данным. Результат реконструкции математической модели нейроноподобного генератора по временным рядам аппаратной модели показал хорошее совпадение параметров этих моделей.

Проведена модификация цепи управления системы ФАП с целью добавления в систему возбудимого режима. В цепь управления системы ФАП добавлен электронно-управляемый ключ и цепь управления для этого ключа в виде триггера Шмитта. На генераторе с модифицированным фильтром продемонстрировано сохранение всех основных режимов генерации. Проведено исследование перехода генератора в возбудимый

режим и обратно в режим автоколебаний. Показано, что решающую роль при этом переходе оказывает площадь подаваемого стимула. На основе электрической принципиальной схемы генератора с модифицированным фильтром была записана математическая модель, учитывающая функцию переключения.

Получены нелинейные частотные значимости проводимости мемристивного элемента в результате действия на него импульсов подаваемых с нейроноподобного генератора на основе системы ФАП. Исследована коллективная динамика двух нейроноподобных генераторов, связанных через мемристивное устройство, и показано, что при такой организации связи возможна синхронизация, причем синхронизация носит временный характер вследствие постоянного изменения характеристики проводимости мемристивного элемента.

Список публикаций автора по теме диссертации

Публикации в изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, а также в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК:

- A1. Мищенко М.А., **Большаков Д.И.**, Матросов В.В. Аппаратная реализация нейроподобного генератора с импульсной и пачечной динамикой на основе системы фазовой синхронизации //Письма в Журнал технической физики. – 2017. – Т. 43. – №. 13. – С. 10-18.
- A2. **Большаков Д.И.**, Мищенко М.А., Матросов В.В., Сысоев И.В. Электронный нейроподобный генератор с возбудимым и автоколебательным режимом на основе системы фазовой автоподстройки частоты //Письма в Журнал технической физики. – 2022. – Т. 48. – №. 9. – С. 23-26.
- A3. Mishchenko M.A., **Bolshakov D.I.**, Vasin A.S., Matrosov V.V., Sysoev I.V. Identification of Phase-Locked Loop System from Its Experimental Time Series //IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2022– V. 69. – №. 3. – P. 854-858.
- A4. Mishchenko M.A., **Bolshakov D.I.**, Lukoyanov V.I., Korolev D.S., Belov A.I., Guseinov D.V., Matrosov V.V., Kazantsev V.B., Mikhaylov A.N. Inverted spike-rate-dependent plasticity due to charge traps in a metal-oxide memristive device //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2022 – V. 55. – № 39. – P. 394002

Результаты работы опубликованы в 24 работах в сборниках трудов конференций:

- A5. M.A Mishchenko, **D.I Bolshakov**, V.V Matrosov, I.V Sysoev, Excitation of electronic neuron-like generator with pulse stimulation //Computational Biophysics and Nanophotonics. – SPIE, 2022. – Т. 12194. – С. 45-50.
- A6. M.A Mishchenko, **D.I Bolshakov**, V.V Matrosov, I.V Sysoev Electronic neuron-like generator with excitable and self-oscillating behavior //2021 5th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – IEEE, 2021. – С. 137-138.
- A7. Сысоев И. В. **Большаков, Д. И.**, Мищенко, М. А., Матросов В.В. Электронный нейроподобный генератор с возбудимым и автоколебательным режимом. – 2021. – С. 104-105.
- A8. Васин, А. С., **Большаков, Д. И.**, Мищенко, М. А., Сысоев, И. В. Нейроподобный генератор с возбудимыми автоколебательным режимом //Нелинейные дни в Саратове для молодых-2021. – 2021. – С. 66-67.

- A9. Васин А.С., **Большаков Д.И.**, Мищенко М.А., Сысоев И.В. Аппаратная реализация связи двух нейроподобных генераторов на основе ФАПЧ // Труды XXV научной конференции по радиофизике. материалы докладов. Нижний Новгород, – 2021. – С. 201–202.
- A10. **Большаков Д.И.**, Васин А.С., Белов А.И., Матросов В.В., Мищенко М.А., Михайлов А.Н. Исследование динамики двух последовательно соединенных нейроподобных генераторов с однонаправленной мемристивной связью// Труды XXV научной конференции по радиофизике. материалы докладов. Нижний Новгород, – 2021. – С. 445-446.
- A11. **Bolshakov D.I.**, Vasin A.S., Belov A.I., Matrosov V.V., Mishchenko M.A., Mikhaylov A.N. Hardware implementation of pulse coupling for electronic neuronlike generator connection // 3rd International Conference Volga Neuroscience Meeting 2021. Abstracts book, – 2021, – С. 65-66.
- A12. Vasin A.S., **Bolshakov D.I.**, Matrosov V.V., Mishchenko M.A., Sysyoev I.V. Experimental investigation the dynamic of two hardware neuron models connected through memristive element // 3rd International Conference Volga Neuroscience Meeting 2021. Abstracts book, – 2021, – С. 91-93.
- A13. **Большаков Д. И.**, Мищенко М. А., Матросов В. В. Исследование аппаратной реализации нейроподобного генератора с возбудимым и автоколебательным режимом // Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. – 2020. – С. 64-66.
- A14. **Большаков, Д. И.**, Деревяшкин, В. П., Мищенко, М. А., Матросов, В. В. Исследование нейроподобного генератора с возбудимым и автоколебательным режимом // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. – 2020. – С. 43-44.
- A15. **Большаков, Д. И.**, Деревяшкин, В. П., Мищенко, М. А., Матросов, В. В. Исследование нейроподобного генератора с возбудимым и автоколебательным режимом // Труды XXIV научной конференции по радиофизике, посвященной посвящённой 75-летию радиофизического факультета. – 2020. – С. 171-174.
- A16. **Большаков Д. И.**, Мищенко М. А., Матросов В. В. Нейроподобный генератор с возбудимым и автоколебательным режимом // Труды XXIII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения НА Железцова. – 2019. – С. 214-217.
- A17. **Большаков Д.И.**, Матросов В.В., Мищенко М.А. Нейроподобный генератор с возбудимым и автоколебательным режимами // Материалы XII Международной школы-конференции “Хаотические автоколебания и образование структур” (ХАОС-2019), – 2019, – С. 26-27
- A18. **Bolshakov, D.I.**, Zhukova, N.S., Mishchenko, M.A., Matrosov, V.V. Experimental investigation of hardware neuron model // Opera Medica et Physiologicathis link is disabled, – 2018, – Т.4, – С. 99-100.
- A19. Mishchenko, M.A., Zhukova, N.S., **Bolshakov, D.I.**, Matrosov, V.V. Excitability and synchronization of phase-controlled neuron-like generator // Opera Medica et Physiologicathis link is disabled, – 2018, – Т.4, – С. 61-62.
- A20. **Большаков Д. И.**, Мищенко М. А., Матросов В. В. Исследование динамических режимов аппаратной реализации нейроподобного генератора на основе системы ФАПЧ // XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки). – 2018. – С. 6.
- A21. **Большаков Д. И.**, Мищенко М. А., Матросов В. В. Разработка аппаратной реализации и экспериментальное исследование модели нейроподобного генератора на основе системы ФАПЧ // Труды XXII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию Нижегородской радиолaborатории. – 2018. – С. 212-213.
- A22. **Большаков Д. И.**, Мищенко М. А., Матросов В. В. Нейроподобный генератор с импульсной и пачечной динамикой // XVIII научная школа «НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ – 2018». Тезисы докладов молодых ученых – 2018. – С. 23-24.

- A23. **Большаков Д. И.**, Мищенко М. А., Матросов В. В. Экспериментальное исследование динамики нейроподобного генератора на базе системы фазовой автоподстройки частоты //Труды XXI научной конференции по радиофизике. – 2017. – С. 141-142.
- A24. **Большаков Д. И.**, Мищенко М. А., Матросов В. В. Экспериментальное исследование динамики нейроподобного генератора с импульсной и пачечной динамикой //Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. – 2017. – С. 20-21.
- A25. **Большаков Д. И.**, Мищенко М. А. Аппаратная модель генератора нейроподобных колебаний //XXII Нижегородская сессия молодых ученых (естественные, математические науки). – 2017. – С. 10-11.
- A26. **Большаков Д. И.**, Мищенко М. А. Устройство для генерации нейроподобных колебаний //XVII научная школа «НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ – 2016». Тезисы докладов молодых ученых – 2016. – С. 103.
- A27. **Большаков Д.И.**, Мищенко М.А. Аппаратная модель нейрона с импульсной и пачечной динамикой // Материалы XI Международной школы-конференции “Хаотические автоколебания и образование структур” (ХАОС-2016), – 2016, – С. 78
- A28. **Большаков Д. И.**, Мищенко М. А. Макет устройства для генерации нейроподобных колебаний //Труды XIX научной конференции по радиофизике, посвященной 70-летию радиофизического факультета. – 2015. – С. 106-108.