

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО Национальный
исследовательский университет
«МЭИ»

доктор технических наук, профессор

В. К. Драгунов

11 2022



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» на диссертационную работу Большакова Дениса Ивановича «Электронное моделирование и исследование динамики нейроподобного генератора на базе системы фазовой автоподстройки частоты», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.5 – Физическая электроника и научной специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Актуальность диссертационной работы

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. 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.

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.

Диссертационная работа Большакова Д.И. посвящена электронному моделированию нейроподобных генераторов с использованием систем фазовой автоподстройки частоты (ФАП) и их ансамблей, а также анализ их динамики.

В основе работы лежит электронное моделирование предложенной ранее математической модели нейроподобного генератора на основе системы ФАП, способной демонстрировать автоколебательные режимы различной сложности, в том числе импульсные и пачечные типы колебаний, характерные для реальных нейронов. 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 генераторов. Отдельно стоит отметить, что богатая динамика нейронных сетей мозга определяется не только динамикой отдельных элементов сети, но и динамическим изменением силы межэлементного взаимодействия — эффектом, называемым синаптической пластичностью. Адаптация сети под внешнее воздействие в виде динамического изменения связей в нейронных сетях мозга считается основным механизмом обучения. Электронным

элементом, способным выполнять роль синапса и воспроизводить эффекты синаптической пластичности, является мемристивное устройство.

В связи со всем вышесказанным, разработка электронных нейронов и их сетей и исследование их динамики, освещаемые в диссертационной работе Большакова Д.И., являются актуальной и востребованной задачей.

Научная новизна работы

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 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 мемристивного элемента для связывания генераторов в ансамбль и исследования коллективной динамики.

Значимость для науки и практики

Диссертационная работа Большакова Д.И. несомненно имеет высокую фундаментальную и практическую значимость. В фундаментальном аспекте исследование Большакова Д.И. показало возможность воспроизведения нейроноподобных динамических режимов, в том числе режимы коллективной динамики в полупроводниковых устройствах 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. С практической точки зрения, предложена возможность 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.

Ключевые положения диссертационного исследования могут быть включены в образовательный процесс студентов высших учебных заведений физического и инженерного профилей.

Структура диссертации

Диссертационная работа Большакова Д.И. изложена на 121 странице машинописного текста, включающего достаточное количество иллюстративного материала (53 рисунка). Структура диссертации классическая, содержит введение, четыре главы, заключение, выводы и список литературы, включающий 189 источников.

Во **введении** диссертант приводит убедительные доказательства актуальности проводимого исследования, четко сформулированы цели и задачи, приведена общая характеристика работы. Приводится краткий обзор литературы по тематике исследования и описывается научная новизна и научно-практическая значимость диссертационной работы.

В **первой главе** проведена разработка электронной модели нейроподобного генератора на базе системы ФАП с полосовым фильтром, исследованию возможных режимов генерации и исследованию динамики данной модели под внешним воздействием.

Во **второй главе** описана разработка метода реконструкции параметров математической модели нейроподобного генератора по

временным рядам электронного генератора с целью верификации модели. С помощью модификации методов реконструкции по временным рядам к особенностям рассматриваемой модели нейроподобного генератора показано количественное соответствие параметров, определенных через реконструкцию, значениям параметров, вычисленных из номиналов элементов электронной модели нейроподобного генератора. Доказано количественное соответствие математической и электронной моделей.

Третья глава посвящена электронной реализации модели нейроподобного генератора на основе системы ФАП с модифицированной цепью управления, исследованию её динамики и выводу математической модели. Модификация цепи управления выполнена с целью добавления к известным автоколебательным режимам возбудимого режима, характерного и важного для динамики нейронов мозга. Показана возможность генерации колебаний в возбудимом режиме при внешней импульсной стимуляции.

Четвертая глава посвящена исследованию коллективной динамики двух нейроподобных генераторов, связанных через мемристивное устройство. Обнаружен и исследован эффект частотной зависимости мемристивного устройства, связанный с заполнением и опустошением ионных ловушек. Показана возможность синхронизации колебаний двух нейроподобных генераторов, соединенных через мемристивное устройство. Обнаружено, что синхронизация двух связанных нейроподобных генераторов имеет временный характер и сильно зависит от текущего состояния мемристивного элемента.

В разделе «**Заключение**» диссертантом в лаконичной форме обобщены проведенные исследования и полученные результаты. **Выводы** диссертационного исследования логически вытекают из изложенных результатов, соответствуют поставленным в работе цели и задачам.

Достоверность и обоснованность положений и выводов диссертации

Диссертационная работа выполнена с использованием при анализе динамики математических моделей качественно-численных методов теории нелинейных колебаний и теории бифуркаций. Полученные экспериментальные результаты импульсной активности разработанных электронных нейронов совпадают с результатами численного моделирования. Изложенные в диссертации результаты совпадают с результатами исследований отечественных и зарубежных авторов в данной области. На основании полученных данных диссертантом сделаны обоснованные выводы. Проведенные исследования были выполнены на мировом уровне, достоверность представленных в работе результатов не вызывает сомнений.

Освещение диссертации в научной печати

Результаты диссертационной работы Большакова Д.И. были представлены научному сообществу в виде докладов на всероссийских и международных конференциях, а также опубликованы в 28 научных работах, в число которых входят 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых базами данных Web of Science и Scopus. Следует особо отметить, что две статьи опубликованы в журналах первого квартиля (Journal of Physics D: Applied Physics, импакт фактор 3.178; IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, импакт фактор 3.691).

Информация, представленная в автореферате, полностью отражает содержание теоретических и практических положений диссертации, выводы идентичны.

Замечания и вопросы к содержанию диссертационной работы

В целом диссертационная работа производит благоприятное впечатление, недостатков принципиального характера в содержании работы, основных положениях и выводах рассматриваемой работы нет.

Комментарии и вопросы, представленные ниже, вызваны интересом к представленным материалам и предложенным объяснениям:

1) В диссертации (стр. 34, рис. 15) изображена структура системы ФАПЧ с полосовыделяющим фильтром ПВФ в цепи управления ГУН в виде последовательного включения развязанных двухзвенных фильтров ФНЧ и ФВЧ. Из текста диссертации не ясно, чем полосовыделяющий фильтр ПВФ на рис. 15 отличается от полосового фильтра в заголовках всех трёх глав и от типового полосно-пропускающего фильтра ППФ, например, от встречно-штыревой микрополосковой СВЧ структуры с разделением по постоянному току?

2) В заключении на стр. 98 результатом работы называется получение «электронных значимостей» проводимости мемристивного элемента; в других местах говорится о получении «нелинейных частотных зависимостей» проводимости мемристивного элемента. В тексте диссертации нет подробного пояснения значения этих терминов и физического смысла связанных с ними явлений.

3) В тексте диссертации есть ряд опечаток, стилистические ошибки и неточности. Имеются нарушения требований национальных стандартов Российской Федерации ГОСТ 2.105-95, ГОСТ Р 7.0.11-2011 и ГОСТ Р 7.0.100-2018.

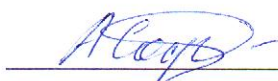
Следует подчеркнуть, что высказанные замечания не носят принципиального характера и не снижают научной и практической ценности работы.

Заключение

Принимая во внимание актуальность выполненной работы, ее научную новизну, обоснованность выводов, а также их существенную фундаментальную и практическую значимость, можно заключить, что диссертационная работа Большакова Дениса Ивановича «Электронное моделирование и исследование динамики нейроноподобного генератора на базе системы фазовой автоподстройки частоты» представляет законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком методическом уровне, которая полностью соответствует требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.3.5. – «Физическая электроника» и 1.3.4 – «Радиофизика». Диссертационная работа была заслушана и обсуждена на заседании научного семинара кафедры формирования и обработки радиосигналов Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Национального исследовательского университета МЭИ» «2» ноября 2022 года (протокол № 11).

Кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой формирования
и обработки радиосигналов
Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет "МЭИ"»

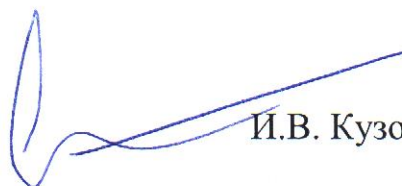
Сафин Ансар Ризаевич



1 Сафин АР

Подпись А.Р. Сафина заверяю

Ученый секретарь Ученого совета НИУ «МЭИ»



И.В. Кузовлев

Реквизиты организации:

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), Радиотехнический факультет, кафедра Формирования и обработки радиосигналов

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, дом 14.

Тел. +7(495)362-70-01

Факс: +7 495 362-89-38

Эл. Почта: SafinAR@mpei.ru

Сайт: <http://mpei.ru>