

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Кипелкина Иван Михайловича «Генерация и передача сигналов в нейроноподобных генераторах с мемристивной нелинейностью», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Диссертационная работа Кипелкина Ивана Михайловича посвящена одному из самых интересных и перспективных, на мой взгляд, направлений современной науки – разработке электронных систем, воспроизводящих процессы обработки, передачи и хранения информации. Фактически, его исследование решает задачу переноса основных принципов функционирования мозга на «новую элементную базу». Это несомненно важная и *актуальная* задача, что подтверждается непрерывно возрастающим интересом научного сообщества, стремительным ростом числа публикаций в области нейроморфных систем, а также появлением не только отдельных оригинальных идей, но и целых научных направлений, таких как нейродинамика, нейроинженерия и нейроробототехника. В ходе выполнения работы диссертантом были предложены и изучены новые типы нейроноподобных элементов на основе нового электронного устройства микроэлектроники — мемристора. Была продемонстрирована возможность генерации и синхронизации колебаний в таких элементах. При этом, эта, очевидно, междисциплинарная работа на стыке различных научных областей и современных инженерных решений широко использует радиофизические методы исследования. Это позволяет уверенно заключить, что представленная диссертация и полученные в ней результаты *полностью соответствуют специальности 1.3.4 «Радиофизика»*.

Диссертационная работа состоит из введения, трех основных глав и заключения. Общий объем работы составляет 114 страниц.

Во **введении** подробно обосновывается актуальность работы, её новизна, формулируется цель и поставленные задачи для её достижения, обосновывается новизна, приведены положения, выносимые на защиту, указаны сведения о теоретической и практической значимости работы, личном вкладе автора, публикации и апробации полученных результатов.

Первая глава диссертационной работы посвящена разработке математической и экспериментальной нейромодели ФитцХью–Нагумо на основе нелинейности, использующей мемристивное устройство, изготовленное на окисленной кремниевой подложке с использованием метода магнетронного распыления. Изучен механизм мягкого рождения автоколебаний через суперкритическую бифуркацию Андронова–Хопфа и проанализирована зависимость положения точки бифуркации от площади электродного контакта мемристивного устройства. Математически и экспериментально продемонстрированы автоколебательная и возбудимая нейроноподобная динамика.

Вторая глава диссертационной работы посвящена исследованию однонаправленной связи в автогенераторной системе, соединенной резистивным и мемристивным компонентами. Эти компоненты функционально аналогичны физическому и химическому синапсам. В данной главе выполнено обоснование выбора значений параметров применяемых мемристивных устройств и разработанной автогенераторной системы, а также представлены дополнительные результаты тестирования созданных моделей. Установлено, что мемристивное устройство, под действием сигнала пресинаптического электрического нейрона обладает свойством синаптической пластичности. Математически и экспериментально получены режимы вынужденной синхронизации с соотношением частот $1:1$, $2:1$, $3:1$, $M:1$, где M – целое число от 4 до 7.

Третья глава диссертационного исследования посвящена разработке потенциал-зависимых ионных каналов в математической модели и электронной схемы нейронного осциллятора с использованием двух мемристивных устройств. В рамках исследования автором реализованы три ключевых режима возбудимости нейронов: режим генерации одиночного спайка; режим автоколебаний со стабильным предельным циклом, демонстрирующий периодические последовательности спайков; а также бистабильность между фиксированной точкой и предельным циклом. Кроме того, в ходе работы была выявлена спайк-берстовая активность, наблюдаемая как в математической, так и в электронной моделях. Установлено, что подобная активность возникает исключительно при использовании двух мемристивных устройств, подключенных встречно-параллельно. При моделировании синаптической передачи был воспроизведен постсинаптический ответ, индуцированный периодическим импульсным воздействием.

В **Заключении** приведено обобщение проведенных исследований и результатов. Выводы диссертационного исследования соответствуют поставленным в работе цели и задачам и логически вытекают из изложенных результатов.

Работа Кипелкина И. М. производит положительное впечатление. Сильной стороной работы, отражающей ее *научную новизну*, является применение диссертантом комплексного подхода к исследованию, выраженного в сочетании теоретического и экспериментального подходов. В диссертации разрабатываются и исследуются математические модели и электронные устройства функционирующих нейроноподобных элементов, использующих влияние нелинейных эффектов, лежащих в основе мемристивных устройств.

Исследуемая тема имеет не только значительное *фундаментальное*, но и *прикладное значение*, что особенно важно, например, для медицинских приложений. Работа вносит существенный вклад в развитие теоретических основ и методов исследования мемристивных устройств и нейроноподобных систем, что позволяет углубить понимание как физических, так и математических основ их работы. Разработка моделей

мемристивных элементов с нелинейными характеристиками и полученные результаты создают условия для анализа процессов генерации, передачи и обработки сигналов в когнитивных системах и устройствах с искусственным интеллектом.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обеспечиваются методами теории нелинейных колебаний, численного моделирования и экспериментальных исследований. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в высокоимпактных научных журналах (два из них из первого квартиля WoS), широко представлялись на российских и международных конференциях, а также хорошо согласуются с работами отечественных и зарубежных учёных.

Тем не менее, к диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

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

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

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

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

5. Во 2-й главе, во время изучения вынужденной синхронизации нейроноподобных элементов, вводятся параметры R , F , которые являются коэффициентом связи для резистивного и мемристивного подключения. Остаётся не до конца ясным, в каких диапазонах значений данных

параметров наблюдаются режимы синхронизации. Хотелось бы увидеть диаграммы с языками Арнольда.

Отмечу, что все приведенные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общую высокую оценку проделанной работы соискателем ученой степени.

Диссертационная работа Кипелкина И.М. выполнена на высоком научном уровне, обладает четкой структурой, написана ясным и понятным языком, что способствует хорошему восприятию материала. Автореферат полно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Кипелкина Ивана Михайловича полностью удовлетворяет всем требованиям пп. 9-11, 13-14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Официальный оппонент:

Ведущий научный сотрудник
Института когнитивных нейронаук,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», г. Москва,
кандидат физико-математических наук
01.04.03 «Радиофизика»
«06» мая 2025 г.

Захаров Денис Геннадьевич

Я, Захаров Денис Геннадьевич, даю согласие на обработку моих персональных данных (Приказ Минобрнауки России от 01.07.2015 №662) и на включение моих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени кандидата физико-математических наук Кипелкина Иван Михайловича.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Почтовый адрес: 101000, г. Москва, пер. Кривоколенный, д.3

Телефон: +7 (920) 010-24-08

Адрес электронной почты: dgzakharov@hse.ru

Подпись ведущего научного сотрудника центра нейроэкономики и когнитивных исследований
исследовательского института когнитивных нейронаук ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
кандидата физико-математических наук (1.4.3. – «Радиофизика») удостоверяю.

Подпись заверяю

