

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Борданова Ильи Алексеевича на тему «Модели и алгоритмы оценки функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Актуальность темы исследования. Диссертационная работа Борданова И.А. посвящена решению важной научно-технической проблемы – разработке алгоритмов и моделей оценки функциональной корректности аппаратно реализованных нейронных сетей на перспективной элементной базе, в качестве которой выступают мемристивные устройства. Переход к парадигме «вычислений в памяти» рассматривается мировым научным сообществом как один из возможных путей преодоления проблем архитектуры Джона фон Неймана, за счет объединения вычислителя и памяти в единое устройство. Мемристивные устройства, сочетающие свойства энергонезависимого хранения и аналоговой обработки данных, являются ключевым элементом данного направления, позволяя осуществлять энергонезависимое хранение весовых коэффициентов синапсов нейронов в виде сопротивлений и выполнять матричное умножение в кроссбар массивах таких устройств за один шаг. Однако их практическое использование сдерживается вариациями параметров, которые приводят к изменению значений весов синапсов нейронов, и соответственно к непредсказуемому изменению функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристивных устройств (ИНСМ). Существующие методы оценки функциональной корректности ИНСМ либо требуют больших вычислительных ресурсов (схемотехническое моделирование), либо оперируют упрощенными вероятностными моделями, не учитывающими аппаратные особенности и процессы задания сопротивлений мемристивных устройств. В этой связи тема диссертации, направленная на создание моделей и алгоритмов, связывающих параметры сигналов задания сопротивления мемристивного

устройства с итоговыми метриками функциональной корректности, является несомненно актуальной.

Объектом исследования выбраны искусственные нейронные сети на базе мемристивных устройств, а **предметом** – модели и алгоритмы оценки функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристивных устройств.

Для решения поставленной цели логично определены частные задачи исследования:

1. Разработка модели и алгоритма моделирования зависимости сопротивления мемристивного устройства от параметров сигналов его задания.

2. Разработка модели и алгоритма моделирования зависимости веса синапса нейрона от сопротивления мемристивного устройства и схемы формирования веса.

3. Разработка алгоритма оценки функциональной корректности ИНСМ для задачи классификации и архитектур сверточных, рекуррентных и полносвязных сетей прямого распространения на основе метрики оценки доли правильных исходов с учетом выбранных параметров сигналов задания сопротивлений мемристивных устройств и параметров реально заданных сопротивлений, схемы формирования веса и максимально допустимых напряжений на выходе нейронов.

Научная новизна результатов диссертации

В диссертации получены новые научные результаты, к которым относится следующее:

1. Разработана новая модель и алгоритм моделирования зависимости сопротивления мемристивного устройства от параметров сигналов его задания, отличающиеся тем, что данная зависимость описывает не функциональную взаимосвязь между параметрами сигналов и физическими процессами в мемристоре при прохождении данного сигнала, а статистическую взаимосвязь между параметрами сигнала задания

сопротивления и конечным значением сопротивления, и позволяющие рассчитать погрешность задания сопротивления мемристора.

2. Разработана новая модель и алгоритм моделирования зависимости веса синапса нейрона от сопротивления мемристивного устройства и схемы формирования веса, отличающиеся от существующих тем, что вес представляется не аналитической зависимостью между электрическими параметрами цепи, а статистической зависимостью между сопротивлением и весом, и позволяющие рассчитать погрешность задания веса ИНСМ.

3. Разработан оригинальный алгоритм оценки функциональной корректности ИНСМ, отличающийся от существующих тем, что погрешности весов различны для каждого номинального значения веса и определяются из моделей зависимости погрешности веса от сопротивления и параметров сигнала задания сопротивления, а также тем, что в нем учитываются ограничения максимально допустимых рабочих напряжений на входе сети, и позволяющий оценить функциональную корректность ИНСМ максимально приближенно к реальному устройству.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выносимые на защиту, являются обоснованными. Автором выполнен глубокий анализ современного состояния исследований (115 источников), выявлены ключевые противоречия существующих подходов и корректно сформулирована гипотеза исследования. Разработанные модели базируются на представительных экспериментальных выборках, полученных на реальных мемристивных устройствах с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса. Применение методов теории планирования эксперимента и математической статистики обеспечило корректность построения регрессионных зависимостей. Выводы по работе логически следуют из полученных результатов и не содержат внутренних противоречий. Достоверность подтверждена сопоставлением результатов

компьютерного моделирования с данными натуральных экспериментов с реальными мемристивными устройствами для четырёх различных тестовых задач и трёх архитектур нейронных сетей, при этом расхождение не превышает 3 %.

Достоверности также подтверждается апробацией основных результатов на шести международных и всероссийских научных конференциях. Полученные результаты опубликованы в 14 научных трудах, из которых 4 статьи – в ведущих рецензируемых изданиях из перечня ВАК и 4 публикации – в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в развитии системного подхода к анализу нейроморфных вычислителей, установлении количественных закономерностей влияния режимов программирования мемристоров на точность нейросетевых алгоритмов. Полученные результаты углубляют понимание механизмов возникновения погрешностей в ИНСМ и создают основу для оценки влияния данных погрешностей на функциональную корректность ИНСМ.

Практическая значимость подтверждается созданием программно-аппаратного комплекса, внедрённого в научно-исследовательскую деятельность ННГУ им. Н.И. Лобачевского, учебный процесс МИ ВлГУ и производственную практику ООО «Поликетон». Разработанные модели и алгоритмы позволяют на этапе проектирования спрогнозировать функциональную корректность ИНСМ и подобрать оптимальные параметры для маппинга весовых коэффициентов синапсов нейронов.

Замечания по диссертационной работе

1. В качестве модели мемристора автором была выбрана математическая модель «Bioplek». Однако автор не приводит критерии выбора данной модели касаясь поставленных в диссертационном исследовании задач и

множества моделей, из которого была выбрана данная модель. Кроме того, не показана применимость разработанного автором метода моделирования на других классах моделей мемристоров, например, с табличными функциями изменения параметра состояния.

2. Автор использует нормальное распределение для моделирования вариации сопротивлений мемристоров, но в диссертационном исследовании не указывается критерий выбора данного закона распределения. Не указано, каким образом проверяется постоянство закона распределения для различных экспериментов мемристора.

3. Отсутствует обоснование выбора именно кусочно-линейной и кусочно-кубической интерполяции для построения моделей, не рассмотрены альтернативные методы интерполяции, которые потенциально могли бы обеспечить более высокую точность.

4. В работе не исследована чувствительность предложенных моделей к объему статистической выборки — неясно, какое минимальное количество экспериментов и параллельных опытов требуется для достижения заявленной точности.

5. На странице 71 приведены характеристики ПАК, однако отсутствуют сведения об ошибке измерения сопротивления мемристивных устройств.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, носят рекомендательный характер и могут быть учтены автором в дальнейших исследованиях.

Заключение

Диссертационная работа Борданова Ильи Алексеевича является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития методов системного анализа и оценки качества нейроморфных вычислителей на базе мемристивных устройств.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Основные результаты в достаточной мере опубликованы в 14 научных

трудах, включая 4 статьи в изданиях из перечня ВАК и 4 публикации, индексируемые в Scopus/Web of Science, а также тремя свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ.

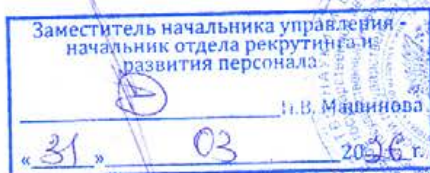
Диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Борданов Илья Алексеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры прикладной и технической физики ТюмГУ

С.Ю. Удовиченко

31.03. 2026

Подпись Удовиченко С.Ю. заверяю



Сведения об оппоненте: Удовиченко Сергей Юрьевич, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, (научная специальность 01.04.08 «Физика плазмы»), профессор, научный руководитель лаборатории мемристорных материалов, профессор кафедры прикладной и технической физики, руководитель НОЦ «Нанотехнологии» ТюмГУ.

Адрес: 625003, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Володарского, д.6
Телефон: 8 922 004 4674
E-mail: udotgu@mail.ru