

УТВЕРЖДАЮ



Директор  
НИИ «Курчатовский институт»  
д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН

Ю.А. ДЬЯКОВА

2026 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» 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 диссертационной работы

Диссертационная работа Борданова И.А. вносит вклад в решение актуальной научно-технической проблемы по совершенствованию моделей и алгоритмов оценки функциональной корректности искусственных нейронных сетей, аппаратно реализованных на базе мемристивных устройств. Актуальность данной темы обусловлена фундаментальными ограничениями классической архитектуры Джона фон Неймана, в которой разделение памяти и вычислителя приводит к высоким энергозатратам на передачу данных и ограничивает производительность при обработке больших массивов информации искусственными нейронными сетями. В этой связи парадигма «вычислений в памяти», где и память, и вычислитель являются одним устройством, рассматривается мировым научным сообществом как перспективный путь к решению данной проблемы и как способ создания энергоэффективных и высокопроизводительных нейроморфных систем.

Ключевым элементом данной парадигмы выступают мемристивные устройства, объединение которых в кроссбар-массивы позволяет аппаратно хранить весовые коэффициенты синапсов и одновременно выполнять матрично-векторное умножение в аналоговом виде за один шаг. Однако, как справедливо отмечено в диссертации, широкое практическое внедрение мемристоров сдерживается комплексом проблем, связанных с несовершенством их

электрофизических характеристик. К числу таких проблем относятся значительные вариации сопротивлений от цикла к циклу и от устройства к устройству, нелинейность процессов переключения, дрейф состояний и низкая воспроизводимость результатов задания сопротивления мемристивного устройства. Указанные неидеальности приводят к тому, что реальные синаптические веса в аппаратно реализованной нейронной сети отличаются от расчётных значений, полученных при обучении программной модели, что может вызывать непредсказуемое снижение метрик функциональной корректности нейросетевых вычислений.

Существующие подходы к оценке функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров (ИНСМ) либо требуют значительных вычислительных ресурсов (схемотехническое моделирование каждого мемристора для вычислителей, содержащих миллионы ячеек), либо оперируют грубыми вероятностными моделями с фиксированным разбросом весов, не учитывающими реальную взаимосвязь с параметрами сигналов задания сопротивления мемристивного устройства. При этом в современной научной литературе отсутствуют инженерные методы, позволяющие установить сквозную связь между параметрами сигналов задания сопротивления мемристивного устройства (амплитуда, длительность, количество импульсов), результирующими сопротивлениями мемристоров, погрешностями весовых коэффициентов и итоговыми метриками качества искусственных нейронных сетей на базе мемристоров (ИНСМ).

Таким образом, тема диссертационной работы, направленная на разработку моделей и алгоритмов, обеспечивающих статистическую взаимосвязь между параметрами сигналов задания сопротивления и функциональной корректностью ИНСМ с учётом ограничений аппаратной реализации, представляется несомненно актуальной и соответствует приоритетным направлениям развития отечественной микроэлектроники и нейроморфных вычислительных систем.

### **Анализ содержания диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав с выводами и заключением. Диссертация изложена на 120 страницах машинописного текста и содержит 40 рисунков, 18 таблиц и 2 приложения. Список литературы состоит из 115 источников, в том числе 14 публикаций автора.

Введение содержит обоснование актуальности работы, формулировку цели и задачи исследования, объекта и предмета исследования, методы исследования, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен системный анализ современных подходов к аппаратной реализации нейросетей и установлено, что мемристивные кроссбар-массивы, реализующие концепцию «вычислений в памяти», являются наиболее перспективной альтернативой архитектуре Джона фон Неймана, однако их широкое применение сдерживается вариабельностью характеристик и отсутствием моделей, связывающих параметры сигнала задания сопротивлений с итоговой точностью вычислений. На основе выявленных ограничений существующих методов оценки функциональной корректности сформулирована гипотеза о необходимости применения теории планирования эксперимента для установления статистической взаимосвязи между параметрами сигналов задания сопротивления, погрешностями весов и метриками качества ИНСМ.

Во второй главе разработаны два алгоритма и две взаимосвязанные модели: первая устанавливает статистическую зависимость сопротивления мемристора от параметров сигналов, вторая связывает вес синапса с сопротивлением и схемой формирования веса, причём обе модели позволяют решать как прямые задачи анализа, так и обратные задачи синтеза. Предложен оригинальный алгоритм оценки функциональной корректности ИНСМ, учитывающий ограничения по напряжению и использующий масштабирование выходов нейронов, а проведённое моделирование в LTSpice показало, что нелинейность процессов переключения на участке малых сопротивлений требует повышенной плотности экспериментальных точек и что погрешность веса может многократно превосходить погрешность исходных сопротивлений.

В третьей главе для апробации разработанных моделей и алгоритмов были выбраны мемристивные устройства, имеющие структуру  $\text{Au}/\text{Ta}/\text{ZrO}_2(\text{Y})/\text{Pt}/\text{Ti}$  и демонстрирующие стабильное биполярное переключение в диапазоне 0,5–1,5 В, а также представлен разработанный программно-аппаратный комплекс (ПАК), включающий 12-битные ЦАП/АЦП и коммутационную плату для работы с кроссбар-массивами  $32 \times 8$  1T1R. Программная часть ПАК реализована в виде кроссплатформенного приложения с графическим интерфейсом, обеспечивающего проведение многофакторных экспериментов, построение моделей по алгоритмам 1 и 2 как на реальных, так и на модельных данных, а также оценку функциональной корректности ИНСМ по алгоритму 3 и аппаратный инференс ИНСМ.

В четвертой главе на основе двухфакторного эксперимента построена модель зависимости сопротивления мемристоров на базе  $\text{ZrO}_2(\text{Y})$  от параметров сигналов, охватывающая диапазон 9–72 кОм, и на её основе – модель веса синапса для схемы из одного мемристора в диапазоне 0,04–0,25. При решении задачи классификации ирисов Фишера на многослойном персептроне получено

полное совпадение прогнозируемой и экспериментальной оценки, а для сверточной сети в задаче распознавания данных Fashion MNIST расхождение составило всего 0,001, при этом экспериментальный подбор масштабирующего коэффициента позволил повысить долю правильных исходов с 0,77 до 0,80. Для всех исследованных архитектур (полносвязной, сверточной, рекуррентной) отклонение результатов моделирования с применением алгоритма 3 от качества решения программной нейросети (без мемристоров) не превышает 3 %.

Заключение содержит обобщение результатов работы, выводы и рекомендации по дальнейшему применению разработанных алгоритмов и моделей.

### **Научная новизна**

Научная новизна работы Борданова И.А. заключается в следующем:

1. Разработаны статистическая модель и алгоритм установления 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. Разработаны модель и алгоритм моделирования зависимости веса синапса нейрона ИНСМ от сопротивления мемристивного устройства, а также схемы формирования веса, отличающиеся от существующих тем, что вес представляется не аналитической зависимостью между электрическими параметрами цепи, а статистической зависимостью между сопротивлением и весовым коэффициентом, которая позволяет 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. Соответственно, алгоритм позволяет 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 репрезентативных 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 научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечивается комплексным подходом к верификации результатов. Разработанные модели базируются на статистически представительных наборах экспериментальных данных (до 1000 повторений на каждую точку плана), полученных на реальных мемристивных устройствах со структурой Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y)/Pt/Ti. Статистическая обработка данных выполнялась с применением апробированных методов теории планирования эксперимента и математической статистики. Подтверждено совпадение модельных и экспериментальных распределений с доверительной вероятностью 0,95 по критерию Колмогорова-Смирнова. Высокая степень достоверности подтверждена сопоставлением результатов компьютерного моделирования по разработанным алгоритмам с данными натуральных испытаний для трёх различных архитектур нейронных сетей (полносвязной, свёрточной, рекуррентной) и четырёх тестовых наборов данных. Расхождение между прогнозируемой и экспериментально полученной долей правильных исходов не превышает 3 %, что существенно ниже погрешности классического подхода с фиксированным разбросом весов (до 25 %). Результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах и получили высокую экспертную оценку в рамках ряда научно-исследовательских проектов.

### **Оценка теоретической и практической значимости диссертации**

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в развитии системного подхода к анализу цифро-аналоговых нейроморфных вычислителей на базе мемристивных устройств. Автором впервые установлены закономерности, связывающие параметры сигналов задания сопротивления

мемристоров с погрешностями их задания, а через них – с погрешностями весовых коэффициентов и итоговыми метриками функциональной корректности искусственных нейронных сетей. Предложенные статистические модели зависимости сопротивления от параметров сигнала и веса синапса от сопротивления углубляют понимание механизмов возникновения и распространения погрешностей в мемристорных нейросетях. Разработанный алгоритм оценки функциональной корректности ИНСМ, учитывающий ограничения максимально допустимых напряжений и использующий масштабирование, создаёт теоретическую базу для последующей разработки методов коррекции ошибок, стратегий тестирования и формирования требований к качеству мемристивных устройств.

Практическая значимость работы подтверждается созданием законченного программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего автоматизацию всех этапов работы с массивами мемристоров и ИНСМ: от сбора экспериментальных данных и построения моделей до аппаратной реализации нейросетей и оценки их функциональной корректности. Разработанные модели и алгоритмы позволяют на этапе проектирования с высокой точностью (погрешность не более 3 %) прогнозировать качество решения на базе ИНСМ, а также подбирать параметры импульсных сигналов для достижения требуемых сопротивлений. Практическая ценность подтверждена внедрением результатов в научно-исследовательскую деятельность ННГУ им. Н.И. Лобачевского, учебный процесс Муромского института ВлГУ и производственный процесс ООО «Поликетон», использующего разработанный комплекс для входного контроля интегральных микросхем с мемристивными устройствами.

### **Апробация работы**

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы прошли широкую апробацию на международных и всероссийских научных конференциях. По теме диссертации опубликовано 14 научных трудов, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых изданиях из перечня ВАК, 4 публикации, индексируемые в международных базах Scopus/Web of Science. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, что подтверждает практическую реализацию разработанных алгоритмов.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Калибровочные кривые установления целевого значения сопротивления мемристора от параметров сигнала его задания сняты по довольно небольшому числу экспериментальных точек. Позволяет ли это статистически достоверно

судить о промежуточных значениях сопротивлений устройств в области интерполяции кривых, не охваченных экспериментальными значениями?

2. В модели зависимости веса синапса от сопротивления мемристора для формирования весового коэффициента применяется схема синапса на базе одного мемристора, однако в тексте упоминается, что существуют также схемы на двух и более мемристорах. Почему в работе выбрана именно данная схема для экспериментальной апробации полученных моделей и алгоритмов?

3. Для построения модельной зависимости веса синапса от сопротивления мемристора использовались данные, полученные из модели установления сопротивления мемристивного устройства, а не непосредственно из эксперимента. Такой подход вносит дополнительную погрешность, связанную с ошибками интерполяции. Чем обусловлен данный подход?

4. При тестировании разработанных методов в задаче установления весов нейросетевой модели в зависимости от сопротивлений мемристоров диапазон весовых коэффициентов выбран в отрезке от  $\sim 0,04$  до  $0,25$ . Скорее всего, при использовании других диапазонов, в том числе отрицательных значений синаптических весов, характеристики точности решения получатся другие. Чем обусловлен выбор использованного диапазона весов?

### **Заключение**

Данные замечания не умаляют высокой значимости, достоверности и целостности результатов выполненного диссертационного исследования. Диссертационная работа Борданова Ильи Алексеевича на тему «Модели и алгоритмы оценки функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров» 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. Работа выполнена на высоком научном уровне, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, основные положения, выносимые на защиту, научную новизну и практическую значимость. Публикации автора в достаточной мере освещают результаты исследования.

Диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства

