



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
цифровому развитию ВлГУ,
д. ф.-м. н., доцент

[Signature]
А.О. Кучерик

«28» января 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ)

Диссертация Борданова Ильи Алексеевича на тему «Модели и алгоритмы оценки функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров» выполнена на кафедре «Информационные системы» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

В 2019 году Борданов Илья Алексеевич с отличием окончил ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» с присвоением квалификации бакалавра по направлению «Прикладная информатика».

В 2021 году Борданов Илья Алексеевич с отличием окончил ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» с присвоением квалификации магистра по направлению «Информационные системы и технологии».

В период подготовки диссертации с 2021 по 2025 год соискатель Борданов Илья Алексеевич обучался в очной аспирантуре ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» на кафедре «Информационные системы и программная инженерия», по окончании аспирантуры получил квалификацию «Исследователь. Преподаватель-исследователь». Соискателем успешно сданы все кандидатские экзамены.

Научный руководитель Борданова Ильи Алексеевича – кандидат технических наук, доцент Щаников Сергей Андреевич, Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», доцент кафедры «Информационные системы».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Конкретные научные результаты, полученные лично соискателем:

– Разработана модель и алгоритм моделирования зависимости сопротивления мемристивного устройства (МУ) от параметров сигналов. Показано, что данная модель применима для расчета сопротивления мемристора в зависимости от значений параметров сигнала, и для расчета значений параметров сигнала для заданного значения сопротивления. На основании проведенного вычислительного эксперимента подтверждено, что результаты моделирования совпадают с экспериментальными данными с доверительной вероятностью 95 %.

– Разработана модель и алгоритм моделирования зависимости веса синапса нейрона от сопротивления мемристивного устройства и схемы формирования веса. Показано, что данная модель применима для расчета веса синапса нейрона в зависимости от значений сопротивления мемристора, и для расчета значений сопротивления мемристора для заданного значения веса синапса нейрона. На основании проведенного вычислительного эксперимента подтверждено, что результаты моделирования совпадают с экспериментальными данными с доверительной вероятностью 95 %.

– Разработан алгоритм оценки функциональной корректности (ФК) искусственных нейронных сетей на базе мемристоров (ИНСМ) с учетом выбранных параметров сигналов задания сопротивлений мемристивных устройств и параметров реально заданных сопротивлений, схемы формирования веса и максимально допустимых напряжений на выходе нейронов. Показано, что применение компьютерного моделирования и предложенного алгоритма позволяют рассчитать значения метрик оценки ФК проектируемой ИНСМ.

– Разработан программно-аппаратный комплекс для сбора и накопления экспериментальных данных с мемристивных устройств в соответствии с планами экспериментов и оценки ФК ИНСМ. В данном комплексе реализован функционал автоматизации процесса построения предлагаемых моделей для кроссбар-массивов МУ 32×8 1T1R. Погрешность измерений сопротивления в диапазоне от 500 Ом до 10 кОм составляет не более 1 %.

– Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами экспериментов. Для этого аппаратно реализованы 4 разных по архитектуре ИНСМ (полносвязная прямого распространения, сверточная, рекуррентная) с применением кроссбар-массивов 32×8 1T1R на основе диоксида циркония. Показано, что отличие между результатами моделирования и экспериментом составляет не более 3% для предложенного алгоритма и до 25% для существующего метода.

Все выносимые на защиту положения разработаны соискателем лично.

2. Достоверность полученных результатов подтверждается:

– Полученные в диссертации результаты моделирования зависимости сопротивлений МУ и весов синапсов нейронов ИНСМ от параметров сигналов их задания согласуются с экспериментальными данными, полученными с

помощью реального устройства (кроссбар-массив МУ 32x8 1T1R) (модельные и экспериментальные данные совпадают с доверительной вероятностью 0,95).

– Результаты компьютерного моделирования ИНСМ и оценки ФК получены для нескольких разных архитектур искусственных нейронных сетей (ИНС) (полносвязная ИНС прямого распространения, сверточная ИНС, рекуррентная ИНС) и практических задач. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с аппаратно реализованными ИНСМ. Разница между оценкой доли правильных исходов ИНСМ в эксперименте и в модели не превышает 3 %, в то время как для оценки путем задания разброса весов доходит до 25 %).

– Методологическое и программно-аппаратное обеспечение разработаны и использовались в ходе выполнения шести финансируемых НИР.

– Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на шести различных международных и всероссийских конференциях по специальности.

Все положения диссертации строго обоснованы, сопровождаются соответствующими математическими выкладками и имеют экспериментальную проверку.

3. Научная новизна результатов.

В ходе проведения диссертационных исследований получен ряд новых научных результатов:

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.

Разработанное методологическое и программно-аппаратное обеспечение внедрено в учебный процесс кафедры информационных систем и в рабочий процесс лаборатории разработки систем искусственного интеллекта МИ ВлГУ. Разработанный в рамках диссертационного исследования программно-аппаратный комплекс внедрен в компанию ООО «Поликетон» для задач входного контроля работоспособности интегральных микросхем, содержащих кроссбар-массивы с мемристивными устройствами в архитектуре 32x8 1T1R. Предложенные алгоритмы и модели оценки функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров использованы в ходе выполнения Проекта 9.1 «Нейроэлектроника – интеллектуальные нейроморфные и нейрогибридные системы на основе новой электронной компонентной базы» Национального центра физики и математики, а разработанный программно-аппаратный комплекс используется в работе НИЛ «Лаборатория мемристивной наноэлектроники» ННГУ им. Н.И. Лобачевского для исследования характеристик и демонстрации работы аппаратно реализованных нейронных сетей на базе кроссбар-массивов мемристивных устройств 32x8 1T1R.

4. Практическая значимость и научная ценность результатов.

Практическая значимость результатов исследований состоит в том, что разработанные модели и алгоритмы позволяют повысить степень точности результатов оценки ФК ИНСМ с учетом вариаций сопротивлений конкретных мемристивных устройств, а также подобрать значения параметров импульсных сигналов для задания нужных сопротивлений. Результаты вычислительных и натуральных испытаний подтверждают это – разница между оценкой доли правильных исходов ИНСМ в модели и эксперименте предложенным методом не превышает 3 %. Разработанное методологическое и программно-аппаратное обеспечение внедрено в научно-исследовательский процесс лаборатории разработки систем искусственного интеллекта МИ ВлГУ, лаборатории мемристивной наноэлектроники НОЦ ФТНС ННГУ им. Н.И. Лобачевского и в производственном процессе ООО «Поликетон».

Теоретическая значимость результатов исследований заключается в том, что разработанные модели и алгоритмы позволяют получать новые знания о процессах задания сопротивлений в МУ и о влиянии погрешностей задания сопротивлений на ФК ИНСМ. Полученные знания о влиянии вариаций сопротивлений МУ на долю правильных исходов ИНСМ для задачи классификации при различных архитектурах, таких как сверточные, рекуррентные или полносвязные сети прямого распространения, позволяют углубить знания об устойчивости нейроморфных архитектур к данному типу погрешностей. Разработанные алгоритмы и модели оценки ФК обеспечивают теоретическую базу для повышения степени точности результатов моделирования ИНСМ.

5. Соответствие диссертации требованиям, установленным пунктом 14 «Положения о присуждении ученых степеней».

Соискатель в диссертационной работе корректно ссылается на авторов и источники заимствования материалов или отдельных результатов. При использовании в диссертации результатов научных работ, выполненных соискателем учёной степени в соавторстве, Борданов Илья Алексеевич отмечает это обстоятельство. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем учёной степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

6. Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.1. – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (технические науки) в части:

– пункта 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»;

– пункта 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»;

– пункта 11 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества, надежности функционирования сложных систем управления и их элементов».

7. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

По теме диссертации опубликовано 14 научных трудов, из них по теме, среди которых 4 публикации в ведущих рецензируемых изданиях из перечня рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 4 публикации, индексируемых в международной базе данных Scopus/Web of Science, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Научные статьи, опубликованные в журналах из перечня ВАК:

1. Борданов, И. А. Оценка точности работы искусственных нейронных сетей на базе мемристивных устройств на основе теории планирования эксперимента / И. А. Борданов, Л. Я. Королёв, С. А. Щаников, А. Н. Михайлов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2025. – № 2. – С. 40–52. – Текст: непосредственный.

2. Борданов, И. А. Оценка точности работы искусственных нейронных сетей на базе мемристоров с применением моделей на основе данных / И. А. Борданов, С. А. Щаников // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2024. – № 2 (54). – С. 59–68. – Текст: непосредственный.

3. Данилин, С. Н. Количественное определение отказоустойчивости искусственных нейронных сетей на базе мемристоров / С. Н. Данилин, С. А. Щаников, И. А. Борданов, А. Д. Зуев // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 55–65. – Текст: непосредственный.

4. Борданов, И. А. Современное состояние в области аппаратной реализации искусственных нейронных сетей на базе мемристоров / И. А.

Борданов, С. А. Щаников, С. Н. Данилин // Телекоммуникации. – 2020. – № 8. – С. 35–48. – Текст: непосредственный.

Научные публикации, индексируемые в международных базах Scopus и/или Web of Science:

5. Bordanov, I. A. Determining the fault tolerance of memristorsbased neural network using simulation and design of experiments / I. A. Bordanov [et al.] // 2018 Engineering and telecommunication (EnT-MIPT). – IEEE, 2018. – P. 205-209. – Текст : непосредственный. – DOI: 10.1109/EnT-MIPT.2018.00053.

6. Bordanov, I. A. High-performance software for memristor-based neural network simulation and optimization / I. A. Bordanov, R. A. Mineev, S. N. Danilin. – Текст: непосредственный // 2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T) / MIPT – IEEE, 2021. – P. 1–4.

7. Bordanov, I. A. Modeling and hardware implementation of vector-matrix multiplier based on 32x8 1T1R memristive crossbar array / I. A. Bordanov [et al.] // 2023 7th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – IEEE, 2023. – P. 249–251. – Текст : непосредственный. – DOI: 10.1109/DCNA59899.2023.10290511.

8. Bordanov, I. A. Simulation of calculation errors in memristive crossbars for artificial neural networks / I. A. Bordanov, A. A. Antonov, L. Ya. Korolev // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2023. – P. 1008–1012. – Текст: непосредственный. – DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139308.

Тезисы докладов конференций и публикации в прочих изданиях:

9. Борданов, И. А. Исследование влияния погрешностей матрично-векторного умножения на точность работы искусственных нейронных сетей на базе мемристоров / И. А. Борданов, С. Н. Данилин – Текст: непосредственный // Нейрокомпьютеры и их применение: сборник тезисов XXI Всероссийской научной конференции / Московский государственный психолого-педагогический университет. – Москва, 2023. – С. 156–157.

10. Борданов, И. А. Применение методологии имитационного моделирования для оценки точности работы искусственных нейронных сетей на базе мемристивных устройств / И. А. Борданов, С. А. Щаников – Текст: непосредственный // Труды первой школы-конференции с международным участием «Нейроэлектроника и нейротехнологии будущего» / ННГУ. – Нижний Новгород, 2024. – С. 32.

11. Борданов, И. А. Оценка точности работы искусственных нейронных сетей на базе мемристоров с применением моделей на основе данных / И. А. Борданов, С. А. Щаников. – Текст: непосредственный // Информационные системы и технологии - 2025: программа и аннотации докладов XXXI Международной научно-технической конференции / НГТУ им. Р. Е. Алексева. – Нижний Новгород, 2025. – С. 36.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

12. Свидетельство № 2023666086 Российская Федерация. Программа для моделирования матрично-векторного умножения с учетом погрешностей

мемристивных устройств: № 2023665065: заявлено 17.07.2023: опубликовано 26.07.2023 / Борданов И. А., Щаников С. А. – 1 с. – Текст: непосредственный.

13. Свидетельство № 2024619751 Российская Федерация. Программа для оценки точности работы искусственных нейронных сетей на базе мемристоров с учетом погрешности матрично-векторного умножения: № 2024616902: заявлено 02.04.2024: опубликовано 25.04.2024 / Борданов И. А., Щаников С. А. – 1 с. – Текст: непосредственный.

14. Свидетельство № 2019661246 Российская Федерация. Модуль определения точности функционирования искусственных нейронных сетей на базе мемристоров для системы имитационного моделирования: № 2019619978: заявлено 12.08.2019: опубликовано 23.08.2019 / Щаников С. А., Борданов И. А., Данилин С. А., Зуев А. Д. – 1 с. – Текст: непосредственный.

На основании представленных работ подтверждена полнота опубликованных научных результатов, отраженных в диссертационной работе. Научный вклад, внесенный лично аспирантом в работы, написанные в соавторстве, является достаточным для его характеристики как научного работника.

За время работы над диссертацией Борданов Илья Алексеевич сформировался как зрелый ученый, способный ставить и самостоятельно решать на требуемом уровне задачи разработки моделей, алгоритмов и программных средств в области нейроморфных систем на базе мемристоров.

Выводы

На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа Борданова Ильи Алексеевича на тему «Модели и алгоритмы оценки функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров» представляет собой логически завершенное научное исследование, основные результаты которого представляют научный и практический интерес для специалистов в области разработки систем анализа, управления и обработки информации, статистики, соответствует паспорту специальности 2.3.1. – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (технические науки) и соответствует требованиям, установленным в пп. 9 - 14 Положения «О присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013г. № 842 (в редакции 2023 года), предъявляемым к кандидатским диссертациям и является законченной научно-квалификационной работой.

Диссертация «Модели и алгоритмы оценки функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров» Борданова Ильи Алексеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.3.1. – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (технические науки).

Заключение принято на объединенном заседании кафедр «Информационные системы», «Программная инженерия» и «Физика и

прикладная математика» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Присутствовало на заседании 14 человек, в том числе 5 докторов наук, 7 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 14 чел., «против» – 0 чел., «воздержались» – 0 чел., протокол № 14 от «27» января 2026 г.



Андреанов Дмитрий Евгеньевич
д.т.н., доцент,
зав. каф. ИС



Кульков Ярослав Юрьевич
к.т.н., доцент,
зав. каф. ПИН



Орлов Алексей Александрович
д.т.н., доцент,
зав. каф. ФПМ

Подпись д.т.н., доцента, Андреанова Д.Е., к.т.н., доцента Кулькова Я.Ю., д.т.н., доцента, Орлова А.А. заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета ВлГУ



Т.Г. Коннова

