

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.281.04, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВЛАДИМИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
АЛЕКСАНДРА ГРИГОРЬЕВИЧА И НИКОЛАЯ ГРИГОРЬЕВИЧА
СТОЛЕТОВЫХ» (ВлГУ) МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 13 мая 2026г. № 5

О присуждении Борданову Илье Алексеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация **«Модели и алгоритмы оценки функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров»** по специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (технические науки) принята к защите 4 марта 2026 г., протокол № 4, диссертационным советом 24.2.281.04, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России) № 830/нк от 20 апреля 2023 г. с изменениями на основании приказа Минобрнауки России № 1026/нк от 21 октября 2025 г.

Соискатель Борданов Илья Алексеевич, 13 июля 1997 года рождения, в 2019 году с отличием окончил бакалавриат ВлГУ по направлению 09.03.03 «Прикладная информатика». В 2021 году с отличием окончил магистратуру ВлГУ по направлению подготовки 09.04.02 «Информационные системы и технологии». В 2025 году окончил аспирантуру ВлГУ по научной специальности 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника» с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель – исследователь». Работает на должности ассистента кафедры информационных систем Муромского института (филиала) ВлГУ. Диссертация выполнена на кафедре информационных систем Муромского института (филиала) ВлГУ.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент **Щаников Сергей Андреевич**, Муромский институт (филиал) ВлГУ, доцент кафедры информационных систем.

Официальные оппоненты:

Удовиченко Сергей Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный университет» (ТюмГУ), научный руководитель лаборатории мемристорных материалов;

Бутусов Денис Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический

университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, заведующий кафедрой САПР

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Деминим В.А., доктором физико-математических наук, Курчатовский комплекс НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт», первый заместитель руководителя по научной работе, обсужденном и одобренном на расширенном научном семинаре «Вопросы физики твердотельных систем» (протокол №59 от 16.04.2026) и утвержденном директором НИЦ «Курчатовский институт», доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН Дьяковой Ю.А., указала, что диссертация является самостоятельно выполненной завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной научной задачи, а именно – оценки функциональной корректности (ФК) искусственных нейронных сетей на базе мемристоров (ИНСМ), учитывающей ограничения максимально допустимых напряжений и использующей масштабирование, что создаёт теоретическую базу для последующей разработки методов коррекции ошибок, стратегий тестирования требований к качеству мемристивных устройств. Исследование имеет 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. Согласно отзыву, автор диссертационной работы – Борданов Илья Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (технические науки).

Соискатель имеет 75 опубликованных работ (индекс Хирша по данным РИНЦ составляет 8), в том числе по теме диссертации опубликовано 14 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 11 работ, в том числе 3 свидетельства о регистрации программных продуктов. Публикации соискателя в полной мере отражают результаты диссертации. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах. Общий объём авторского вклада в работы (без учета результатов интеллектуальной собственности) составляет 2,21 п.л. из общего количества 6,33 п.л.

Работы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований по специальности защищаемой диссертации:

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 (журнал имеет научную категорию К2, личный вклад диссертанта 0,47 п.л. из 0,81 п.л.).

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 (журнал имеет научную категорию К2, личный вклад диссертанта 0,38 п.л. из 0,63 п.л.).

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 (журнал имеет научную категорию К2, личный вклад диссертанта 0,37 п.л. из 0,69 п.л.).

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 (журнал имеет научную категорию К2, личный вклад диссертанта 0,49 п.л. из 0,88 п.л.);

На диссертацию и автореферат поступили отзывы из ведущей организации и от официальных оппонентов. Кроме того, 6 организаций дали отзывы на автореферат. Все поступившие отзывы положительные.

Отзыв ведущей организации – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»», г. Москва, подписан первым заместителем руководителя по научной работе Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт», доктором физико-математических наук Деминым В.А., обсужден и одобрен на расширенном научном семинаре «Вопросы физики твердотельных систем» (протокол №59 от 16.04.2026), утвержден директором НИЦ «Курчатовский институт», доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН Дьяковой Ю.А. Отзыв содержит следующие замечания:

–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?

–в модели зависимости веса синапса от сопротивлений 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?

–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?

–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?

Отзывы официальных оппонентов:

1. Отзыв научного руководителя лаборатории мемристорных материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет» (ТюмГУ), г.Тюмень, доктора физико-математических наук, профессора Удовиченко С. Ю. содержит следующие замечания:

– в качестве модели мемристора автором была выбрана математическая модель «Biolek». 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;

– 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;

– 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;

– в работе не исследована чувствительность предложенных моделей к объему статистической выборки – неясно, какое минимальное количество экспериментов и параллельных опытов требуется для достижения заявленной точности;

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

2. Отзыв заведующего кафедрой САПР, Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, доктора физико-математических наук, доцента Бутусова Д.Н. содержит следующие замечания:

– в разделе 2.4.1 диссертации представлено описание схемы задания сопротивления мемристивного устройства (рис. 2.5), в которой задействована SPICE-модель «Biolek» со ссылкой на ресурс компании Knowm (при этом условное графическое обозначение мемристора соответствует фирменной нотации Knowm). В тексте указано, что «вариации в модель добавлялись путем изменения значения максимального и минимального сопротивления мемристивного устройства по нормальному закону распределения», однако детали программной реализации данного подхода не раскрываются. В связи с изложенным, следовало бы дать разъяснения относительно методологии преобразования детерминированной исполняемой модели в стохастическую. В частности, учитывая отсутствие на схеме внешних источников шумового

воздействия, подключенных к мемристивному элементу, каким образом обеспечивается генерация статистических вариаций параметров в рамках моделирования? Требуется уточнить, реализовано ли введение случайных отклонений на уровне параметризации модели (например, через модификацию внутренних переменных или использование стохастических функций в описании модели), либо применен иной подход, и если да – то каким образом обеспечена воспроизводимость и верификация полученных результатов;

–в разделе 1.2 в качестве критических факторов, влияющих на функциональную корректность, корректно выделены дрейф сопротивлений и случайный телеграфный шум. Однако в практической реализации модели учитывают только мгновенные вариации при записи, игнорируя временную эволюцию параметров. В мемристивных ИНС, предназначенных для непрерывного инференса в edge-устройствах, отсутствие динамической компоненты в оценке функциональной корректности снижает практическую ценность предложенного метода. Возможно ли интегрировать в модель параметр времени/циклов считывания или это явное ограничение представленного в диссертации подхода?

–использование кусочно-линейной и кусочно-кубической интерполяции по экспериментальным данным обосновано, однако не ясно, реализован ли автоматический выбор точек разрыва при сильной нелинейности мемристивных элементов вблизи порогов SET/RESET. Выбор способа интерполяции не сопровождается анализом устойчивости и рисками возникновения явления Рунге. Целесообразно было бы обсудить альтернативные базисы (радиальные базисные функции, узлы Чебышева) или адаптивные сетки при создании таких моделей;

–в разделах 2.4.1 и 3.3.2 диссертации указано, что ускорение вычислительных процедур достигается за счет запуска нескольких независимых копий программы (фоновых процессов) для параллельного моделирования в LTSpice. Однако в тексте отсутствуют количественные показатели производительности разработанного программного обеспечения: не приведены данные о времени выполнения типовых планов эксперимента, масштабируемости ускорения при росте числа процессов и характеристиках используемых вычислительных систем и методов моделирования;

–в работе преимущественно рассматриваются мемристивные устройства на основе диоксида циркония. Не обсуждается, в какой степени предложенные модели и алгоритмы применимы к устройствам с иными физическими механизмами переключения (например, фазовыми или магниторезистивными). Желательно уточнить границы применимости разработанного подхода;

–после раздела 2.4 Исследование предложенных моделей и алгоритмов моделирования в работе идет раздел 2.7 Выводы по главе. А где разделы 2.5 и 2.6?

Отзывы на автореферат:

1. Отзыв ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (Московская область, г. Долгопрудный), подписанный заведующим лабораторией нейробиоморфных технологий, доктором физико-математических наук, профессором Казанцевым В.Б. Отзыв замечаний не содержит;

2. Отзыв ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Ростов-на Дону), подписанный заведующим кафедрой радиотехнической электроники и наноэлектроники, кандидатом технических наук, доцентом Смирновым В.А. содержит следующие замечания:

–одним из ключевых преимуществ ИНСМ является низкое энергопотребление. В работе основное внимание уделено функциональной корректности. Проводилась ли оценка энергопотребления разработанных аппаратных реализаций? Существует ли корреляция между выбранными параметрами сигналов программирования (амплитудой, длительностью) и энергозатратами на запись весов, и учитывался ли этот фактор при выборе оптимальных параметров?

- из текста автореферата не ясно, как выбирались параметры и уровни сигнала для построения модели 1;

3. Отзыв из Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН, г. Москва), подписанный старшим научным сотрудником лаборатории 80 киберфизических систем ИПУ РАН, кандидатом технических наук Романовой М.А. содержит следующие замечания:

– в работе не представлены экспериментальные данные о долговременной стабильности резистивных состояний, используемых мемристоров, что затрудняет оценку применимости предложенных моделей для прогнозирования функциональной корректности ИНСМ на длительных интервалах эксплуатации;

–автором не приведено обоснование выбора количества параллельных опытов $M=1000$, использованного при построении моделей 1 и 2. Вследствие этого не вполне ясно, почему именно данное значение было принято в качестве рабочего и признано достаточным для получения устойчивых оценок параметров моделей во всех точках плана эксперимента;

4. Отзыв ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (г. Томск), подписанный президентом ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», директором Института системной интеграции и безопасности, членом-корреспондентом РАН, доктором технических наук, профессором Шелупановым А.А., содержит следующие замечания:

–в разделе «Теоретическая и практическая значимость работы» автореферата присутствует опечатка в написании типа сетей: вместо «сверточных» они указаны как «сверхточные»;

–в выносимых на защиту положениях прямо не указано соответствие конкретным пунктам паспорта специальности. Однако отдельно перед описанием структуры диссертации говорится, что «проблематика, исследованная в диссертации, соответствует пунктам 4, 5, 11»;

–в разделе «Личный вклад» говорится, что основные результаты получены автором лично, а во всех совместных публикациях соискатель принимал активное участие и внес существенный вклад на всех этапах работы. Стоит отметить, что среди упомянутых в работе публикаций отсутствуют статьи, написанные автором лично. При этом в конце каждой главы добавлено уточнение «результаты получены автором лично и были частично опубликованы в соавторстве (вклад

автора более 50%)». Данное противоречие в пояснениях приводит к неясности ситуации с объемом личного вклада автора и требует дополнительного пояснения;

–планирование эксперимента, использованное автором для получения исходных данных, не обосновано теоретически и не подкреплено необходимыми методическими обоснованиями. На чем основан выбор данного количества факторов?

–модели и алгоритмы описаны на концептуальном уровне, а в формулах не раскрыты конкретные функции интерполяции ($f()$, $k()$ и др), Кроме того, недостаточно детализированы условия перехода между операциями. Данные обстоятельства не позволяют однозначно воспроизвести алгоритм. Также стоит отметить, что в работе применяется нормальный закон распределения, но не приводится подтверждения для данного выбора;

–представленные в работе результаты приведены на узкой экспериментальной базе. Также стоит отметить, что в таблице 2 для задачи классификации грибов точность аппаратной реализации составляет всего 0,540. Достаточно ли данного показателя для демонстрации работы алгоритма? Почему сравнение было осуществлено только с моделью ВАХ и простым заданием разброса весов?

–в оценке актуальности автор ссылается на то, что метрики оценки ФК ИНС подлежат обязательному расчету при оценке качества систем искусственного интеллекта (ИИ) в соответствии с ГОСТ Р 59898-2021. При этом оценка качества производится только по метрике доли правильных исходов (ассигасу). Почему не были рассмотрены точность (precision), полнота (recall) и другие метрики, применяемые для задач классификации?

5. Отзыв ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», подписанный заведующим НИЛ «Лаборатория мемристорной наноэлектроники» НОЦ «Физика твердотельных наноструктур», кандидатом физико-математических наук Михайловым А.Н., содержит следующие замечания:

–в тексте автореферата не отражено, какие параметры и уровни сигнала использовались при создании модели 1 и какие были выбраны уровни сопротивлений при построении модели 2, а также не отражено количество параллельных опытов;

–в разделе «Научная новизна» утверждается, что разработанные модели описывают статистическую взаимосвязь между параметрами сигнала и сопротивлением, а также между сопротивлением и весом. Однако, в автореферате не раскрывается, какие именно статистические критерии использовались для проверки адекватности моделей;

6. Отзыв из акционерного общества «Научно–исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград), подписанный начальником отдела перспективных исследований АО «НИИМЭ», доцентом базовой кафедры микро и наноэлектроники МФТИ, кандидатом технических наук Тельминовым О.А., содержит следующие замечания:

–в автореферате отсутствует анализ статуса и перспектив развития физических моделей, в том числе и *ab initio*. При том, что в работе исследуются нейросети, целесообразно совместить предлагаемое статистическое

моделирование на экспериментальных данных, физические модели и предсказательное моделирование с помощью нейросетей. Такой подход позволил бы снизить зависимость от экспериментальных данных, предусмотреть опасные режимы эксплуатации на основе физики работы приборов, а также экстраполировать оценки в более широком диапазоне;

–при разработке мемристоров приводят комплексную оценку всех основных потребительских характеристик, в числе которых время удержания, выносливость, скорость переключения, энергопотребление при записи и чтении, многоуровневость, устойчивость к внешним факторам и дрейфу параметров и др. Следует явно указать все параметры, влияющие на функциональную корректность нейросети и пояснить применимость предлагаемого подхода, при необходимости – варианты его усовершенствования;

–ввиду ограниченного размера реальных мемристорных кроссбаров закладывается возможность масштабирования как на уровне кристаллов внутри корпуса (2,5 D и 3D интеграция), так и на уровне корпусов нейропроцессоров путем объединения их в матрицы. В автореферате не приведен анализ вычислительной сложности предлагаемого подхода и его возможности для оценки масштабируемости измеренного мемристорного кроссбара в таких случаях.

На все поступившие замечания соискателем даны исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается известностью их достижений в области исследований соискателя, наличием у них актуальных публикаций за последние 5 лет по темам, совпадающим с тематикой диссертации соискателя, а также их способностью провести квалификационную оценку актуальности, теоретической значимости и практической ценности представляемой диссертации.

Официальный оппонент Удовиченко Сергей Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, научный руководитель лаборатории мемристорных материалов ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», г. Тюмень. Удовиченко С.Ю. осуществляет активную научную деятельность в области пучковоплазменных технологий для создания наноматериалов и плазменных эмиссионных систем для реализации этих технологий, в том числе для создания мемристивных устройств и систем на их основе. Удовиченко С.Ю. является секретарем диссертационного совета 24.2.418.02 по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника (технические науки, физико-математические науки). Имеет 15 статей по тематике диссертационных исследований соискателя в рецензируемых научных изданиях, опубликованных за последние 5 лет.

Официальный оппонент Бутусов Денис Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург. Бутусов Д.Н. осуществляет активную научно-исследовательскую деятельность в научных областях: нелинейной динамики, теории хаоса, численных методов интегрирования; робототехнике и мехатронике, обработке нелинейных и нестационарных сигналов; защищенных системах связи,

криптографических методов защиты информации на основе хаоса; нейроморфных и мемристивных систем.

Бутусов Д.Н. имеет 10 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях по тематике диссертационных исследований соискателя за последние 5 лет. Общее число цитирований его работ в базе «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ) - 1977, индекс Хирша составляет 22.

Вышеуказанные специалисты не являются соавторами соискателя в опубликованных им работах, не являются работниками организации, где выполнялась диссертация или где работает соискатель, его научный руководитель, а также где ведутся научно-исследовательские работы, по которым соискатель ученой степени является руководителем, или работником организации-заказчика, или исполнителем (соисполнителем). Занимаемые ими должности и выполняемая работа не влекут за собой конфликт интересов, способный повлиять на принимаемые решения по вопросам государственной научной аттестации. Официальные оппоненты являются работниками разных организаций.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»» (НИЦ «Курчатовский институт»). НИЦ «Курчатовский институт» обладает уникальной исследовательско-технологической базой, осуществляет исследования и разработки по широкому спектру направлений современной науки и технологий. Эти достижения, в соответствии с базой РИНЦ, только за последние 5 лет подтверждены 858 патентами и свидетельствами на результаты интеллектуальной деятельности. НИЦ «Курчатовский институт» широко известен своими достижениями в области нейроморфных и мемристивных систем и способен определить научную и практическую ценность диссертации соискателя. Сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» за последние 5 лет по профилю диссертации соискателя опубликовано более 50 научных работ в рецензируемых научных изданиях, а также защищена докторская диссертация по тематике, схожей с темой диссертации соискателя. Ведущая организация не имеет договорных отношений с соискателем, в ней не работают (в том числе, по совместительству) соискатель ученой степени, его научный руководитель, в них не ведутся научно-исследовательские работы, по которым соискатель ученой степени является руководителем, или работником организации – заказчика, или исполнителем (соисполнителем).

Диссертационный совет констатирует, что цель исследования, состоящая в формировании новых моделей и алгоритмов для оценки функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров, обеспечивающих повышение степени точности результатов моделирования на этапе проектирования, является достигнутой.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

решена научная задача по разработке методики оценки функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров, имеющая значение для развития методов системного анализа и оценки качества нейроморфных вычислителей на базе мемристивных устройств;

разработаны новые научные результаты: новая модель и алгоритм моделирования зависимости сопротивления мемристивного устройства от параметров сигналов его задания. По результатам вычислительных экспериментов модельные и экспериментальные данные совпадают с доверительной вероятностью 95%;

– новая модель и алгоритм моделирования зависимости веса синапса нейрона от сопротивления мемристивного устройства и схемы формирования веса. По результатам вычислительных экспериментов модельные и экспериментальные данные совпадают с доверительной вероятностью 95%;

– новый алгоритм оценки функциональной корректности ИНСМ. Разница между оценкой долей правильных исходов ИНСМ в модели и эксперименте предложенным алгоритмом не превышает: 1% – для сверточных ИНСМ, 2% – для рекуррентных ИНСМ и 3% – для полносвязных ИНСМ прямого распространения;

предложен новый практический результат – научно-обоснованные технические рекомендации по оценке функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров для обеспечения воспроизводимости и точности установки весовых коэффициентов;

доказана перспективность применения разработанных моделей и алгоритмов моделирования зависимости сопротивления мемристивного устройства от параметров сигналов и зависимости веса синапса нейрона от сопротивления мемристивного устройства и схемы формирования веса. А также перспективность применения алгоритма оценки функциональной корректности 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.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны аналитические положения и зависимости, входящие в состав моделей: зависимости сопротивления мемристивного устройства от параметров сигналов; зависимости веса синапса нейрона от сопротивления мемристивного устройства и схемы формирования веса; зависимости оценки функциональной корректности 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; **применительно к проблематике диссертации эффективно использованы** элементы теории системного анализа, теории вероятностей и математической статистики, теории применения методов анализа данных и нейронных сетей, а также теории планирования экспериментов и обработки экспериментальных данных; **изложены** новые научные результаты: модель и алгоритм моделирования зависимости сопротивления мемристивного устройства от параметров сигналов его задания; модель и алгоритм моделирования зависимости веса синапса нейрона от сопротивления мемристивного устройства и схемы формирования веса; алгоритм оценки функциональной корректности ИНСМ. А также прикладной результат – научно-обоснованные технические рекомендации по оценке функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров для обеспечения воспроизводимости и точности установки весовых коэффициентов;

раскрыто противоречие между физическим и информационным уровнем моделирования ИНСМ, когда с одной стороны – существует необходимость качественно точно и адекватно описывать физику функционирования мемристивных устройств, что сопряжено со значительными вычислительными затратами при создании моделей больших ИНСМ и нейроморфных вычислителей, с другой стороны – модели ИНСМ, учитывающие только разброс весов, не имеют взаимосвязи с процессом записи этих весов. Противоречие в науке обусловлено невозможностью устранения противоречий между физическим и информационным уровнем моделирования ИНСМ на базе известного научно-методического аппарата; **изучено** влияние сопротивления мемристивного устройства от параметров сигналов его задания, а также влияние веса синапса нейрона от сопротивления мемристивного устройства и схемы формирования веса для достижения цели исследования – оценки функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров; **проведена модернизация** существующих теоретических подходов к использованию точных физических моделей мемристивных устройств и информационных моделей функционирования ИНСМ на основе применения системного подхода, при котором ИНСМ рассматривается как единая система и определяется связь между физическими и информационными процессами в ней.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработанные в рамках исследования модель и алгоритм моделирования зависимости сопротивления мемристивного устройства от параметров сигналов его задания; модель и алгоритм моделирования зависимости веса синапса нейрона от сопротивления мемристивного устройства и схемы формирования веса; алгоритм оценки функциональной корректности ИНСМ; научно-обоснованные технические рекомендации по оценке функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров для обеспечения воспроизводимости и точности установки весовых коэффициентов **внедрены** для проведения учебных занятий в учебном процессе кафедры информационных систем Муромского института ВлГУ и **использованы:** в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского» в ходе выполнения проекта 9.1 «Нейроэлектроника –интеллектуальные нейроморфные и нейрогибридные системы на основе новой компонентной базы» Национального центра физики и математики, а разработанный соискателем программно-аппаратный комплекс используется в работе НИЛ «Лаборатория мемристивной наноэлектроники» и в производственном процессе ООО «Поликетон»;

созданы научно обоснованные технические рекомендации по использованию предложенных моделей и алгоритмов по оценке функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров. Также создан программно-аппаратный комплекс для сбора и накопления экспериментальных данных с мемристивных устройств, в котором 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%;

представлены результаты моделирования и экспериментальных испытаний, акты внедрения результатов исследования, а также свидетельства о регистрации программных продуктов, которые подтверждают, что использование предложенных моделей и алгоритмов позволяют проводить оценку функциональной корректности ИНСМ.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

для экспериментальных работ использовано современное сертифицированное и поверенное оборудование, эксперименты проводились на промышленно выпускаемых мемристорных кроссбар-массивов МУ 32×8 1T1R, показана воспроизводимость результатов исследования в различных условиях;

теория, используемая в диссертационном исследовании, построена на проверяемых фактах, с корректным применением основных принципов системного подхода, обоснованным выбором основных рамок исследования при постановке научной задачи и разработке ее решения и согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;

идея базируется на анализе существующих научных публикаций и современном системном подходе, при котором ИНСМ рассматривается как единая система во взаимосвязи между физическими и информационными процессами в ней. А также на современном нормативном регулировании понятия функциональной коррекции для различного типа нейронных сетей;

использованы данные, полученные при анализе промышленно выпускаемых мемристивных устройств, которые коррелируются с ранее полученными результатами аналогичных исследований;

установлено соответствие исходных данных диссертации известным эмпирическим данным по характеристикам кроссбар-массивов мемристивных устройств, а также непротиворечивость результатов, полученных в диссертации, результатам, опубликованным в известных работах других ученых и специалистов, ведущих исследования в данной предметной области.

использованы прикладные пакеты программ математического моделирования при получении численных результатов исследования, а также апробированные математические методы научно-методического аппарата системного анализа, теории вероятностей и математической статистики, теории применения методов анализа данных и нейронных сетей, а также теории планирования экспериментов и обработки экспериментальных данных; разработанное соискателем программное обеспечение.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в разработке основных результатов диссертации: новой модели и алгоритма моделирования зависимости сопротивления мемристивного устройства от параметров сигналов его задания; новой модели и алгоритма моделирования зависимости веса синапса нейрона от сопротивления мемристивного устройства и схемы формирования веса; нового алгоритма оценки функциональной корректности ИНСМ; новых научно-обоснованных технических рекомендаций по оценке функциональной корректности ИНСМ; в получении, обработке и интерпретации данных на всех этапах исследовательского процесса, личном участии в разработке и апробации результатов исследований, выполненных лично

автором или при участии автора, личной подготовке публикаций по выполненной работе.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. Автором не исследуется эффект нежелательных колебаний, возникающий при интерполяции по экспериментальным данным полиномами высоких степеней. Выбор способа интерполяции не сопровождается анализом устойчивости и рисками возникновения явления Рунге.

2. В диссертационной работе автором не исследуется применимость разработанного метода моделирования на других классах моделей мемристоров, например, с табличными функциями изменения параметра состояния

3. Экспериментальные исследования проводились только с мемристорными кроссбар-массивами $MU32 \times 8$ 1T1R, с другими типами, имеющими технологические особенности производства, экспериментов не проводилось.

Соискатель Борданов И.А. согласился с замечаниями и ответил на все заданные ему в ходе заседания вопросы с приведением собственной аргументации.

На заседании 13 мая 2026 года диссертационный совет 24.2.281.04 принял решение: за решение научной задачи, которая заключается в разработке методики оценки функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров, имеющей значение для развития методов системного анализа и оценки качества нейроморфных вычислителей на базе мемристоривных устройств, присудить Борданову Илье Алексеевичу ученую степень кандидата технических наук по научной специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (технические науки).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 13 докторов наук по специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика», участвовавших в заседании, из 16 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» – 13, «против» – нет, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель
диссертационного совета 24.2.281.04
доктор технических наук, профессор

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.281.04
кандидат технических наук, доцент



М.Ю. Монахов

А.В. Тельный

«13» мая 2026г.