

Вх. № 2/23

от 21.02.2023г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
цифровому развитию федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего образования

«Владимирский государственный
университет имени Александра
Григорьевича и Николая
Григорьевича Столетовых»

А.О. Кучерик

« 3 » _____ 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ибрагима Абдуллы Хайдара Абдо на тему «Математическое моделирование процессов резистивного переключения в мемристоре и обработки информации в мемристорно-диодных кроссбарах входного и выходного устройств биоморфного нейропроцессора», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Актуальность темы диссертационной работы

В настоящее время тематика искусственного интеллекта, машинного обучения и нейронных сетей получила активное развитие в связи с появлением устройств, выступающих в роли аппаратных ускорителей моделей и алгоритмов компьютерного зрения, обработки естественного языка, робототехники и других систем. Аппаратные ускорители являются цифровыми распределенными масштабируемыми системами, которые выполняют математическую обработку данных в соответствии с той или иной моделью искусственной нейронной сети. Они требуют значительных вычислительных и энергозатрат и по данным показателям сильно уступают биологическим аналогам.

Импульсные нейронные сети являются более биологически правдоподобными, используют меньшее количество нейронов, но требуют большего объема программных вычислений. В импульсных нейросетях реализуется биологически подобный механизм самообучения, который сложно реализовать в традиционных сетях с точечными нейронами. Импульсные нейронные сети превосходят нейросети на точечных нейронах в

точности и вычислительной мощности и лучше приспособлены для аппаратной реализации из-за работы по принципу “integrate-and-fire”.

Использование мемристоров в качестве синаптических связей потенциально может увеличить быстродействие и снизить потребление энергии нейропроцессора, основной частью которого является аппаратная импульсная нейросеть. Это достигается за счет замены программного расчета прохождения сигнала и характеристик синаптической связи, выполняемого в транзисторной электрической схеме, на прямое прохождение сигнала через мемристор, свойства которого изменяются аналогично оригинальной синаптической связи.

Актуальной задачей является создание простого алгоритма и программы на его основе для математического моделирования процесса установления различных резистивных состояний мемристора, что очень важно при программировании этих состояний в больших мемристорных матрицах, а также при реализации ассоциативного самообучения аппаратной нейросети нейропроцессора, созданной на основе мемристорно-диодного кроссбара.

При разработке и имитационном математическом моделировании работы отдельных узлов нейропроцессора необходимы алгоритм и соответствующая специализированная программа по обработке информации в больших электрических схемах, содержащих мемристорно-диодные кроссбары. С этой точки зрения поставленные в диссертационной работе задачи достаточно актуальные.

Научная новизна работы

Результаты, полученные в диссертации, обладают несомненной новизной.

Разработан алгоритм моделирования резистивного переключения твердотельного мемристора с активным слоем из оксида металла на основе полной математической модели тепломассопереноса зарядов в электрическом поле. Представлены алгоритм моделирования обработки информации в больших мемристорно-диодных массивах, а также алгоритмы построения электрических схем входного устройства биоморфного нейропроцессора, кодирующего двоичное число в импульсы, и выходного устройства, декодирующего импульсы в двоичный код.

Создан программный комплекс на основе этих алгоритмов, предназначенный для моделирования работы мемристоров и мемристорно-диодных массивов в биоморфном нейропроцессоре.

В результате проведенного математического моделирования получены согласие расчетных и экспериментальных данных по резистивному переключению мемристора и подтверждение работоспособности входного

кодирующего и выходного декодирующего узлов биоморфного нейропроцессора.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов

Достоверность разработанных алгоритмов моделирования и соответствующих программ, а также полученных в работе результатов по численному моделированию работы мемристора и больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары, обеспечена использованием известного симулятора SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) и согласием расчетных и экспериментальных данных.

Разработка и математическое моделирование работы входного и выходного устройств нейропроцессора поддержана грантом РФФИ в рамках научного проекта №20-37-90003 «Моделирование физических процессов в мемристорно-диодных кроссбарах входного и выходного блоков нейропроцессора».

Значимость для науки и производства полученных автором диссертации результатов

Созданный и сертифицированный комплекс программ позволяет осуществлять математическое моделирование физических процессов, протекающих в мемристорах и мемристорных массивах, с целью исследования электрических свойств этих электронных устройств, осуществлять моделирование работы мемристоров и мемристорных массивов при верификации отдельных узлов и нейропроцессора в целом.

Этот комплекс программ, обеспечивающий моделирование процессов обработки информации в биоморфном нейропроцессоре, реализующего аппаратную импульсную нейросеть, будет использован при проектировании и тестировании его прототипа в рамках договора о сотрудничестве с АО НИИ Молекулярной Электроники (НИИМЭ) – головного предприятия приоритетного технологического направления «Электронные технологии» РФ и изготовлении на предприятии ПАО «Микрон», г. Москва, Зеленоград.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений. Объем диссертации составляет 101 страниц машинописного текста, включая 42 рисунка. Список используемой литературы содержит 88 источников.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и основные задачи, показана научная новизна и научная и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора в получении результатов

работы, приводятся сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

В первой главе проведен анализ опубликованных работ по математическим моделям, описывающим резистивные состояние и переключение мемристоров с активным слоем оксида металла, основанного на физических процессах тепломассопереноса зарядов в электрическом поле. Обсуждается компактная схемотехническая модель, представляющая реальную структуру мемристора в виде эквивалентной схемы и характеризующиеся достаточно простыми вычислениями с помощью систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Обсуждаются достоинства и недостатки известных логических матриц на основе мемристоров, которые могут использоваться при разработке входного устройства, кодирующего двоичное число в импульсы, и выходного устройства нейропроцессора, декодирующего импульсы от нейронной сети в двоичный код.

Во второй главе сделан выбор полной математической модели процессов тепломассопереноса кислородных вакансий и ионов, включающей их генерацию, рекомбинацию, диффузию и дрейф в электрическом поле в структуре металл-оксид-металл, а также выбор математической модели резистивного переключения мемристора.

Представлены алгоритм и программа на его основе для математического моделирования процесса резистивного переключения мемристора, построенные на основе анализа полной математической модели процессов стационарного тепломассопереноса кислородных вакансий и ионов в электрическом поле в структуре металл-оксид-металл. Дано простое аналитическое решение модели резистивного переключения мемристора в случае сильного электрического поля (тонкий слой, большое приложенное напряжение), когда можно пренебречь градиентами концентраций заряженных частиц. Найденное аналитическое решение математической модели резистивного переключения мемристора сокращает время моделирования процессов обработки информации в больших мемристорных массивах. Показано совпадение участков вольт-амперной характеристики при переключении мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние, полученных в результате численного моделирования и экспериментально.

Третья глава посвящена математическому моделированию работы входного устройства нейропроцессора в режиме кодирования двоичного числа в частоту импульсов популяцией из трех виртуальных нейронов.

Описаны разработанные алгоритм и соответствующая программа автоматического построения электрической схемы входного кодирующего

устройства биоморфного нейропроцессора на основе логической матрицы с мемристорно-диодным кроссбаром.

Описаны алгоритм моделирования работы больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары, и реализация этого алгоритма в виде проблемно-ориентированной программы MDC-SPICE, созданные на основе известной программы SPICE и включают уточнённые математические модели мемристора и селективного элемента диода Зенера, а также представленный во второй главе алгоритм моделирования резистивного переключения мемристора.

В результате математического моделирования с помощью этой программы показана работоспособность входного кодирующего узла нейропроцессора.

Четвертая глава посвящена математическому моделированию выходного устройства нейропроцессора, которое декодирует импульсы от нейронного блока в стандартный двоичный код. Представлены алгоритм и программа автоматического построения электрической схемы декодирующего устройства на основе логической матрицы с мемристорно-диодным кроссбаром и показана с помощью математического моделирования в программе MDC-SPICE работоспособность выходного устройства нейропроцессора.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты работы, в приложении помещены свидетельства на регистрацию разработанных программ.

Замечания по содержанию диссертации

- Для полной математической модели тепломассопереноса при транспорте кислородных вакансий и ионов в электрическом поле оксидного слоя мемристора уравнение для поля дано в виде уравнения Лапласа, т.е. поле считается постоянным, в то же время при численном моделировании используется переменное электрическое поле, которое в автореферате определяется выражением (13).

- На рис.2а и рис.4а представлены только правые ветви вольт-амперных характеристик биполярных мемристоров, а где левые ветви?

- В алгоритме моделирования больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары используется идеальная математическая модель мемристора, в то время как в этот же алгоритм встроено моделирование работы реального мемристора.

- Нет пояснений, какую полезную информацию дает карта проводимости мемристоров на рис.8 в автореферате, полученная в результате численного моделирования работы кодирующего устройства.

- Не представлены кроме кодирования двоичного числа в частоту импульсов другие режимы кодирования: в задержки импульсов и одновременного кодирования в частоту и задержки импульсов популяцией из

трех виртуальных нейронов. Эти режимы можно было сравнить по эффективности (время расчетов, потеря части информации и т.д.).

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Ибрагима Абдуллы Хайдара Абдо «Математическое моделирование процессов резистивного переключения в мемристоре и обработки информации в мемристорно-диодных кроссбарах входного и выходного устройств биоморфного нейропроцессора», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой на актуальную тему, выполненной на высоком научном уровне. Результаты, полученные автором с помощью комплекса разработанных программ, имеют научную ценность в части оптимизации параметров сверхбольших матриц нейропроцессора и практическую ценность при проектировании и тестировании его экспериментального образца в заводских условиях. Работа соответствует паспорту специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ в области исследований:

п.3: реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента;

п.5: разработка новых математических методов и алгоритмов валидации математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента или на основе анализа математических моделей;

п.8: комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Полученные результаты соответствуют уровню кандидатской диссертации по рассматриваемой специальности.

Автореферат диссертации составлен с соблюдением установленных требований и дает подробное представление о диссертационной работе.

Диссертация Ибрагима А.Х.А. соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., а её автор – Ибрагим Абдулла Хайдар Абдо заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа, автореферат и отзыв на диссертацию Ибрагима Абдуллы Хайдара Абдо обсуждены на заседаниях кафедры «Программная инженерия» и лаборатории разработки систем искусственного интеллекта Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (МИ ВлГУ). Протокол семинара № 1 от 17 января 2023 года.

Директор МИ ВлГУ, заведующий
кафедрой «Программная инженерия»
д.т.н. по специальности 05.13.01 -
Системный анализ, управление,
обработка информации, профессор

Жизняков
Аркадий
Львович

Ведущий научный сотрудник
лаборатории разработки систем
искусственного интеллекта МИ ВлГУ,
к.т.н. по специальности 05.13.01 -
Системный анализ, управление,
обработка информации, доцент

Щаников
Сергей
Андреевич

« 3 » феврале 2023 года

Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Адрес: 602264, Владимирская область, г. Муром, ул. Орловская, д.23
тел.: +7 (49234) 77-1-01
e-mail: oid@mivlgu.ru

Подписи д.т.н., проф. А.Л. Жизнякова и к.т.н., доц. С.А. Щаникова заверяю.

Ученый секретарь МИ ВлГУ



Полулях
Ольга
Николаевна