

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Теплового Георгия Сергеевича «Разработка модели искусственного нейрона с динамической функцией активации на базе мемристивных компонентов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Диссертационная работа Теплового Г.С. посвящена исследованию применения мемристивных компонентов в структурной схеме искусственного нейрона. Несмотря на активное изучение и имеющиеся экспериментальные данные, существующие проблемы производства не позволяют организовать промышленное внедрение мемристивных компонентов в стандартные технологические процессы микроэлектроники. Одной из ключевых проблем внедрения является проблема повторяемости и воспроизводимости параметров, возникающая как в процессе работы одной структуры, так и в процессе создания нескольких структур на микросхеме, что приводит к значительным разбросам сигнала на выходе мемристивных элементов. Частично, указанные разбросы могут быть снижены и учтены в микросхемах последующей обработки сигналов путем пересмотра и построения моделей мемристоров, учитывающих известные девиации и их влияние на выходной сигнал, что позволяет говорить о высокой актуальности работы диссертанта.

В диссертации Теплового Г.С. представлены теоретические исследования применения в структурной схеме искусственного нейрона элементов ReRAM на основе оксида металлов с биполярным механизмом переключения. Характерной особенностью изучаемых структур является филаментарный механизм переключения с управлением процесса импульсами напряжения, т.е. переключение происходит в случае превышения входным импульсом порога напряжения.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка терминов и определений, списка сокращений, списка работ, опубликованных по теме диссертации, списка цитируемой литературы из 143 наименований, двух приложений и содержит 156 страниц, в том числе 41 рисунок и 4 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, методы и объект исследования, изложено ее содержание, показаны научная новизна и практическая значимость, а также приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор научных работ, посвященных теоретическим исследованиям нейронных сетей и моделей искусственных нейронов. В процессе

рассмотрения источников литературы автор производит классификацию искусственных нейронов на три основных типа: нейроны срабатывающие по совпадению, интегрирующие нейроны и связывающие нейроны. Классификация известных моделей искусственных нейронов логически дополняется классификацией искусственных нейронных сетей, строящихся на их основе. Указанное разделение производится в соответствии с определяемыми автором параметрами, а именно: шаблон связности сети, тип связей в сети и распространение сигнала по сети.

Вторая часть первой главы направлена на формулирование математического аппарата описания абстрактной модели (в семантическом значении обобщения известных моделей) искусственного нейрона с динамической функцией активации. Формализм строится на базе конечного автомата Мура, после чего, в третьей части главы, производится построение обобщенной схемы нейрона. Для предложенной модели конечного автомата абстрактного нейрона приводится алгоритм эквивалентного построения моделей нейронов с суммирующей и мультипликативной функциями агрегации.

Следует отметить, что автору удалось осуществить математическое описание модели нейрона с динамически изменяющейся функцией активации. Предлагаемая концепция смены функции активации нейрона в процессе обучения или работы нейронной сети является расширением существующей области исследований, направленной на изучение алгоритмов функционирования сетей. Применение динамической функции активации в процессе работы в перспективе повысит эффективность использования ресурсов нейросетевых систем за счет уменьшения количества вычисляющих элементов или снижения времени на перепрограммирование существующих элементов. Изменение функции активации в процессе обучения позволяет поднять вопрос о построении алгоритма обучения, производящего оптимизацию нейронной сети путем динамического подбора наиболее релевантной функции активации в процессе своей работы.

Во второй главе автор уделяет значительное внимание применяемым архитектурам искусственных нейронных сетей и используемым в указанных схмотехнических решениях электронным компонентам. В качестве мемристивного компонента, на основе которого производится имплементация структурной схемы искусственного нейрона, определяется биполярный мемристор с филаментарным механизмом изменения проводимости. Автор обосновывает выбор биполярных мемристоров хорошими показателями масштабируемости элемента и тем, что переключение между состояниями

проводимости производится напряжением разной полярности, позволяя тем самым, избежать ряда схемотехнических проблем.

Кроме того, на основе известных моделей мемристоров производится построение модели мемристора с биполярным механизмом переключения. При этом в качестве базовой модели используется модель линейного дрейфа вакансий кислорода. Отличительными особенностями являются следующие: применение девиаций параметров порогов переключения, наличие механизма обеспечивающего различные варианты отказов мемристоров и зависимость величины изменяемого сопротивления от интеграла уровня напряжения, превышающего порог переключения. Также в рамках модели реализованы девиации параметров высокорезистивного и низкорезистивного состояний. Все указанные разбросы параметров определяются в соответствии с усеченным распределением Гаусса. В завершении главы производится верификация модели посредством анализа полученных результатов. Расчетные данные сведены в графиках временной зависимости выходного сигнала от входного.

Третья глава посвящена актуализации обобщенной схемы искусственного нейрона до структурной схемы. Уточнение схемы производится до уровня основных применяемых в структурной схеме искусственного нейрона блоков. Блоки, в которых предусмотрено применение биполярных мемристоров, конкретизируются до электронных компонентов. Алгоритм функционирования искусственного нейрона включает три основных этапа: режим активации, режим возбуждения нейрона и рефрактерный режим. Приведен алгоритм функционирования структурной схемы. Отличительной особенностью, предлагаемого автором схемотехнического решения, является возможность учета в выходном сигнале от искусственного нейрона уровня возбуждения на входах нейрона в каждый момент времени активации.

Заключение содержит основные выводы работы, включающие элементы научной новизны, практической значимости, направления и рекомендации для проведения дальнейших исследований в разработке технологий имплементации мемристивных элементов.

Достоверность и обоснованность основных результатов диссертационной работы обусловлена применением САПР Cadence при проведении верифицирующей модели биполярного мемристора расчетов. Достоверность предлагаемой автором модели конечного автомата абстрактного нейрона обуславливается применением формализмов теории множеств и конечных автоматов, а также строгостью и логической правильностью выводов, полученных в процессе оценок влияния различных множеств, описывающих нейрон, на вычислительную мощность единичного нейрона. Корректность

функционирования искусственного нейрона в процессе учета уровня возбуждения на входах в каждый момент времени обеспечивается корректным применением принципов цифровой схемотехники и детальным непротиворечивым описанием алгоритма работы схемы.

По диссертации имеется несколько замечаний:

1) В разделе 1.3, а также в главе 3, рассмотрен вопрос имплементации динамической функции активации. Предлагается использовать табличный метод задания функции (LUT - Look Up Table), когда каждому диапазону значений аргумента соответствует свой выходной сигнал функции активации. Было бы целесообразно сопроводить материал примерами, иллюстрирующими продуктивность такого подхода.

2) Используемая в работе модель мемристора (раздел 2.3) довольно проста. Результаты проведенных расчетов свидетельствуют о непротиворечивости модели, однако вопрос ее валидации подлежит более тщательному рассмотрению.

3) Модель мемристора содержит подгоночный параметр. Следовало бы уделить внимание вопросу подбора этого параметра, указав каким образом он определяется и какие значения выбраны в проведенных расчетах.

4) При анализе влияния разброса параметров было бы целесообразно учитывать в модели влияние количества циклов переключения мемристора на величину возможного разброса параметров высокого и низкого резистивных состояний.

5) По диссертации имеется также ряд замечаний редакционного характера, на которые указано автору.

Перечисленные замечания не умаляют достоинств диссертационной работы и не влияют на ее положительную оценку.

В целом диссертация Теплова Г.С. «Разработка модели искусственного нейрона с динамической функцией активации на базе мемристивных компонентов» является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной научной задачи.

Положения и выводы, сформулированные в диссертации, получили апробацию на 5 научных конференциях и семинарах, в том числе международного и всероссийского уровня. Основные результаты исследования изложены в пяти статьях, две из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

Автореферат диссертации отражает основное содержание диссертации.

Таким образом, диссертация Теплова Г.С. полностью удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент

Профессор кафедры «Вычислительная математика и программирование»
Московского авиационного института,

доктор физико-математических наук,
профессор



Ревизников Дмитрий
Леонидович

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»
125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3
Тел.: 8 (499) 1584894
E-mail: reviznikov@mai.ru

Подпись профессора Д.Л. Ревизникова
заверяю.

Декан факультета «Информационные
технологии и прикладная математика» МАИ



Крылов С.С.