

УТВЕРЖДАЮ  
Первый заместитель директора  
по научной работе  
НИИЦ «Курчатовский институт»  
Р.А. Санду  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Теплова 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 нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

### Актуальность и значимость результатов для развития соответствующей отрасли науки

#### 1. Актуальность темы диссертации

Актуальность работы определяется набором обстоятельств, сложившихся в современной микроэлектронной промышленности при реализации искусственных нейронных сетей. Одним из них является тот факт, что уменьшение минимального топологического размера при производстве микросхем до сих пор не позволяет добиться эффективной аппаратной реализации набора искусственных нейронов на микросхеме. Другое обстоятельство связано с появлением новых электронных компонентов типа мемристоров, обладающих лучшими показателями масштабирования и энергопотребления в сравнении со стандартными схемотехническими решениями в реализации нейронов. Кроме того, существующие модельные представления об искусственных нейронах, несмотря на их подробную проработанность, не учитывают возможности динамического изменения функции активации в процессе вычислений или обучения. Наконец, существующие модельные описания мемристоров на базе нестехиометрических оксидов таких элементов как Ti, Hf, Si, Ta и др. редко учитывают имеющиеся экспериментальные данные о разбросе их параметров.

Диссертационная работа Теплова Г.С. посвящена разработке структурной схемы аппаратной реализации искусственного нейрона с учетом возможности динамического изменения функции активации нейрона в процессе его работы или обучения. Работа также включает разработку на языке Verilog-A модели биполярного мемристора с учетом возможности задания разброса его основных характеристик. Таким образом, можно с уверенностью заключить, что тема работы является актуальной с

теоретической и практической точек зрения, как для теории нейронных сетей, так и для решения практической задачи построения вычислительных систем с нейроморфной архитектурой.

#### Научная новизна полученных результатов

В работе получены новые результаты, среди которых можно выделить следующие:

- предложена модель искусственного нейрона с динамической функцией активации, изменяющейся в процессе обучения или работы сети;
- произведено обобщение в единой модели на основе конечного автомата функций агрегации аддитивных и суммирующих нейронов и предложен метод построения эквивалентных друг другу указанных функций;
- предложена модель биполярного мемристора, описанная на языке Verilog-A. Модель отличается от известных описаний: учетом девиаций параметров порогов переключения, учетом девиаций состояний с низкой и высокой проводимостью, различными типами отказов и разбросом по количеству циклов переключения;
- предложена структурная схема искусственного нейрона, позволяющая производить учет уровня возбуждения на входах нейрона в каждый момент времени активации.

#### Научная значимость полученных результатов

Получены новые теоретические результаты, имеющие фундаментальное и практическое значение. В частности, предложенный формализм описания искусственных нейронов с динамической функцией активации позволяет создать алгоритм обучения нейронной сети, оптимально определяющий функцию активации для каждого нейрона сети в процессе обучения, а также пересмотреть существующие подходы к алгоритмическому описанию процесса обработки сетью информации с учетом ее возможного изменения.

Разработанная автором модель биполярного мемристора на основе оксида металла с филаментным механизмом переключения хорошо соответствует известным экспериментальным данным для данного типа устройств, что позволяет применять ее в качестве библиотечного элемента САПР Cadence и в проектировании блоков обработки сигналов от мемристоров.

Полученные данные моделирования мемристора демонстрируют преимущество развитой методики изменения проводимости мемристивных элементов за счет подачи на элемент малоамплитудных и коротких по длительности переключающих импульсов. Указанная методика показывает возможность получения большего количества дискретных состояний на одном элементе, отождествляемых с логическими уровнями памяти.



Полученные результаты, выводы и рекомендации диссертации могут быть использованы научно-исследовательскими группами, которые занимаются разработкой технологии производства мемристивных элементов, проектированием микросхем с применением мемристоров и исследованием подходов к схемотехническим реализациям нейроморфных систем. Можно рекомендовать ознакомиться с материалами диссертации для изучения полученных в ней результатов таким организациям как ННГУ, КФУ, МГУ, СПбГУ, ФТИАН РАН, ИФП СО РАН, МФТИ, МИЭТ и др.

#### Достоверность полученных результатов

Достоверность и обоснованность основных результатов диссертационной работы в части разработки модели искусственного нейрона обусловлена применением математического формализма теории множеств и использованием теории конечных автоматов в качестве основы для описания нейрона как вычисляющего элемента. Корректность предложенных модельных представлений биполярного мемристора на основе оксида металла обеспечивается использованием адекватного компьютерного моделирования и устойчивостью характера полученных решений при вариации параметров модели. Положения и выводы, сформулированные в диссертации, получили квалифицированную апробацию на 5 научных конференциях и семинарах, в том числе всероссийского и международного уровня. Достоверность также подтверждается публикациями результатов исследования в ведущих научных изданиях, 2 из которых рекомендованы ВАК.

#### Общая характеристика работы

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.

**В первой главе** представлен обзор литературы существующих моделей нейронов и искусственных нейронных сетей. По результатам обзора сформулированы требования к модели искусственного нейрона с динамической функцией активации, произведен синтез модели конечного автомата и абстрактного нейрона. Предлагаемая автором модель, основанная на теории множеств, учитывает ранее не рассматриваемую возможность динамического изменения функции активации в процессе обучения или работы нейрона. Автором, в рамках предлагаемой модели, выполнено обобщение двух основных применяемых в аппаратно реализуемых искусственных нейронах функций агрегации входных сигналов, а именно,  $n$ -мерных операций умножения и сложения. В рамках данной главы диссертации выполнен

анализ влияния различных множеств, которые описывают искусственный нейрон, на вычислительную мощность нейрона. В завершение главы автор предлагает обобщенную структурную схему искусственного нейрона на основе предлагаемого математического описания абстрактного нейрона.

**Вторая глава** включает обзор литературы аппаратных реализаций искусственных нейронных сетей и искусственных нейронов. По результатам обзора производится выбор типа резистивного элемента для применения в структурной схеме искусственного нейрона. Предложенная автором модель описания биполярного мемристора верифицируется посредством проведения вычислений. Модель включает основные девиации параметров свойственные биполярным мемристивным элементам на основе оксидов металлов. Учитываемые в рамках модели различные типы отказа работы мемристора базируются на применении переменной ресурса переключения, что позволяет моделировать отказы в высоком и низком резистивных состояниях.

**В третьей главе** производится конкретизация предложенной в первой главе обобщенной структурной схемы искусственного нейрона. Производится уточнение реализации блоков структурной схемы искусственного нейрона, включающих в том числе мемристивные элементы. Структурная схема включает описание блоков (таких как LUT и сдвиговый регистр), позволяющих производить учет входящих сигналов в каждый момент времени путем последовательного формирования во втором блоке LUT адреса ячейки памяти, хранящей значение выходного сигнала.

В заключении перечислены основные результаты и выводы, полученные в диссертации.

### Замечания по работе

В процессе рассмотрения и обсуждения работы сформулирован следующий перечень замечаний:

1. При описании существующих архитектур ИНС в литературном обзоре (гл. 1) дается определение рекуррентной сети как сети с наличием обратных связей, обеспечивающих передачу обработанной информации от последующего по направлению передачи информации слоя к предыдущему. В то же время в рекуррентных сетях могут присутствовать также латеральные связи между нейронами в одном слое. Важно лишь то, что активности нейронов рассчитываются итеративно, или рекуррентно.
2. Гл. 2, стр. 51: вывод формул (не пронумерованы), определяющих мощности множества области определения функции агрегации, не приводится. Ясно только, что данные зависимости определены из неких комбинаторных рассуждений. Тем не менее, эти формулы не очевидны.



3. Описание модели мемристора в гл. 2 не является исчерпывающе полным для понимания многих аспектов предлагаемой автором модели. В частности, не ясно, как из формул на стр. 103 диссертации (не пронумерованы) следует программный код Verilog-A, представленный на стр. 105 и в Приложении 1. Например, формулы определяют скорость изменения сопротивления мемристора ( $dx/dt$ ), зависящую от интеграла по всему периоду времени нахождения мемристора вне пороговых значения напряжения. Этот факт сам по себе требует отдельного пояснения, которое отсутствует. В то же время в коде модели расчет зависимости скорости изменения сопротивления по указанным формулам не прослеживается. Не ясно тогда, как именно контролируется плавность переключения на гистерезисных вольт-амперных кривых. Также, не дана расшифровка всех переменных, используемых в коде модели в Приложении 1 (только короткие пояснения к некоторым из них на английском языке). С учетом вынесения предлагаемой модели мемристора в положения на защиту, а также отмечая ценность новой модели для практического использования другими исследователями, представлялось бы целесообразным дать более полное и детальное освещение данного вопроса в диссертации.
4. Представленная структурная схема аппаратной реализации искусственного нейрона весьма оригинальна и позволяет учитывать историю подачи на нейрон подпороговых (агрегированных в терминологии автора) сигналов, а также динамически выдавать различные функции активации нейрона. С целью выявления актуальности такого функционала представлялось бы целесообразным продемонстрировать или хотя бы указать круг задач, в которых полученные особенности имели бы решающее значение.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертационная работа Теплова Г.С. производит положительное впечатление и является вполне завершенным научным исследованием. Результаты диссертации имеют важное научное и практическое значение в области построения вычислительных систем с нейроморфной архитектурой.

#### Заключение

Диссертационная работа Теплова Г.С. «Разработка модели искусственного нейрона с динамической функцией активации на базе мемристивных компонентов» прошла необходимую апробацию на всероссийских и международных конференциях, основные результаты опубликованы в ряде реферируемых журналов, что подтверждает их достоверность. Диссертационная работа Теплова Г.С. представляет собой оригинальное самостоятельное исследование, выполненное на высоком научном уровне, обладающее актуальностью, научной новизной и практической значимостью, и соответствует паспорту специальности 05.27.01 – твердотельная электроника,

радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах. Автореферат диссертации, в основном, соответствует содержанию работы.

Работа соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе критериям II раздела Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор Теплов Георгий Сергеевич заслуживает присвоения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Отзыв составил доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт» Рыльков Владимир Васильевич.

Диссертация и автореферат рассмотрены, а отзыв заслушан, обсужден и одобрен на 26-ом заседании семинара Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт» «ВОПРОСЫ ФИЗИКИ НОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ» 21 ноября 2018 г., протокол № 26.

Ведущий научный сотрудник  
Курчатовского комплекса  
НБИКС-природоподобных технологий  
НИЦ «Курчатовский институт», д.ф.-м.н.

В.В. Рыльков

Ученый секретарь семинара ВФНТС  
Курчатовского комплекса  
НБИКС-природоподобных технологий  
НИЦ «Курчатовский институт», к.ф.-м.н.

А.В. Емельянов

Директор-координатор по направлению  
природоподобные технологии  
НИЦ «Курчатовский институт», к.ф.-м.н.

В.А. Демин

Заместитель главного ученого секретаря –  
руководитель службы главного  
ученого секретаря  
НИЦ «Курчатовский институт», к.ф.-м.н.

С.Ю. Стремоухов

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт») Российская Федерация, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1  
Тел.: +7 (499) 196–95–39  
Эл. почта: [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)  
Веб-сайт: <http://www.nrcki.ru>