

С.Н. ДАНИЛИН,  
С.В. ПАНТЕЛЕЕВ,  
С.А. ЩАНИКОВ,  
А.А. ИВЕНТЬЕВ

**Разработка методов инженерного  
проектирования искусственных  
нейронных сетей на базе  
мемристоров с заданной точностью  
функционирования**

УДК 004.383.8.032.26

Муромский институт  
(филиал) ФГБОУ ВО  
«Владимирский  
государственный  
университет имени  
А.Г. и Н.Г. Столетовых»,  
г. Муром

*В данной работе приводятся результаты теоретического обоснования и практической реализации методов определения точности работы и функциональных допусков искусственных нейронных сетей на базе мемристоров (ИНСМ). Авторами предложен общий подход к разработке методов и алгоритмов определения и обеспечения точности функционирования ИНСМ как единых физическо-информационных объектов, реализованных аппаратно-программными обучаемыми средствами. Большинство известных подходов предполагает рассмотрение только физических явлений и процессов, являющихся носителями информации в ИНС различной структуры, назначения и платформы реализации. Реализация методов определения точности работы и функциональных допусков искусственных нейронных сетей производится в пакете прикладных программ MATLAB и на языке программирования Python.*

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-07-08330.*

## Введение

В настоящее время во всем мире активно ведутся работы по созданию средств обработки информации с нейросетевой архитектурой на базе новых наноразмерных электронных элементов с мемристивными свойствами (мемристоров). Основная причина высокого интереса разработчиков к техническим средствам на базе мемристоров заключается в том, что они позволят на несколько порядков превысить производительность, достигнутую самыми быстрыми современными суперкомпьютерами (что подтверждается результатами исследований в ведущих отечественных и зарубежных научных центрах) [1].

При разработке алгоритмов преобразования информации в любом логическом базисе и проектировании технических средств, реализующих данные алгоритмы, в соответствии с действующими российскими и международными стандартами устанавливаются технические требования к ним, в частности по точности работы, быстродействию, отказоустойчивости, надежности, энергозатратам [2,3,4]. Анализ отечественных и зарубежных научно-технических публикаций показал, что в настоящее время опубликованные материалы не позволяют проводить инженерное проектирование и производство вычислительных средств с нейросетевой архитектурой на базе мемристоров (ИНСМ) и их элементов ввиду отсутствия или фрагментарного определения ряда их основных показателей в нормальных условиях и при дестабилизирующих факторах (помехи, шумы, погрешности параметров элементной базы).

В России разработана концепция создания вычислительных систем экзафлопсного уровня производительности и развития высокопроизводительных вычислений на базе супернейрокомпьютеров под руководством А.И. Галушкина. Основная идея данной концепции состоит в том, что для перехода на экзафлопсный уровень вычислений необходимо изменение логического базиса алгоритмов решения задач на нейросетевой и, соответственно, элементной базы с переходом от носителя информации в виде уровней токов и напряжений в электрических схемах к носителю информации в виде частоты узких импульсов, что возможно реализовать с применением мемристоров.

Автор концепции отмечает, что одной из важнейших нерешенных задач в данной области является разработка методик оценки и обеспечения необходимой точности вычислений при переходе в супернейрокомпьютере к аналоговой обработке [5,6]. Данная работа посвящена решению этой задачи. Целью проводимого исследования является разработка методов инженерного проектирования технических средств с нейросетевой архитектурой или работающих в нейросетевом логическом базисе на базе мемристоров с заданной точностью функционирования [5,6].

### **Моделирование ИНСМ**

Наиболее рациональным подходом для изучения технических возможностей устройств на основе мемристоров является исследование их моделей. В соответствии с теорией системного анализа [7] ИНСМ нужно моделировать и исследовать на нескольких уровнях:

1. На уровне системы ИНСМ необходимо рассматривать с точки зрения выполнения ею поставленной задачи в конкретной области науки, техники и технологии в смысле реализации её основных потребительских свойств как продукта. В этом случае не важно знать структуры ИНСМ и принципов ее реализации — она представляется как «черный ящик» с приведенными в спецификации значениями критериев эффективности (точности, отказоустойчивости, надежности, быстродействия, стоимости обслуживания, энергопотребления и пр.) на основании которых можно провести её имитационное моделирование как системы.

2. На уровне подсистем важно то, как она выполняет преобразование информации. Модель ИНСМ на данном уровне можно представить в виде алгоритма преобразования информации.

3. На уровне технических устройств ИНСМ необходимо описывать как устройство преобразования сигналов — носителей информации. На данном уровне модель ИНСМ представляется как набор алгоритмов преобразования сигналов. При этом алгоритмы преобразования сигналов и информации могут быть не эквивалентными и их количество может отличаться.

4. На уровне схемных элементов модель ИНСМ представляется в виде описания физических процессов, протекающих в её элементах.

Для каждого уровня необходимо выбирать индивидуальные показатели качества. Внешняя среда и каналы ее информационного воздействия на ИНСМ так же будут отличаться в зависимости от выбранной иерархии. Например, при моделировании ИНСМ на уровне подсистем, когда она рассматривается как алгоритм преобразования информации, внешней средой будут являться не только шумы и помехи, но и средства реализации данного алгоритма, как объекты информационного воздействия.

Аналитическое описание мемристора, адекватное его физической реализации как наноразмерного элемента, в котором функциональные зависимости обеспечиваются за счёт ионного дрейфа в полупроводниковых плёнках толщиной  $D$ , представлены в работе [8].

Авторами реализованы программные модели ИНСМ [9-17] разных уровней иерархии на основании работ [18, 19] и их элементов на базе мемристоров в MATLAB и с применением языка программирования Python.

### **Общий подход к проектированию ИНСМ**

Общий подход к разработке методов проектирования с заданной точностью ИНСМ и их элементов заключается в следующем.

Мемристоры, искусственные нейроны и нейронные сети на их основе необходимо моделировать и исследовать как единые физико-информационные объекты, реализованные аппаратно-программными обучаемыми средствами. Показатели точности функционирования таких объектов должны отражать степень соответствия их выходной информации и теоретически определённой путём моделирования как физических, так и информационных параметров элементов ИНСМ, а также параметров входной информации:

$$I_{вых} = f(I_{вх}, \Pi), \quad (1)$$

где  $I_{вх}$  и  $I_{вых}$  – параметры входной и выходной информации ИНСМ;

$\Gamma$  – физические и информационные параметры ИНСМ, вариации которых относительно номинальных значений (из-за внутренних или внешних дестабилизирующих факторов) влияют на  $I_{\text{вых}}$ .

Общий подход к разработке методов определения и обеспечения точности ИНСМ заключается в объединении возможностей:

- математического моделирования ИНСМ;
- математического моделирования дестабилизирующих факторов, влияющих на точность функционирования ИНСМ;
- методов исследования ИНСМ как физических объектов (анализ и синтез допусков на физические составляющие параметров носителей  $I_{\text{вх}}$  и  $\Gamma$ );
- методов исследования ИНСМ как информационных объектов (анализ и синтез допусков на параметры  $I_{\text{вх}}$ ,  $I_{\text{вых}}$  и на информационные составляющие параметров их носителей);
- аналитических расчётов показателей точности функционирования ИНСМ.

Кроме того, при разработке методов и алгоритмов определения и обеспечения требуемой точности функционирования ИНСМ необходимо:

- учитывать, что ИНСМ в процессе функционирования управляются программными средствами. По этой причине возникает необходимость при их исследовании применять методы тестирования программного обеспечения общие и специфические для ИНСМ.

- исследовать известные и разрабатывать новые алгоритмы обучения ИНС для работы с заданными показателями качества (в частности, уровнем точности и отказоустойчивости), а также разработанными авторами новыми критериями.

Для исследования точности функционирования ИНСМ и их составных частей предложен вариант общего подхода, основанный на методологии системного анализа и имитационного моделирования подразумевающий выполнение следующих этапов:

1. Составление описания ИНСМ, как объекта моделирования (формулировка целей моделирования; выбор перечня количественных показателей качества (эффективности)

функционирования ИНСМ, которые будут определяться при имитации; выявление внутренних и внешних дестабилизирующих факторов, составление детального логического описания моделируемых процессов, происходящих в системе).

2. Разработка блочной функциональной модели ИНСМ, как системы обработки информации. В зависимости от целей моделирования предполагается проведение функционально-структурной декомпозиции ИНСМ с введением нескольких уровней иерархии: уровень системы; уровень подсистем; уровень функциональных звеньев; уровень схемных элементов. Разработка аналитических моделей отдельных подпроцессов и алгоритмов функционирования элементов системы.

3. Программирование и отладка компьютерной модели ИНСМ в MATLAB.

4. Проверка адекватности модели ИНСМ и достоверности ее функционирования на типовых тестовых задачах.

5. Составление плана эксперимента с применением имитационной модели ИНСМ и методов стратегического и тактического планирования.

6. Реализация плана эксперимента и получение в процессе эксплуатации модели экспериментальных данных.

7. Обработка и анализ экспериментальных данных. Формулировка результатов имитационного моделирования.

На основе общего подхода реализованы методы и алгоритмы получены следующие результаты исследований.

### **Методы и результаты исследований**

В работе [11] приведён перечень факторов, влияющих на точность работы мемристоров. Созданы модели Simscape элементов искусственных нейронных сетей на основе мемристоров для исследования точности их функционирования в условиях дестабилизирующих факторов. Предложенный общий подход применен при исследовании точности функционирования элементов ИНСМ на примере базового элемента их реализации - мемристора, аналитически заданного уравнениями [8]. Проведенные исследования показывают, что погрешности параметров подаваемого напряжения, оказывают постепенное во времени

влияние на изменение его внутренних параметров и параметров электрической цепи.

Проведено исследование влияния рассмотренных погрешностей физических параметров элементов ИНСМ на информационные. Информационным параметром в данном случае является весовой коэффициент синапса нейрона  $W$ .

Результаты проведённых исследований показывают взаимосвязь информационных и физических параметров ИНСМ – изменение параметров подаваемого напряжения в среднем на 5% привело к изменению погрешности параметров мемристора в среднем на 3%, что, в свою очередь, повлияло на изменение значения передаточного коэффициента во времени от 3 до 4 %.

В работах [14, 15] проведены исследования влияния шума и внешних импульсных помех ( $\epsilon$ -загрязненных помех на фоне аддитивного белого гауссовского шума), присутствующих во входном сигнале. На примере работы нейрона ИНСМ показано, что возникновение такого рода шумов и помех во входном сигнале технических средств на основе мемристоров приводит к появлению значительной дополнительной погрешности в значениях их выходных параметров. Установлена корреляционная зависимость между значениями параметров дестабилизирующих составляющих во входном сигнале искусственной нейронной сети на базе мемристоров (дисперсия шума и помехи, вероятность появления импульсной помехи) и параметрами выходной информации в широком диапазоне от среднего до сильного уровня.

В работах [10, 13] предложен общий подход к разработке методов контроля точности функционирования технических средств, созданных на базе мемристоров (ТСМ). В основе данного подхода лежит применение нейросетевого распознавания и классификации сигналов, позволяющее фиксировать превышение допустимого уровня погрешности их обработки в ТСМ. Применение предложенного подхода рассмотрено на примере нейросетевого контроля уровня аддитивных шумов в выходном частотно-импульсно модулированном сигнале ТСМ. Алгоритмы распознавания сигналов реализованы на основе искусственных нейронных сетей радиально-базисных функций. Приведены

результаты практического применения разработанных метода и алгоритмов.

Алгоритм контроля точности функционирования ТСМ с применением ИНС заключается в следующем:

1. Входной тестовый сигнал проходит обработку в ТСМ;
2. Обработанный сигнал поступает на вход ИНС, позволяющей фиксировать превышение допускаемого уровня погрешности обработки сигнала в ТСМ;
3. По выходному значению ИНС принимается решение о соответствии/не соответствии техническим условиям контролируемого ТСМ.

Результаты исследований показывают, что разработанные ИНС позволяют с высокой точностью фиксировать сигналы со значениями параметров, несоответствующими техническим условиям. Решение задачи на основе данного подхода позволяет значительно ускорить процесс технического контроля ТСМ и повысить его достоверность.

Авторы разработали численные методы определения функциональных допусков ИНСМ произвольной структуры и назначения (в номинальном режиме и при воздействии дестабилизирующих факторов) [20]. В основу методов положен общий подход к разработке методов определения функциональных допусков на значения параметров искусственных нейронных сетей на базе мемристоров (ИНСМ), как системы, представляющей собой единый физико-информационный объект, реализуемый аппаратно-программными обучаемыми средствами.

В работах [16,17] авторами предложен метод и вариант алгоритма синтеза функциональных допусков на параметры нейронов ИНСМ по заданному значению допуска на её выходной параметр. В расчетах применены методы определения допусков технических объектов, через уравнения погрешностей [21].

Коэффициенты влияния входных параметров на выходные предлагается определять численно методом имитационного моделирования.

Функциональные допуски определяются на основании полученных значений коэффициентов влияний вероятностным методом.



Синтезирована и исследована ИНСМ обнаружения сквиттера инфокоммуникационного сигнала на фоне помех. Определены допуски на отношение сигнал-шум во входном сигнале (17дБ) и на информационные параметры нейронов ИНСМ ( $\pm 4\%$ ) для обеспечения вероятности ошибки распознавания – не более 0,5 %. В результате применения разработанного алгоритма оптимизации, допуск на отношение сигнал-шум во входном сигнале увеличился до 10дБ, а на информационные параметры нейронов ИНСМ до  $\pm 8\%$  при сохранении заданной точности ее функционирования за счет уменьшения влияния неинформативных факторов (шумов, помех) путем изменения разрядности входной информации [22].

### **Заключение**

Для достижения цели исследования решены ряд задач: синтезированы математические модели современного мемристора, мемристорного нейрона, искусственной нейронной сети на базе мемристоров ИНСМ; исследованы их свойства и характеристики [11,12,14].

Разработаны общий подход, методы и алгоритмы измерения параметров и характеристик наномемристоров, а также произвольных технических средств на их основе [10,13].

Разработаны общие подходы, методы, алгоритмы и программное обеспечение определения точности (качества) работы, анализа и синтеза функциональных допусков ИНСМ тестового и промышленного назначения в нормальных условиях и при воздействии дестабилизирующих факторов [15,16].

Разработаны общие подходы, методы, алгоритмов и программного обеспечения оптимизации показателей точности (качества) работы и функциональных допусков (доведение до заданного уровня или получение максимально возможного значения) при ограничениях на параметры входной информации и ресурсы технических средств реализации ИНСМ [17,22].

По сравнению с известными до настоящего времени в России и за рубежом методами определения и оптимизации точности (качества) работы и функциональных допусков нейронных сетей, разрабатываемые методы имеют следующие преимущества и особенности:

- позволяют определять и оптимизировать показатели точности (качества) работы и функциональных допусков ИНСМ произвольного назначения и сложности, нормируемые российскими и международными стандартами в нормальных условиях и при воздействии дестабилизирующих факторов.

- адаптируемы к структуре, сложности и назначению ИНСМ как единых физическо-информационных объектов, реализованных аппаратно-программными обучаемыми средствами;

- успешно реализуются в пакетах сертифицированных программ.

Проведено проектирование, исследования и оптимизация ИНСМ тестового и промышленного назначения предложенными методами [22].

### **Благодарности.**

Благодарны профессору Александру Ивановичу Галушкину за всестороннюю помощь в постановке задач проекта и их выполнении.

Выражаем огромную благодарность Руководителям и Экспертам РФФИ за поддержку наших Проектов в области инженерного проектирования ИНС и ИНСМ.

### **Список литературы**

1. Галушкин А.И. Стратегия развития современных супернейрокомпьютеров на пути экзафлопных вычислений // Приложение к журналу «Информационные технологии». №3. 2012. – С.56-65.
2. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. - Взамен ГОСТ 15467-70 ГОСТ 16431-70 ГОСТ 17102-71 ГОСТ 17341-71; введ. 1979-06-30. - М.: Стандартинформ, 2009. - 21 с.
3. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. - Взамен ГОСТ 27.410-87 в части п. 2; введ. 1997.01.01. - Минск.: Межгосударственный совет по организации, метрологии и сертификации, 2002. - 10 с.3
4. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные положения и определения. – М.: ФГУП «Стандартформ», 2006. – 24 с.
5. Галушкин А.И. Мемристоры в развитии высокопроизводительной вычислительной техники // Информационные технологии. 2015. №2. С. 146-156.
6. Галушкин А.И. На пути к нейрокомпьютерам с использованием мемристоров // Приложение к журналу "Информационные технологии". 2014. №4. С.2-19.

7. Алгазинов Э.К. Анализ и компьютерное моделирование информационных процессов и систем / Алгазинов Э.К., Сирота А.А. ; под общ. ред. А.А. Сироты. -М.: Диалог-МИФИ, 2009. - 416с.
8. Strukov, D. B. The missing memristor found // Nature, vol 453, no 7191. – 2008. – pp. 80-83.
9. Данилин С.Н., Щаников С.А. Проблемы проектирования искусственных нейронных сетей на базе мемристоров с заданной точностью функционирования // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2016. №4.С. 3-11.
10. Галушкин А.И., Данилин С.Н., Щаников С.А. Нейросетевой контроль точности функционирования технических средств на основе мемристоров // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. №2.С. 44-51.
11. Данилин С.Н., Щаников С.А. Исследование точности функционирования нейросетевых компонентов РТС на основе мемристоров // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 1 (17). С. 39-48.
12. Galushkin A.I., Danilin S.N., Shchanikov S.A. The research of memristor-based neural network components operation accuracy in control and communication systems // Source of the Document 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings. 2015. PP. 1-6. (DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147034)
13. Danilin S.N., Shchanikov S.A. Neural Network Control Over Operation Accuracy of Memristor-based Hardware // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. 2015. PP. 1-5. (DOI:10.1109/MEACS.2015. 7414916)
14. Данилин С.Н., Пантелеев С.В., Щаников С.А. Исследование точности функционирования искусственных нейронных сетей на базе мемристоров при дестабилизирующих воздействиях // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2017. №19. С.42-49.
15. Danilin S.N., Shchanikov S.A. The research of operation accuracy of a memristor-based artificial neural network with an input signal containing noise and pulse interference // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016.PP. 1-5. (DOI: 10.1109/Dynamics.2016. 7818997)
16. Danilin S.N, Shchanikov S.A., Panteleev S.V. Determining Operation Tolerances of Memristor-Based Artificial Neural Networks // Engineering and Telecommunication (EnT), 2016 International Conference on. 2016. PP. 34-38. (DOI:10.1109/EnT.2016.016)
17. Данилин С.Н., Щаников С.А., Сакулин А.Е. Определение функциональных допусков искусственных нейронных сетей на основе наномемристоров // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. №3(61). С.25-31. (DOI: 10.21667/1995-4565-2017-1-3-25-31)
18. Adhikari et al.: Memristor Bridge Synapse-Based Neural Network and Its Learning IEEE Transactions on neural networks and learning systems, vol. 23, no. 9, 2012.
19. Adhikari et al.: A Circuit-Based Learning Architecture for Multilayer Neural Networks With Memristor Bridge Synapses // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. Volume 62. Issue 1. 2015. PP. 215-223.
20. Danilin S.N., Makarov M.V., Shchanikov S.A. Design of artificial neural networks with a specified quality of functioning // Proceedings - 2014 International Conference on Engineering and Telecommunication, EnT 2014. 2014. PP. 67-71. (DOI: 10.1109/EnT.2014.38)

21. Фомин А.В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре [Текст] / А. В. Фомин, В. Ф. Борисов, В. В. Чермошенский. - Москва : Сов. радио, 1973. - 129 с. : ил.; 20 см. - (Б-ка радиоконструктора).

22. Данилин С.Н., Щаников С.А. Пантелеев С.В. Определение функциональных допусков искусственных нейронных сетей на базе мемристоров при наличии шумов во входном сигнале // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. №.4.