

С.Н. ДАНИЛИН, С.А. ЩАНИКОВ

**Проблемы проектирования
искусственных нейронных сетей
на базе мемристоров с заданной
точностью функционирования**

УДК 621.396

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

Приведены результаты обзора отечественных и зарубежных научно-технических публикаций в области проектирования искусственных нейронных сетей на базе мемристоров (ИНСМ). Показаны проблемы, стоящие перед разработчиками. В частности, до настоящего времени не разработаны теоретические или экспериментальные методы в области определения показателей точности (качества) работы и функциональных допусков ИНСМ. Приведены результаты работ авторов, вносящие определенный вклад в теорию и практику инженерного проектирования ИНСМ.

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

Аналитический обзор отечественных и зарубежных научно-технических публикаций (всего более 250 наименований, в статье приведены наиболее значимые) [1-50] по проблемам инженерного проектирования различных программно-аппаратных вариантов реализации ИНС показал следующее.

В настоящее время во всем мире активно ведутся разработки архитектур нейросетевых вычислительных средств на основе мемристоров [1-3]. Основная причина высокого интереса разработчиков к устройствам на базе мемристоров заключается в

том, что они являются более эффективным средством реализации высокопроизводительных вычислительных средств по сравнению с имеющимися средствами и технологиями [3-5], что подтверждается результатами исследований и мнениями экспертов в данной области, таких как Харст Саймон и Томас Стерлинг [1,2].

К основным направлениям исследований относятся:

- разработка технологии изготовления мемристоров, исследование свойств применяемых и поиск новых материалов их изготовления [6-10];

- разработка и исследование структур нейронов на базе мемристоров [11-16];

- разработка и исследование архитектур искусственных нейронных сетей на базе мемристоров [16-20];

- разработка и исследование алгоритмов настройки искусственных нейронных сетей на базе мемристоров [16, 21-24];

- разработка и исследование структур и архитектур высокопроизводительных вычислительных систем с применением мемристоров [25-30].

В России разработана концепция создания вычислительных систем экзафлопсного уровня производительности и развития высокопроизводительных вычислений на базе супернейрокомпьютеров [30]. Основная идея данной концепции состоит в том, что для перехода на экзафлопсный уровень вычислений необходимо изменение логического базиса алгоритмов решения задач 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. Российский опыт работ в области нейросетевых технологий и их применения обобщен в монографии [31].

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 [1,2]. Для решения данной задачи необходимо наличие:

1. Аппаратных или программных средств для исследования мемристоров, нейронов и нейронных сетей на их основе (ИНСМ)

для получения экспериментальных данных о значениях их параметров.

2. Методов получения значений этих параметров и их дальнейшей обработки для количественной оценки и обеспечения необходимой точности функционирования ИНСМ.

По пункту 1 обзор научно-технических публикаций показал следующее.

До настоящего времени известна одна инструментальная система по исследованию технических средств на базе мемристоров ArC ONE [32-34] производства ArC Instruments. Она содержит полную возможность измерения характеристик мемристоров и обеспечивает формирование входных импульсов с точностью до 10 нс. Амплитуды импульсов до $\pm 12\text{В}$ с нарастанием / спадом времени вплоть до 30 нс и шириной импульса до 90 нс. Это позволяет охватить широкий спектр вариантов реализаций мемристоров и мемристорных матриц. К основным недостаткам данной системы можно отнести:

а) получение данных лишь о физических параметрах мемристоров. Это является недостаточным для разработки методов оценки точности ИНСМ как физико-информационных объектов, что показано в работах [44-48];

б) проведение исследований с реальными устройствами. Для разработки методов обеспечения точности ИНСМ целесообразнее проводить предварительный инженерный расчет допусков на основе модели [54-63] и только затем проверять корректность применения данных методов для аппаратного варианта реализации ИНСМ с помощью данной системы;

в) высокую стоимость системы и проведения экспериментов за счет невозможности предварительного контроля точности производимых для исследования образцов ИНСМ на этапе проектирования.

Существует также программная система Memristor Toolbox для MATLAB [35]. В ней реализованы модели мемристоров в соответствии с их аналитическим описанием, представленным Леоном Чуа [36] для мемристора, контролируемого зарядом и аналитическим описанием мемристора, адекватным его физической реализации как наноразмерного элемента, в котором

функциональные зависимости между мемристивностью, током и напряжением обеспечиваются за счёт ионного дрейфа в полупроводниковых плёнках представленным в [37]. Данная система позволяет создавать модели ИНСМ с применением элементов стандартных библиотек Simulink MATLAB. К недостаткам данной программной системы можно отнести следующее:

а) низкая стабильность работы моделей мемристоров. Модели, содержащие мемристоры из данной системы работают только с решателем ode14x (extrapolation), что вызывает частые ошибки при симулировании работы;

б) возможность реализации моделей лишь на уровне схемных элементов, что на порядок повышает требования к производительности ЭВМ, на которой производятся исследования и ограничивает круг решения исследовательских задач для разных уровней иерархии моделирования.

В связи с этим авторы работы приступили к реализации программной системы по исследованию свойств и технических характеристик ИНСМ [44,56,58,67]. Получение экспериментальных данных производится на основе методологии имитационного моделирования. Система легко адаптируется к архитектуре, исследуемой ИНСМ и инвариантна к решаемой задаче и позволяет:

а) получить значения технических характеристик ИНСМ в номинальном режиме работы и при наличие шумов и помех;

б) определить точность функционирования ИНСМ в номинальном режиме работы и при наличие шумов и помех;

в) определить функциональные допуски ИНСМ в номинальном режиме работы и при наличие шумов и помех.

По пункту 2 обзор научно-технических публикаций показал следующее.

ИНСМ являются едиными физико-информационными, аппаратно-программными обучаемыми объектами. Из теории системного анализа и проведенных авторами исследований следует, что вышеназванные составляющие ИНСМ оказывают совместное, в общем случае зависимое влияние на их выходные параметры и характеристики. В известных научно-технических публикациях о комплексных исследованиях ИНСМ не сообщается.

При переходе к аналогово-цифровой обработке информации в ИНСМ необходимым является контроль качества формирования и обработки аналоговых сигналов для обеспечения достоверности выходных данных. Авторы разработали и применили для этих целей вариант общего подхода, основанный на нейросетевом распознавании информации, сигналов, образов [51-53], позволивший создать методы, алгоритмы и ПО оценки параметров произвольных радиотехнических сигналов, превосходящие по быстрдействию известные, основанные на статистической теории радиотехнических систем, на 1-3 порядка [55,61,63] при сохранении точности. Иных открытых научно-технических источников по данному вопросу не обнаружено.

Таким образом, полученные авторами научно-технические результаты [44-48;54-67] превосходят по большинству показателей известные как зарубежные, так и отечественные разработки

Литература

1. Галушкин А.И. Мемристоры в развитии высокопроизводительной вычислительной техники // Информационные технологии. 2015. №2. С. 146-156.
2. Галушкин А.И. На пути к нейрокомпьютерам с использованием мемристоров // Приложение к журналу "Информационные технологии". 2014. №4. С.2-19.
3. Галушкин А.И. Новые технологии микроэлектроники и разработки перспективных нейрокомпьютеров // Информационные технологии. 2016. №7. Т.22. С. 550-555.
4. Галушкин А.И. Пантюхин Д.В. СуперЭВМ и мемристоры // Информационные технологии. 2016. №4. Т.22. С. 304-312.
5. Галушкин А.И. Перспективы развития высокопроизводительной вычислительной техники с применением мемристоров (Пленарный доклад) // XII Всероссийская научная конференция «Нейрокомпьютеры и их применение». 2014. с.137.
6. Храповицкая, Ю.В. Моделирование частотных и мощностных характеристик мемристора на основе оксида титана / Ю.В. Храповицкая, Н.Е. Маслова, М.Л. Занавескин, А.Н. Марченков // Наука и образование. - 2013. - № 5. - С.290-305.
7. Храповицкая, Ю.В. Перспективные структуры с эффектом памяти, созданные на основе неорганических материалов / Ю.В. Храповицкая, Н.Е. Маслова, М.Л. Занавескин, А.Н. Марченков // Наука и образование. - 2013. - № 12. - С.329-366.
8. Храповицкая, Ю.В. Сравнительные характеристики мемристоров на основе оксида титана с платиновыми и золотыми контактами / Ю. В. Храповицкая, Н. Е. Маслова, А. В. Емельянов, Ю. В. Грищенко, Д. А. Мамичев, В. А. Демин, М. Л. Занавескин // Программные системы: теория и приложения. - 2013. - № 3(17).

9. Miller K. Fabrication and modeling of thin-film anodic titania memristors. M.Sc. Thesis. Ames, Iowa: Iowa State University, (2010). PP.4-6.
10. Yang J.J. et al. Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices // *Nature nanotechnology*. (2008). V. 3. PP. 429-433.
11. Ref. S. Shin, K. Kim, S. M. Kang, Memristors and Their Applications for Nanocomputing *IEEE Trans. on Nanotechnology*, (2011).
12. Carlos Hernandez, Arturo Sarmiento-Reyes and Hector Vazquez-Leal, "Existence of Multiple Operating Points in Memristive Circuits", 3rd IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems, Quintana Roo, Mexico, 2012.
13. H. Vazquez-Leal, Y. Khan, U. Filobello-Nino, V. M. Jimenez-Fernandez, A. Diaz-Sanchez, A. Herrera-May, R. Castaneda-Sheissa, L. F. Cisneros-Sinencio, J. Sanchez-Orea, "Path Tracking of dynamics of a Chaotic Memristor Circuit", *Journal of Interpolation and Approximation in Scientific Computing*, Volume 2014 (2014) , 1-18.
14. Harika Manem, Jeyavijayan Rajendran, Garrett S. Rose: Stochastic Gradient Descent Inspired Training Technique for a CMOS/Nano Memristive Trainable Threshold Gate Array. *IEEE Transactions on circuits and systems - I: regular papers*, vol. 59, no.5 (2012).
15. Maheshwar Pd. Sah, Changju Yang, Hyongsuk Kim and Leon O Chua Memristor Circuit for Artificial Synaptic Weighting of Pulse Inputs, *IEEE Transactions on neural networks and learning systems*, (2012).
16. 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).
17. Young-Su Kim, Kyeong-Sik Min: Synaptic Weighting Circuits for Cellular Neural Networks, *IEEE Transactions on neural networks and learning systems*, (2012).
18. Thomas John Walls, Konstantin K. Likharev: Self-Organization in Autonomous, Recurrent, Firing-Rate CrossNets With Quasi-Hebbian Plasticity. *IEEE Transactions on neural networks and learning systems*, vol. 25, no. 4, (2014).
19. M. He, J.-O. Klein, and E. Belhaire, "Design and electrical simulation of on-chip neural learning based on nanocomponents," *Electronics Letters*, vol. 44, April 2008.
20. Andy Thomas, Memristor-based neural networks, *Journal of physics D: Applied Physics*, 46 (2013) 093001 (12pp).
21. D. Chabi and J.-O. Klein, "High fault tolerance in neural crossbar," in *Design and Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era (DTIS)*. IEEE, Mar 2010, pp. 1–6.
22. DeHon A and Naeimi H, "Seven Strategies for Tolerating Highly Defective Fabrication", *IEEE Design & Test* 22 (2005), 306-315.
23. 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.
24. Shyam Prasad Adhikari, Hyongsuk Kim, Ram Kaji Budhathoki, Changju Yang, Jung-Mu Kim. Learning with memristor bridge synapse-based neural networks // 2014 14th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications (CNNA). 2014.
25. Jae-sun Seo et.al.: A 45nm CMOS Neuromorphic Chip with a Scalable Architecture for Learning in Networks of Spiking Neurons. *CICC*, pp.1-4, 2014.

26. Yukihiro Kaneko, Yu Nishitani, Michihito Ueda, Ayumu Tsujimura. Neural Network based on a Three-Terminal Ferroelectric Memristor to Enable On-chip Pattern Recognition. 2013 Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers.

27. Kuekes P et al, "Defect-Tolerant Interconnect to Nanoelectronic Circuits: Internally Redundant Demultiplexers Based on Error-Correcting Codes", *Nanotechnology* 16(2005), 869-882.

28. Azghadi M.R., Moradi S., Indiveri G. Programmable neuromorphic circuits for spike-based neural dynamics. *IEEE 11th International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*, 2013.

29. Serrano-Gotarredona T., Prodromakis T., Linares-Barranco B. A Proposal for Hybrid Memristor-CMOS Spiking Neuromorphic Learning Systems. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, (Volume:13 , Issue: 2).

30. Галушкин А.И. Стратегия развития современных супернейрокомпьютеров на пути к экзафлопным вычислениям. Приложение к журналу «Информационные технологии» № 3. 2012.

31. Галушкин А.И. Симоров С.Н. Нейросетевые технологии в России (1982-2010 г.). М.: «Горячая линия – Телеком», 2011 г.

32. A. Serb, et al. "Unsupervised learning in probabilistic neural networks with multi-state metal-oxide memristive synapses", *Nature Communications*, July 2016.

33. I. Gupta, et al. "Real-time encoding and compression of neuronal spikes by metal-oxide memristors", *Nature Communications*, Sept 2016.

34. A. Serb, J. Bill, A. Khiat, R. Berdan, R. Legenstein, and T. Prodromakis, "Unsupervised learning in probabilistic neural networks with multi-state metal-oxide memristive synapses," *Nat. Commun.*, vol. 7, p. 12611, Sep. 2016.

35. Memristor Circuit Investigation through a new Tutorial Toolbox, A. Walsh, R. Carley, O. Feely, A. Ascoli, in *Proc. European Conference on Circuit Theory and Design*, Dresden, September 2013.

36. Chua, L.O. Memristor – the missing circuit element // *IEEE Trans. Circuit Theory*. 1971. Vol. 18. PP. 507.

37. Strukov, D. B. The missing memristor found // *Nature*, vol 453, no 7191. – 2008. – pp. 80-83.

38. Галушкин А.И. Нейрочипы и нейроморфные ЭВМ: проблемы моделирования // *Информационные технологии*. 2015. №12. Т.21. С. 942-949.

39. Галушкин А.И. Модели для разработки нейрочипов и нейроморфных ЭВМ // *Информатизация и связь*. 2015. №4. С. 35-42.

40. Galushkin A. Neural networks realizations using memristors // *Proceedings - 2014 International conference on engineering and telecommunication, EnT 2014*. 2014. PP. 77-81.

41. Shyam Prasad Adhikari, Changju Yang, Hyongsuk Kim, Leon O. Chua. Memristor Bridge Synapse-Based Neural Network and Its Learning // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2012. Vol. 23. Issue 9. PP. 1426 - 1435. (DOI: 10.1109/TNNLS.2012.2204770)

42. Ram Kaji Budhathoki, Maheshwar Pd. Sah, Shyam Prasad Adhikari, Hyongsuk Kim, Composite memristance of parallel and serial memristor circuits // *Circuits and Systems (ISCAS)*, 2013 *IEEE International Symposium on*. 2013. PP. 209-212. (DOI: 10.1109/ISCAS.2013.6571819)

43. Ram Kaji Budhathoki, Maheshwar Pd. Sah, Shyam Prasad Adhikari, Hyongsuk Kim, Leon Chua. Composite Behavior of Multiple Memristor Circuits //

IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. Volume 60. Issue 10. 2013. PP 2688-2700. (DOI: 10.1109/TCSI.2013.2244320)

44. Данилин С.Н., Щаников С.А. Исследование точности функционирования нейросетевых компонентов РТС на основе мемристоров // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. №1. С. 39-48. (ВАК)

45. Данилин С.Н., Щаников С.А. Перспективная элементная база специализированных ЭВМ современных РЛС на основе мемристоров // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. №3 С. 13-19. (ВАК)

46. Galushkin A.I., Danilin S.N., Shchanikov S.A. The research of memristor-based neural network components operation accuracy in control and communication systems // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings. 2015. PP. 1-6. (DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147034) (SCOPUS)

47. Данилин С.Н., Щаников С.А. Алгоритм выбора параметров искусственной нейронной сети с учетом внутренних и внешних дестабилизирующих воздействий // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2015. № 3(32). С. 18-24. (РИНЦ)

48. Данилин С.Н. Современное представление об информации // Информационные системы и технологии. 2012. № 4. С. 138-146.

49. Тархов Д. А. Нейросетевые модели и алгоритмы. М.: Радиотехника, 2014. – 352 с.: ил.

50. 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.

51. Садыков С.С. Алгоритм построения выпуклой оболочки бинарного изображения и формирование его безразмерных признаков / С.С. Садыков // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2015. № 2 (23). С.77-85.

52. Садыков С.С., Савичева С.В. Распознавание плоских объектов при их наложении // Информационные технологии. 2013. № 2. С. 43-46.

53. Садыков, С.С. Цифровая обработка и анализ изображений/С.С. Садыков.-Ташкент: НПО «Кибернетика» АН УзССР, 1994. -193с.

54. Danilin S.N., Shchanikov S.A. Monitoring the Phase Progression of Linear Chirp by Applying Artificial Neural Networks // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2016. PP. 1-4. (DOI:10.1109/SIBCON.2016.7491740)

55. Данилин С.Н., Щаников С.А. Нейросетевой алгоритм контроля абсолютного значения фазового сдвига ЛЧМ-сигнала // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2016. №18. С.60-64.

56. Danilin S.N, Shchanikov S.A., Panteleev S.V. Determining Operation Tolerances of Memristor-Based Artificial Neural Networks // Proceedins of the 2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT-2016). 2016. PP. 33-37.

57. 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 // Proceedings - X International IEEE Scientific and Technical Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics). 2016.

58. 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. 2016. №19. С. 4-13.

59. 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)

60. 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.

61. Данилин С.Н., Щаников С.А. Алгоритм контроля относительного отклонения частоты ЛЧМ-сигнала от линейного закона с применением искусственных нейронных сетей // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2015. № 4(33). С. 10-18.

63. Галушкин А.И., Данилин С.Н., Щаников С.А. Методы определения точности функционирования нейросетевых вычислительных средств на основе мемристоров // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. VIII Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб.тез.докл. Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром, 5 февр. 2016 г.– Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016.– 478 с.: ил.– [Электронный ресурс]: 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). С. 57-58.

64. Данилин С.Н., Щаников С.А., Акимов А.А. Перспективные типы искусственных нейронных сетей контроля параметров РТС сигналов // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. VIII Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром, 5 февр. 2016 г.– Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016.– 551 с.: ил.– [Электронный ресурс]: 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). С. 63-64.

65. Данилин С.Н., Щаников С.А. Теоретико-экспериментальное определение точности функционирования искусственных нейронных сетей на основе мемристоров // Тезисы докладов XIV Всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение». 2016. С. 54-55.

66. Данилин С.Н., Щаников С.А. Применение искусственных нейронных сетей для оценки качества обработки сигналов техническими средствами на основе мемристоров // Тезисы докладов XIV Всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение». 2016. С. 59-60.

67. Данилин С.Н., Щаников С.А., Пантелеев С.В. Анализ и синтез функциональных допусков искусственных нейронных сетей на основе мемристоров // Тезисы докладов Международной конференции «Инжиниринг & Телекоммуникации – En&T 2016». 2016. С.149-153.

ДАНИЛИН С.Н. DSN-55@MAIL.RU

ЩАНИКОВ С.А. SEACH@INBOX.RU