

УДК 004.383.8.032.26

НЕЙРОСЕТЕВОЙ КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ МЕМРИСТОРОВ

Галушкин Александр Иванович

доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой «Интеллектуальные информационные системы и технологии» Московского физико-технического института (государственного университета).

Данилин Сергей Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Щаников Сергей Андреевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: seach@inbox.ru.

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23.

Аннотация: 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 разработанного метода и алгоритмов. Показано, что разработанные искусственные нейронные сети 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.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, нейрокомпьютеры, мемристоры, точность функционирования, обработка сигналов.

Введение

Применение мемристоров при создании современных технических средств (ТС) (высокопроизводительных вычислительных систем, микросхем памяти, датчиков и т.д.) позволяет улучшить их качественные и количественные характеристики (повышение быстродействия, снижение энергопотребления и т.д.), за счёт возврата к аналоговой обработке сигналов. При этом обязательным является определение адекватного места применения аналоговых информационных технологий в структуре ТС и обеспечение контроля заданной точности обработки информации [1]. Поэтому в процессе производства и эксплуатации современных ТС необходимо проведение периодического тех-

нического контроля (ТК) параметров их узлов и модулей, для обеспечения достоверности выходной информации.

В настоящее время в связи с широким применением цифровых технологий наиболее развитыми и эффективными являются методы и алгоритмы ТК цифровых ТС, в которых информация задана амплитудами токов и напряжений сигналов. В аналоговых ТС на основе мемристоров (ТСМ) информация может быть задана так же другими параметрами сигналов – частотой, фазой, разностью фаз, поэтому актуальной задачей в рассматриваемой области является разработка методов и алгоритмов оценки погрешностей значений названных па-

раметров для организации ТК заданной точности обработки информации в ТСМ.

Сложность алгоритмов ТК параметров аналоговых сигналов современных ТС в ряде случаев либо сопоставима, либо превышает сложность алгоритмов функционирования самих изделий. В настоящее время существует ряд методов и алгоритмов статистической теории радиотехнических систем, позволяющих проводить оценку параметров сигналов, как для непрерывной выборки, так и для дискретной [2, 3], что является трудоёмким процессом и накладывает дополнительные ограничения как по быстродействию, так и по точности устройств обработки. Обзор отечественных и зарубежных научно - технических публикаций показывает, что для широкого круга задач потенциальная точность обработки и преобразования информации нейросетевыми алгоритмами выше, чем их аналогами с классической фон-неймановской архитектурой, а затраты времени меньше на 1-3 порядка [4,5]. Поэтому перспективным направлением реализации систем ТК является применение искусственных нейронных сетей (ИНС) [5].

Рассмотрим вариант применения ИНС для контроля характеристик нейроморфных ТСМ.

Метод

В работах [6-7] авторами предложен общий подход к определению точности функционирования ТСМ. Зная точность и допускаемые уровни отклонения погрешностей (допуск) параметров сигналов, можно обучить ИНС по тестовым сигналам отслеживать изменение её параметров в процессе эксплуатации ТСМ и их составных элементов, тем самым предупреждая отказы.

Высокая эффективность применения ИНС при распознавании образов, классификации, принятии решений, а также возможность решения задач в целом без разделения на подзадачи, позволяет проектировать системы ТК различного назначения более высокого уровня [5].

Однако несовершенство методов инженерного проектирования искусственных нейрон-

ных сетей зачастую приводит к тому, что достигнутая на этапе компьютерного моделирования точность не обеспечивается в реальных условиях эксплуатации при воздействии внутренних или внешних дестабилизирующих факторов [8].

Обеспечение заданной точности функционирования ИНС возможно за счёт повышения требований к параметрам элементной базы устройств их реализации, а также к точности обрабатываемой информации. Данный подход увеличивает стоимость, трудоемкость, а также удлиняет сроки разработки ИНС.

Одним из обязательных условий обеспечения точности функционирования ИНС является учет отклонений значений показателей точности в реальных условиях эксплуатации от значений, достигнутых на этапе проектирования и компьютерного моделирования. Разработанные до настоящего времени подходы к решению данной задачи позволяют проводить уточнение проектов лишь для узкого класса ИНС. Кроме того, большинство известных методов предназначены для определения пределов отклонения погрешностей лишь для обрабатываемых носителей информации (сигналов), в то время как ИНС - это частный случай информационных систем, где качество функционирования определяется точностью обработки самой информации [9]. Как показали исследования авторов, применимость общетехнических методов теории расчёта допусков также ограничена вследствие ряда особенностей ИНС [8,9].

В работах [8-13] авторами предложены новые методы инженерного проектирования ИНС, позволяющие по критериям требуемой точности функционирования выбрать оптимальные параметры их элементов и назначить допуски на изготовление. Для этого предложено имитировать возможные пределы допускаемых значений погрешностей параметров (дестабилизирующие воздействия) ИНС на компьютерных моделях путём варьирования значений параметров нейронов, а также шумов во

входной информации и оценивать степень их влияния на точность функционирования сетей.

По результатам исследований разработан нейросетевой алгоритм контроля параметров аналоговых сигналов, формируемых передающими блоками радиотехнической системы. Контролируемыми параметрами являются фазовый сдвиг и относительное отклонение частоты линейно-частотномодулированных (ЛЧМ) импульсов на фоне шумов [5].

В аппаратных реализациях нейроморфных ТСМ в виде аналоговых нейрочипов для передачи информации активно используются частотно-импульсно модулированные (ЧИМ) сигналы [1,14,15,16]. Для решения задачи контроля параметров ЧИМ сигналов достаточно знать, соответствуют их значения или не соответствуют техническим условиям (ТУ), что можно сделать путём сравнения с эталоном. Поэтому необходимо синтезировать ИНС, способную фиксировать превышение допустимого уровня погрешности в обрабатываемом ТСМ сигнале, классифицировать сигнал как соответствующий или не соответствующий ТУ и принять решение о необходимости регулировочно-ремонтных операций с контролируемым

ТСМ. Решение задачи на основе данного подхода позволяет значительно ускорить процесс ТК ТСМ и повысить его достоверность.

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 допустимого уровня погрешности обработки сигнала в ТСМ;
3. По выходному значению ИНС принимается решение о соответствии/не соответствии ТУ контролируемого ТСМ.

Контроль точности функционирования ТСМ будем проводить на основании анализа выборки тестового ЧИМ сигнала [15,16] (рис. 1) с выхода нейросетевого устройства [12], реализованного на основе мемристоров. Моделирование проведем в среде MATLAB с использованием Neural Network Toolbox.

Рассмотрим применение алгоритма контроля точности функционирования ТСМ на примере ИНС радиально-базисных функций (РБФ).

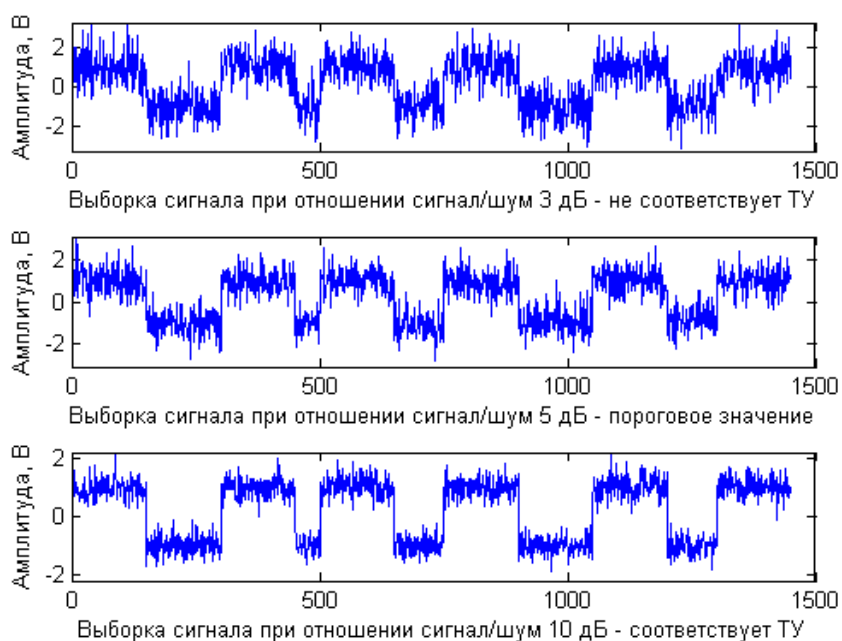
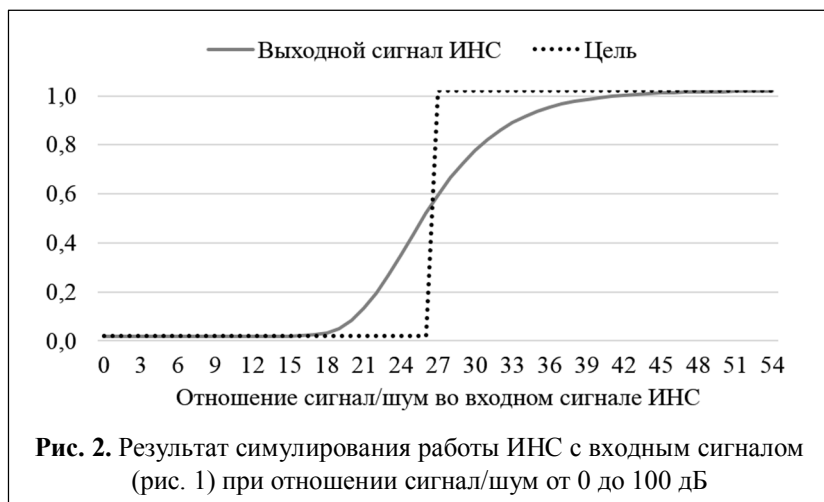


Рис. 1. Выходной сигнал рассматриваемого ТСМ



Эксперимент

В процессе функционирования ТСМ на них воздействуют внешние и внутренние дестабилизирующие факторы [6-7]. Природа данных воздействий заключается в тепловом шуме элементов ТСМ, постепенном выходе из строя элементов мемристорных матриц, аддитивных и мультипликативных шумах каналов связи и т.д. Результатом этих процессов является появление погрешностей значений параметров выходных сигналов, превышение допустимого уровня которых приводит к отказу ТСМ.

Для рассматриваемого варианта ИНС в соответствии с рис. 2 средним пороговым значением изменения выходного сигнала является $q_{с/ш}=27$ дБ. Необходимо отметить, что путём настройки параметров сети данное значение можно корректировать под конкретную задачу (рис. 3).

В соответствии с предложенным алгоритмом требуется рассчитать выходное значение ИНС $A_{вых}$, необходимое для принятия решения о соответствии ТУ уровня шума в выходном сигнале ТСМ. В таблице 1 приведены статистические данные, полученные при определении A .

В соответствии с таблицей 1 для $q_{с/ш}=5$ дБ среднее значение выходного сигнала ИНС $M[A_{вых}]=0,2847$. Протестируем работу ИНС на интервале, содержащем тестовый сигнал, задав найденное значение порога (рис. 4).

Как видно на рис. 4 при периодическом выходе тестового сигнала с ТСМ с допустимой амплитудой шума ($q_{с/ш}=10$ дБ), алгоритм контроля сигнализирует о «соответствии ТУ» контролируемого устройства. При выходе с ТСМ сигнала с отношением сигнал/шум 4дБ алго-

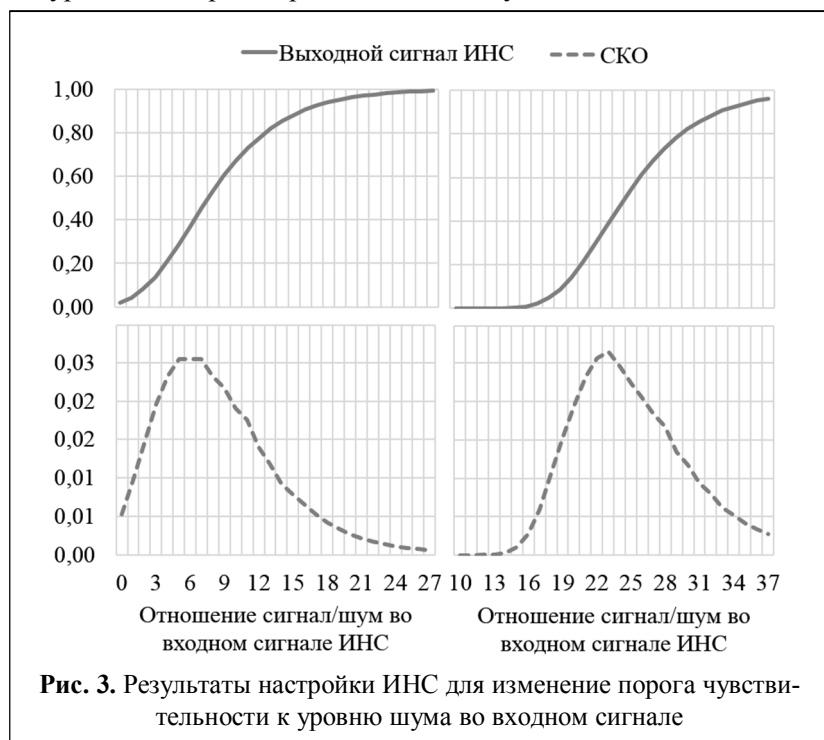


Таблица 1. Статистические данные симулирования ИНС в MATLAB при количестве повторений 1000

$q_{с/ш}$, дБ	Статистическое среднее выхода ИНС ($M[A_{\text{вых}}]$)	СКО	$q_{с/ш}$, дБ	Статистическое среднее выхода ИНС ($M[A_{\text{вых}}]$)	СКО
4,0	0,2045	0,0231	5,1	0,2915	0,0251
4,1	0,2133	0,0234	5,2	0,3000	0,0252
4,2	0,2189	0,0234	5,3	0,3093	0,0260
4,3	0,2274	0,0248	5,4	0,3165	0,0262
4,4	0,2350	0,0249	5,5	0,3248	0,0250
4,5	0,2442	0,0240	5,6	0,3341	0,0254
4,6	0,2520	0,0249	5,7	0,3419	0,0263
4,7	0,2585	0,0249	5,8	0,3505	0,0258
4,8	0,2662	0,0259	5,9	0,3582	0,0265
4,9	0,2765	0,0254	6,0	0,3674	0,0262
5,0	0,2847	0,0252	5,1	0,2915	0,0251

ритм контроля фиксирует отказ устройства.

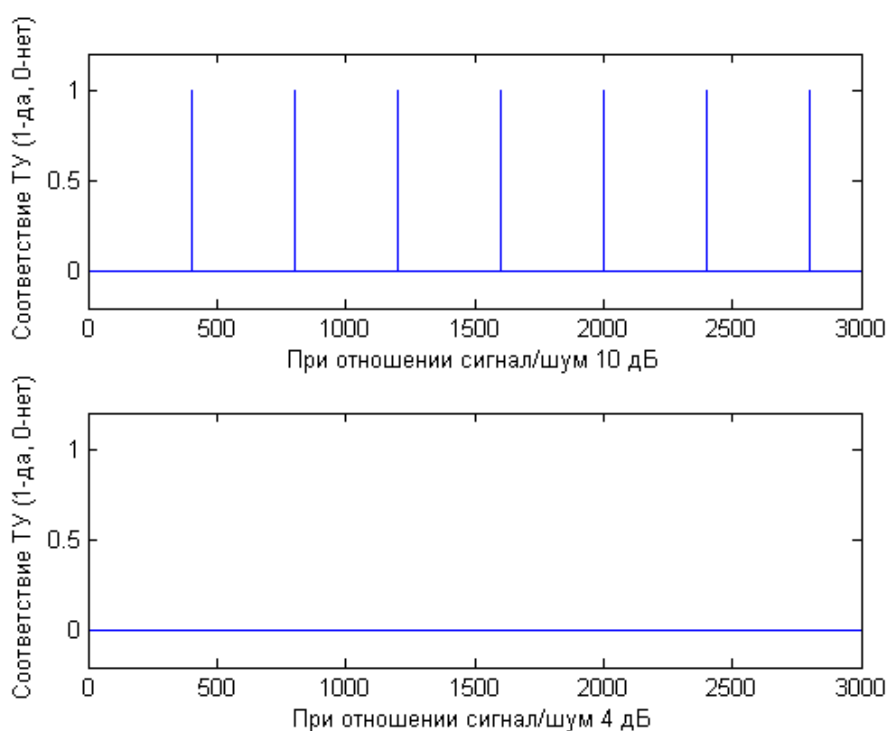
Определим оценку вероятности ошибки при проведении контроля, 10000 раз симулируя работу ИНС для разных значений отношения сигнал/шум.

Результаты исследования (таблица 2) показывают, что наибольшая вероятность ошибки (4,05%) при отношении сигнал/шум $q_{с/ш}=5$ дБ во входном сигнале симметрично снижается и

составляет 0,01% при $A_{\text{вых}}=6$ дБ и 0,04% при $A_{\text{вых}}=4$ дБ.

Заключение

1. Предложен общий подход к разработке методов контроля точности функционирования ТСМ. В основе данного подхода лежит применение нейросетевого распознавания сигналов, позволяющее фиксировать превышение допус-

**Рис. 4.** ТК ТСМ с помощью предложенного алгоритма

каемого уровня погрешности их обработки в ТСМ.

2. Разработаны и исследованы ИНС РБФ для контроля уровня аддитивных шумов ЧИМ сигналов, широко применяемых в ТСМ.

3. Показано, что разработанные ИНС позволяют с высокой точностью фиксировать сигналы со значениями параметров, несоответствующими ТУ.

4. Результаты проведённых исследований могут быть полезны для разработки инженерных методов и алгоритмов проектирования универсальных и специализированных ТСМ.

Таблица 2. Вероятность ошибки при проведении ТК с применением ИНС в зависимости от отношения сигнал/шум во входном сигнале.

$q_{с/ш}$, дБ	Статистическое среднее выхода ИНС	СКО	Вероятность ошибки, %
4,0	0,2047	0,0230	0,04
4,1	0,2121	0,0231	0,05
4,2	0,2192	0,0233	0,19
4,3	0,2274	0,0240	0,3
4,4	0,2354	0,0243	0,53
4,5	0,2431	0,0242	0,87
4,6	0,2511	0,0246	1,77
4,7	0,2591	0,0247	2,38
4,8	0,2673	0,0251	3,12
4,9	0,2752	0,0251	3,64
5,0	0,2832	0,0252	4,05
5,1	0,2918	0,0254	3,52
5,2	0,2999	0,0257	3,05
5,3	0,3085	0,0257	2,47
5,4	0,3164	0,0257	1,78
5,5	0,3250	0,0259	0,96
5,6	0,3335	0,0261	0,51
5,7	0,3417	0,0258	0,41
5,8	0,3502	0,0256	0,08
5,9	0,3585	0,0261	0,09
6,0	0,3669	0,0259	0,01

Литература

1. Галушкин А.И. Нейрочипы и нейроморфные ЭВМ: проблемы моделирования ИНФОРМАЦИ-

ОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, №12. Том 21. 2015. С. 942—949.

2. Храмов К.К., Жиганов С.Н. Исследование характеристик цифровых фильтров в программно-аппаратном устройстве оценки параметров модуляции ЛЧМ-сигналов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2011. – № 3. – С. 30-34.

3. Kostrov V.V., Zhiganov S.N. Radio measurements: Investigation of the characteristics of signal filters based on an interference compensator with cross connections // Measurement Techniques. Vol. 41. Issue 12. 1998. P. 1142-1145.

4. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 496 с.

5. Danilin S.N., Makarov M.V., Shchanikov S.A. Infocommunication systems parameter monitoring by means of artificial neural network devices // 24th Int Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. 2014. P. 318-319.

6. Galushkin A.I., Danilin S.N., Shchanikov S.A. The research of memristor-based neural network components operation accuracy in control and communication systems // Control and Communications, 2015 International Siberian Conference on. 2015. P. 1-6.

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

8. Galushkin A.I., Danilin S.N., Panteleev S.V. Quantitative determination of fault tolerance for neuronetwork devices of infocommunication systems // 24th Int Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. 2014. P. 328-329.

9. Danilin S.N., Makarov M.V., Shchanikov S.A. Numerical simulation of neural network components of controlling and measuring systems // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, 2014 International Conference on. 2014. P. 1-4.

10. Danilin S.N., Makarov M.V., Shchanikov S.A. Design of artificial neural networks with a specified quality of functioning // International Conference Engineering & Telecommunication - En&T 2014. 2014. P. 67-71.

11. Данилин С.Н., Макаров М.В., Щаников С.А. Комплексный показатель качества работы нейронных сетей // Информационные технологии. – 2013. – №5. – С. 57-59.

12. Danilin S.N., Makarov M.V., Shchanikov S.A. The method of tolerance increasing to internal and external noises for neural network devices // 24th Int Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. 2014. P. 320-321.

13. Danilin S.N., Makarov M.V., Shchanikov S.A. The development of a neuronetwork component for technical systems of mechanical engineering // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, 2014 International Conference on. 2014. P. 1-4.

14. Kim K. H, Gaba S., Wheeler D., Cruz-Albrecht J. M., Hussain T., Srinivasa N., Lu W. A functional hybrid memristor crossbar-array/CMOS system for data storage and neuromorphic applications // Nano Letters. Vol. 12. 2012.

15. Adhikari et al. Memristor Bridge Synapse-Based Neural Network and Its Learning // IEEE Trans-actions

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

Поступила 29 декабря 2015 г.

on neural networks and learning systems. 2012. Vol. 23. No. 9. P. 1426-1435.

16. H. Kim, M. P. Sah, C. Yang, T. Roska, and L. O. Chua Neural synaptic weighting with a pulse-based memristor circuit // IEEE Trans. Circuit Syst. I. Vol. 59. No. 1. Jan. 2012. P. 148–158.

English

Neural network control of accuracy in memristor-based technical equipment functioning

Alexander Ivanovich Galushkin - Doctor of Technical Sciences, Professor Deputy Head Department of Innovation and High Technology Moscow Institute of Physics and Technology (State University).

Sergey Nikolaevich Danilin – Candidate of Technical Sciences Associate Professor Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov.

Sergey Andreevich Shchanikov – Candidate of Technical Sciences Associate Professor Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov.

E-mail: seach@inbox.ru.

Address: 602264, Murom, Orlovskaya 23.

Abstract: Application of memristors for developing modern technical equipment (TE) (high-performance computing systems, memory chips, sensors, etc.) enables to improve its quality and quantity characteristics (speeding up, reduction in power consumption, etc.) due to resuming analog signal processing. Thus defining adequate place for application of analog information technologies in structure of TE and ensuring control of preset accuracy of information processing is binding. Recurrent technical inspection (TI) of parameters of its units and modules, has to be performed for ensuring reliability of output information in the process of manufacture and operation of modern technical equipment. To accomplish the task of controlling signal parameters it is suffice to know whether their values correspond or do not correspond to the technical requirements (TR) and that is via pattern comparison. Therefore, ANN has to be constructed capable to fix exceeding admissible error level in MTE processed signal by the need to synthesize; to classify a signal as TR corresponding, or TR non-corresponding and to make a decision about necessity in adjustment&maintenance works with controlled MTE. The problem solution based on this approach enables to considerably accelerate TI process of MTE and to increase its reliability. Application of the suggested approach is examined through the example of neural network control of additive noise level in the output pulse-frequency modulated signal of MTE. Research results manifest that most error probability of TI using ANN is 4,05% with signal-to-noise ratio =5 dB symmetrically decreases in the input signal and makes 0,01% at 6dB and 0,04% at 4 of dB. The results of the conducted researches can be useful for the development of engineering methods and algorithms for designing all-purpose and specialized MTE. The research work was fulfilled with the assistance of RFFI grant No. 15-07-08330.

Key words: artificial neural networks, neurocomputers, memristors, functioning accuracy, signal processing.

References

Galushkin A.I. Neurochips and neuromorphic computers: modeling problems "Informatsionnye Tekhnologii" No. 12. Volume 21. 2015 P. 942 - 949.

2. Khranov K.K., Zhiganov S. N. Features research of digital filters in the hardware-software device of parameters evaluation of linear FM signals. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. - 2011. - No. 3. – P. 30-34.

3. Kostrov V.V., Zhiganov S.N. Radio measurements: Investigation of the characteristics of signal filters based on an interference compensator with cross connections. - Measurement Techniques. Vol. 41. Issue 12. 1998. P. 1142-1145.

4. Galushkin A.I. Neural networks: theory fundamentals. - M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2010. - 496 P.

5. Danilin S.N., Makarov M.V., Shchanikov S.A. Infocommunication systems parameter monitoring by means of artificial neural network devices. - 24th Int Crimean Conference Microwave & Telecom-munication Technology. 2014. P. 318-319.

6. Galushkin A.I., Danilin S.N., Shchanikov S.A. The research of memristor-based neural network components operation accuracy in control and communication systems. - Control and Communications, 2015 International Siberian Conference on. 2015. P. 1-6.
7. Danilin S.N., Shchanikov S. A. Research of accuracy in functioning of memristor-based RTS neural network components. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. - 2015. - No. 1. – P. 39-48.
8. Galushkin A.I., Danilin S.N., Panteleev S.V. Quantitative determination of fault tolerance for neuronetwork devices of infocommunication systems. - 24th Int Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. 2014. P. 328-329.
9. Danilin S.N., Makarov M.V., Shchanikov S.A. Numerical simulation of neural network components of controlling and measuring systems. - Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, 2014 International Conference on. 2014. P. 1-4.
10. Danilin S.N., Makarov M.V., Shchanikov S.A. Design of artificial neural networks with a specified quality of functioning. - International Conference Engineering & Telecommunication - En&T 2014. 2014. P. 67-71.
11. Danilin S.N., Makarov M. V., Shchanikov S. A. Integrated index of neural networks operation efficiency. - Informatsionnye tekhnologii. - 2013.-№5. – P.57-59.
12. Danilin S.N., Makarov M.V., Shchanikov S.A. The method of tolerance increasing to internal and external noises for neural network devices. - 24th Int Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. 2014. P. 320-321.
13. Danilin S.N., Makarov M.V., Shchanikov S.A. The development of a neuronetwork component for technical systems of mechanical engineering. - Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, 2014 International Conference on. 2014. P. 1-4.
14. Kim K. H, Gaba S., Wheeler D., Cruz-Albrecht J. M., Hussain T., Srinivasa N., Lu W. A functional hybrid memristor crossbar-array. CMOS system for data storage and neuromorphic applications. - Nano Letters. Vol. 12. 2012.
15. Adhikari et al. Memristor Bridge Synapse-Based Neural Network and Its Learning. - IEEE Transactions on neural networks and learning systems. 2012. Vol. 23. No. 9. P. 1426-1435.
16. H. Kim, M. P. Sah, C. Yang, T. Roska, and L. O. Chua Neural synaptic weighting with a pulse-based memristor circuit. - IEEE Trans. Circuit Syst. I. Vol. 59. No. 1. Jan. 2012. P. 148-158.
9. V. Yu. Zhukov, Schukin G.G. Current state and trends of weather radars network. XXIV All-Russian scientific conference "Radio propagation" devoted to the 100 anniversary since the birth of professor V. M. Polyakov. Conference works. Irkutsk, 2014, pp. 133-136.
10. Doppler weather radar DMRL-S. Operation manual.
11. Manual on weather support for civil aviation of Russia (NMO GA-95).
12. Zhukov V.Yu., Schukin G.G. On radar measurements' features of hydrometeors radial speed with two-modal spectrum of signal reflected by them. Works of XXIII All-Russian symposium "Radar research of environments", St. Petersburg, 2013, pp. 337-344.
13. Louis H. Jansen, Gerard A. Van Der Spek. The Shape of Doppler Spectra from Precipitation. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. AES-21, No. 2 March 1985, pp.208 - 219.
14. Valery M. Melnikov, Richard J. Doviak. Turbulence and Wind Shear in Layers of Large Doppler Spectrum Width in Stratiform Precipitation. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. Vol. 26, March 2009, pp.430 - 443.
15. Lavrukevich U., Pushkov A., Sedletsky R., Vovshin B., Vylegzhanin I. "The Theory and Practice of Application Pseudo Random Signals in Doppler Meteoradars". Proceedings on International Radar Symposium (IRS-2011), Leipzig (Germany), 2011, pp.256-261.
16. Zhukov V. Yu., Schukin G.G. State and trends of Doppler weather radar network. Meteorologiya i gidrologiya, 2014, No. 2, pp. 92-100.
17. Valery M. Melnikov, Dusan S. Zrnec. Estimates of Large Spectrum Width from Autocovariances. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. Vol. 21, Jun 2004, pp.969 - 974.
18. Efremov V. S., Vylegzhanin I.S., Vovshin B. M., Lavrukevich V. V., Pushkov A.A. The first results of operational Doppler and polarization measurements of moisture target characteristics in DMRL-S. Collection of works of the 2nd All-Russian conference "Problems of Military and Applied Geophysics and Environmen Monitoring", v.1, St. Petersburg, 2012, pp. 370-380.
19. Lavrukevich V.V., Pushkov A.A. Estimation of spectral characteristics of moisture target in future DMRL. Works of XXVII All-Russian symposium "Radar research of environments", v.2, S-Pb, 2011, pp. 318-323.
20. Zhukov V. Yu., Schukin G.G. Justification of method of Doppler frequency shift's estimation of moisture target echo signal with non-Gaussian form of their spectrum. 3-i Vserossiyskiye Armandovskiye chteniya, 2013, Murom, 2013, pp.174-180.