

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623428>

Проектирование нейрона на базе мемристоров для спайковых нейронных сетей

В.Ю. Островский*, О.С. Дружина, О. Камаль, Т.И. Каримов, Д.Н. Бутусов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Основной целью проектирования нейроморфных систем является преодоление ограничений энергоэффективности и масштабирования классических вычислительных систем архитектуры фон Неймана путём имитации нервной системы животных за счёт выполнения вычислений в памяти, кодирования информации в импульсных сигналах и достижения адаптивности. Следование данным принципам позволяет повысить энергоэффективность и скорость вычислений в решении задач машинного обучения, в том числе для биомедицинских приложений, встраиваемых и киберфизических систем. Использование функциональных блоков, моделирующих основные элементы центральной нервной системы — нейроны и синапсы, может дать преимущество в реализации обучения на чипе. Использование электронных компонентов на основе мемристивных устройств, которые меняют свое сопротивление в зависимости от протекшего через них заряда, открывает новые возможности для аппаратной реализации нейроморфных систем. Эти устройства имеют преимущества по сравнению с традиционной транзисторной электроникой в энергопотреблении, плотности интеграции элементов и скорости работы. Для достижения лучших результатов архитектура нейроморфных систем должна проектироваться с оптимизацией на уровне таких устройств.

Компоненты на основе мемристоров применяются для аппаратной реализации как нейронов, так и синапсов. В данной работе фокус сделан на создании мемристивных нейроноподобных генераторов спайковых сигналов. Из литературы известны мемристивные нейроны на базе локально активного элемента из диоксида ванадия VO_2 , реализующего участок отрицательного дифференциального сопротивления ВАХ. Среди таких разработок можно выделить спайковый нейрон с частотной адаптацией [1], однако к его недостаткам можно отнести физическое разделение мемристивного и локально активного элементов, что влечёт увеличение энергетических затрат и ухудшает степень его интеграции. В работе [2] представлены минимальные модели мемристивных нейронов, реализующих принцип интеграции и возбуждения с утечкой. Недостатком представленных схем является необходимость подачи импульсов отрицательного напряжения на батарею постоянного тока для переключения мемристора в исходное состояние высокого сопротивления, что ограничивает область его применения в нейроморфных системах. В настоящей работе представлена модель нейрона, лишённого данных недостатков за счёт использования для формирования спайков отрицательного дифференциального сопротивления самого мемристора, а также включения дополнительных схемных компонентов для поддержания циклов переключений сопротивления мемристора.

Предлагаемая модель нейрона реализована в SPICE-среде NI Multisim 14.2 с последующей верификацией в инструментальной среде NI LabVIEW 2022. Ток в мемристивной ветви эквивалентной схемы нейрона представлен уравнениями модифицированной модели обобщённого среднего метастабильного переключения мемристора с самонаправленным каналом [3]. Простота эквивалентной схемы нейрона достигнута за счёт объединения всех нелинейных характеристик, необходимых для генерации спайков, в единой модели мемристора. Экспериментальная часть исследования выполнена с применением доступных мемристоров фирмы Knowm и лабораторной станции прототипирования NI ELVIS III. Тестирование предлагаемой модели нейрона проведено с подачей синусоидального и прямоугольного входных сигналов. Установлен рефракторный период модели нейрона.

Выбранный в работе стек технологий компьютерного и полунатурного моделирования использован в рамках концепции исследовательского проектирования электронных устройств, учитывающей необходимость уточнения свойств (идентификации) объекта проектирования или его компонентов непосредственно внутри цикла разработки.

Ключевые слова: нейрон; мемристор; переключение сопротивления; идентификация; компьютерное моделирование; исследовательское проектирование.

Как цитировать:

Островский В.Ю., Дружина О.С., Камаль О., Каримов Т.И., Бутусов Д.Н. Проектирование нейрона на базе мемристоров для спайковых нейронных сетей // Гены и клетки. 2023. Т. 18, № 4. С. 827–830. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623428>

Рукопись получена: 09.06.2023

Рукопись одобрена: 26.11.2023

Опубликована online: 20.01.2024

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Источник финансирования. Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 22-19-00573 «Перспективные методы идентификации и моделирования динамических систем с нелинейными компонентами».

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ignatov M., Ziegler M., Hansen M., et al. A memristive spiking neuron with firing rate coding // *Front Neurosci.* 2015. V. 9. P. 376. doi: 10.3389/fnins.2015.00376
2. Kang S.M., Choi D., Eshraghian J.K., et al. How to build a memristive integrate-and-fire model for spiking neuronal signal generation // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers.* 2021. Vol. 68, N 12. P. 4837–4850. doi: 10.1109/TCSI.2021.3126555
3. Ostrovskii V., Fedoseev P., Bobrova Y., Butusov D. Structural and parametric identification of known memristors // *Nanomaterials (Basel).* 2021. Vol. 12, N 1. P. 63. doi: 10.3390/nano12010063

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

* В.Ю. Островский; адрес: Российская Федерация, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф;
e-mail: vyostrovskii@etu.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623428>

Design of a memristor-based neuron for spiking neural networks

V.Yu. Ostrovskii*, O.S. Druzhina, O. Kamal, T.I. Karimov, D.N. Butusov

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

The primary objective of neuromorphic system design is to surpass limitations in energy efficiency and scaling of classical von Neumann computing systems, through the emulation of animals' nervous systems. This is achieved by conducting calculations in memory and encoding information in impulse signals, ultimately leading to enhanced adaptability. Adhering to these principles allows for improved energy efficiency and computational speed when solving machine learning problems, encompassing biomedical applications, embedded systems, and cyber-physical systems. Functional blocks modeling the main elements of the central nervous system, namely neurons and synapses, offer an advantage in implementing learning on a chip. The use of memristive electronic components, capable of altering their resistance based on the charge flowing through them, opens new doors for hardware implementation of neuromorphic systems. These devices offer advantages over conventional transistor electronics with respect to power consumption, component density, and performance. To achieve optimal results, the architecture of neuromorphic systems should be optimized at the device level.

Memristive components are utilized to create neurons and synapses. This thesis is specifically focused on producing memristive neuron-like spike signal generators. Previously, memristive neurons were crafted using a locally active element comprised of vanadium dioxide VO_2 , which incorporated a negative differential resistance section of the IV-curve. One of the recent advancements in this field is a spiking neuron with frequency adaptation [1]. Its drawbacks, however, involve separating the memristive and locally active elements physically, resulting in higher energy consumption and decreased integration quality. In [2], models of memristive neurons with minimal complexity are introduced, which incorporate the Leaky Integrate-and-Fire principle. However, the circuits presented require the application of negative voltage pulses to a DC battery to reset the memristor to its initial high-resistance state. This limitation restricts its sphere of application in neuromorphic systems. This paper proposes a model of a neuron that overcomes these limitations by using the negative differential resistance of the memristor to generate spikes, along with integrating supplementary circuit components to sustain the resistive switching cycles of the memristor.

The neuron model under consideration is implemented using the NI Multisim 14.2 SPICE environment and has been verified in the NI LabVIEW 2022 tool environment. The equations of the modified model of the generalized mean metastable switch of the memristor with self-directed channel [3] represent the current in the memristor branch of the neuron equivalent circuit. The simplicity of the equivalent circuitry of the neuron is attained by merging all the nonlinear features necessary for spike generation into one memristor model. The experimental phase of the study employed obtainable memristors from Knowm Corporation and the laboratory prototyping platform NI ELVIS III. The investigation of the proposed neuron model was accomplished through the application of sinusoidal and rectangular input signals. The refractory time of the neuron model was calculated.

The chosen stack of computer simulation and semi-natural modeling technologies is applied within the research-driven design concept of electronic devices. This approach considers the importance of refining the properties and identification of the design object or its components during the development cycle.

Keywords: neuron; memristor; resistive switching; identification; computer simulation; research-driven design.

To cite this article:

Ostrovskii VYu, Druzhina OS, Kamal O, Karimov TI, Butusov DN. Design of a memristor-based neuron for spiking neural networks. *Genes & cells*. 2023;18(4):827–830. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623428>

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Funding sources. The work is supported by the Russian Science Foundation, project No. 22-19-00573 "Advanced Methods for Identification and Simulation of Dynamical Systems with Nonlinear Components".

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Received: 09.06.2023

Accepted: 26.11.2023

Published online: 20.01.2024

REFERENCES

1. Ignatov M, Ziegler M, Hansen M, et al. A memristive spiking neuron with firing rate coding. *Front Neurosci.* 2015;9:376. doi: 10.3389/fnins.2015.00376
2. Kang SM, Choi D, Eshraghian JK, et al. How to build a memristive integrate-and-fire model for spiking neuronal signal generation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers.* 2021;68:12:4837–4850. doi: 10.1109/TCSI.2021.3126555
3. Ostrovskii V, Fedoseev P, Bobrova Y, Butusov D. Structural and parametric identification of known memristors. *Nanomaterials (Basel).* 2021;12(1):63. doi: 10.3390/nano12010063

AUTHORS' CONTACT INFO

* V.Yu. Ostrovskii; address: 5F Professora Popova street, 197022 Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: vyostrovskii@etu.ru