

УДК 004.383.8.032.26

## Исследование и моделирование синаптической пластичности мемристивных устройств

Щаников С.А., Антонов А.М., Королев Л.Я.

В статье приведены результаты моделирования синаптической пластичности мемристивных устройств, проявляющейся при подаче импульсных сигналов различной полярности. Для моделирования использован язык программирования Python и численный метод Эйлера для решения дифференциальных уравнений. Результаты моделирования могут быть использованы при создании алгоритмов и цифро-аналоговых схем обучения спайковых нейронных сетей на базе мемристивных устройств.

*Ключевые слова:* мемристоры, спайковые нейронные сети, синаптическая пластичность, численное моделирование, компьютерное моделирование.

### Введение

Теория искусственных нейронных сетей (ИНС) на протяжении всей истории ее развития вдохновлялась результатами исследований принципов функционирования биологических нейронных сетей (БНС) [1]. Информация внутри БНС передается по сети нейронов, которые обладают некоторым потенциалом активации [2]. Сигнал, называемый спайк (от англ. “spike” – шип, всплеск), передается от одного нейрона к другому с помощью аксона и характеризуется частотой, длительностью и амплитудой. Контакты между нейронами образуются в строго определенных точках, называемых синапсами. В настоящее время считается [2], что феномены памяти и обучения у живых организмов возникают за счет механизмов синаптической пластичности, заключающейся в возможности изменения силы синапса и соответственно изменении параметров передаваемых сигналов. Существование синаптической пластичности приводит к тому, что нервная система может самостоятельно настраивать отдельные группы нейронов на выполнение различных функций.

Мемристивные устройства способны изменять свое сопротивление под действием электрического поля и протекавшего через него заряда, а также сохранять его длительное время [3]. Изменение сопротивления происходит в границах минимально и максимально возможных сопротивлений, называемых СНС (состояние низкого сопротивления) и СВС (состояние высокого сопротивления). Кривая, описывающая характеристику перехода

мемристивного устройства из одного состояния в другое под воздействием импульсов напряжения с разной формой, амплитудой и частотой, по своему виду схожа с экспериментальными измерениями синаптической пластичности в БНС [4]. Поэтому мемристивные устройства являются наиболее биоподобными искусственными аналогами синапсов нейронов живых систем и в перспективе позволят реализовать на практике нейроморфные архитектуры ИНС.

В данной статье рассматривается задача моделирования синаптической пластичности мемристивных устройств применительно для двух подходов. В первом подходе эффекты синаптической пластичности демонстрируются путем подачи на мемристивное устройство серии однополярных импульсов одинаковой амплитуды [5], а во втором – путем подачи пересекающихся биполярных спайков [6]. Рассмотрим более подробно каждый из них.

### Моделирование

В спайковых нейронных сетях мемристивное устройство связывает пресинаптические и постсинаптические нейроны (рис. 1). Пресинаптический нейрон во входном слое сети выступает в данном случае в роли генератора спайков, частота которых кодирует входную информацию. Например, для обработки изображений в оттенках серого, значения яркости каждого пикселя, представленные числами от 0 до 255 можно, представить различными частотами в диапазоне от 1 до 100 кГц. Спайки,

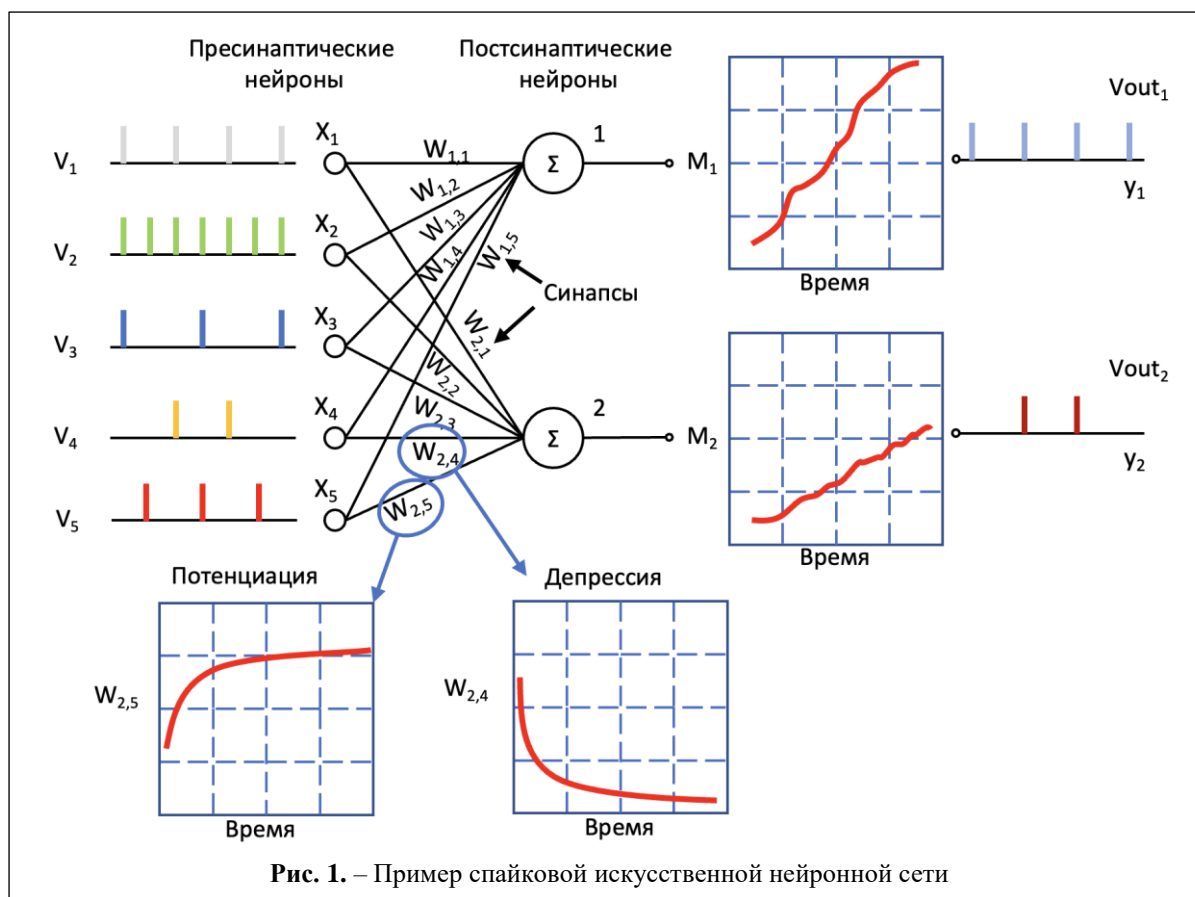


Рис. 1. – Пример спайковой искусственной нейронной сети

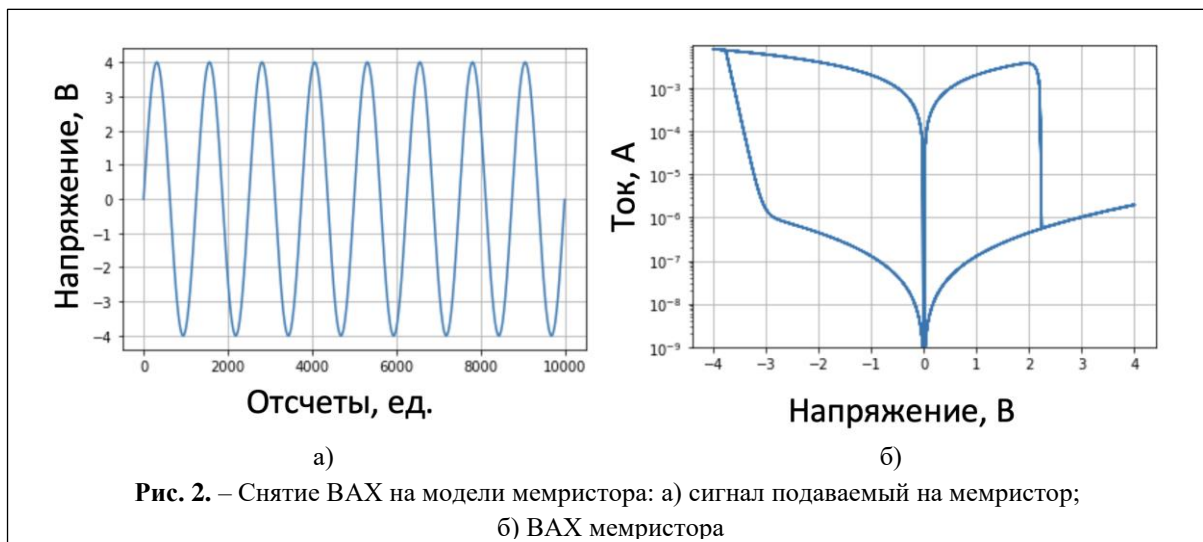
подаваемые на мемристивное устройство в течение определенного времени, меняют его сопротивление. Постсинаптический нейрон представляется в виде устройства, способного накапливать заряд со всех пресинаптических нейронов с учетом падения напряжений на мемристорах (так называемая мембрана нейрона  $M$ ). Он имеет некоторое пороговое значение заряда, превышение которого приводит к генерации спайка постсинаптическим нейроном. Конечное распределение сопротивлений мемристивных устройств задает функционал такой сети пресинаптических и постсинаптических нейронов и позволяет решать задачи в области робототехники, протезирования, телекоммуникаций и т.д.

Для исследования и моделирования синаптической пластичности будем использовать математическую модель мемристивного устройства, приведенную в [7]. Данная модель имеет несколько настраиваемых параметров, варьирование которых позволяет откалибровать характеристики моделируемого устройства в соответствии с реальными

вольт-амперными характеристиками (ВАХ) исследуемого мемристора (рис. 2).

Модель (рис. 2) представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих зависимость тока, напряжения и сопротивления через переменную состояния мемристора. Такие уравнения численно решаются методом Эйлера, что успешно реализуется на языке программирования Python. Скрипт на Python представляет собой решатель уравнений, описывающих ВАХ мемристивных устройств, с заданным временем дискретизации. Для модели (рис. 2) время дискретизации  $t_d = 10^{-5}$  с.

Проведем моделирование синаптической пластичности путем формирования серии импульсов с заданной одинаковой амплитудой и частотой (рис. 3) и подачи их на рассматриваемую модель мемристора. Входной сигнал, представленный на рис. 3 состоит из двух прямоугольных импульсов. Первый импульс имеет амплитуду напряжения, приводящую к изменению сопротивления мемристора. Эта амплитуда должна быть положительной или

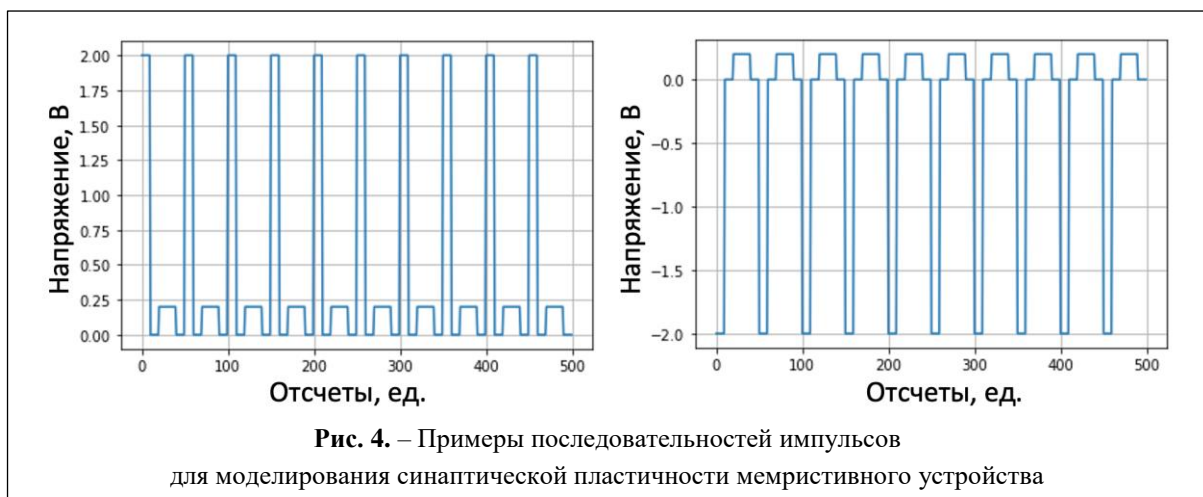


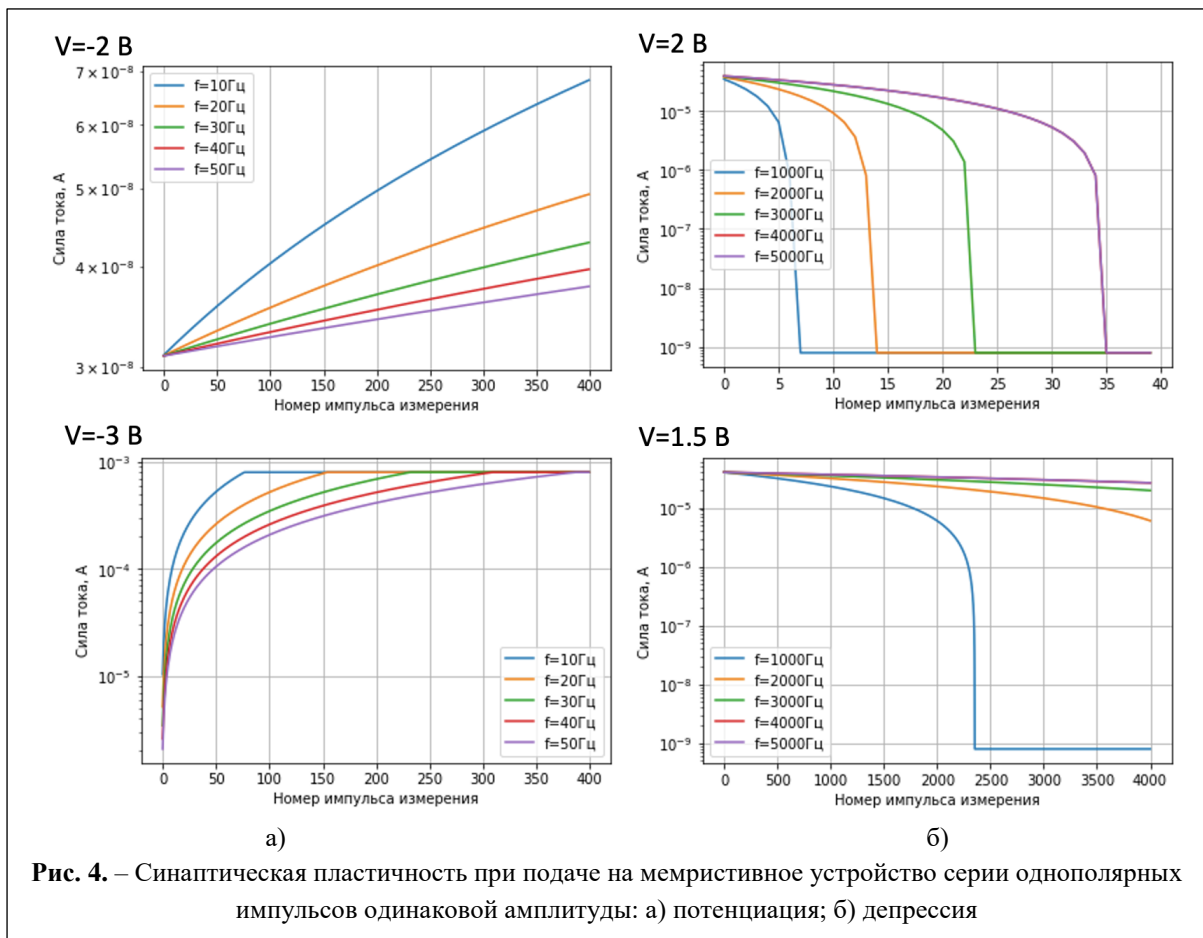
отрицательной в зависимости от того, нужно ли усилить или ослабить связь между пресинаптическим и постсинаптическим нейроном. Второй импульс – это импульс измерения текущего значения сопротивления мемристора. Его амплитуда и длительность подобрана таким образом, чтобы не менять сопротивления мемристивного устройства и обеспечивать возможность измерения тока в цепи с мемристором с некоторого нагрузочного сопротивления, либо с преобразователя «ток-напряжение».

На рис. 4 а) и б) представлены результаты моделирования синаптической пластичности для разных амплитуд и длительностей сигнала, генерируемого пресинаптическим нейроном. Из рис. 4 а) и б) видно, что оба параметра влияют на форму пластичности и их комбинация дает возможность подбирать та-

кие варианты, при которых сила связи нейронов будет меняться либо более плавно, либо быстрее, при меньшем числе импульсов.

Более биоподобную пластичность в мемристивных устройствах можно получить за счет применения подхода, при котором постсинаптический нейрон тоже принимает участие в изменении силы связи с пресинаптическим. В данном случае используется следующий принцип, обнаруженный для БНС, известный как правило Хебба (1949 г.): «Если аксон клетки А расположен настолько близко к клетке В, что может возбуждать ее, и если он многократно и непрерывно принимает участие в ее активации, то в одной или обеих клетках возникает какой-то процесс роста или метаболические изменения, и в результате эф-





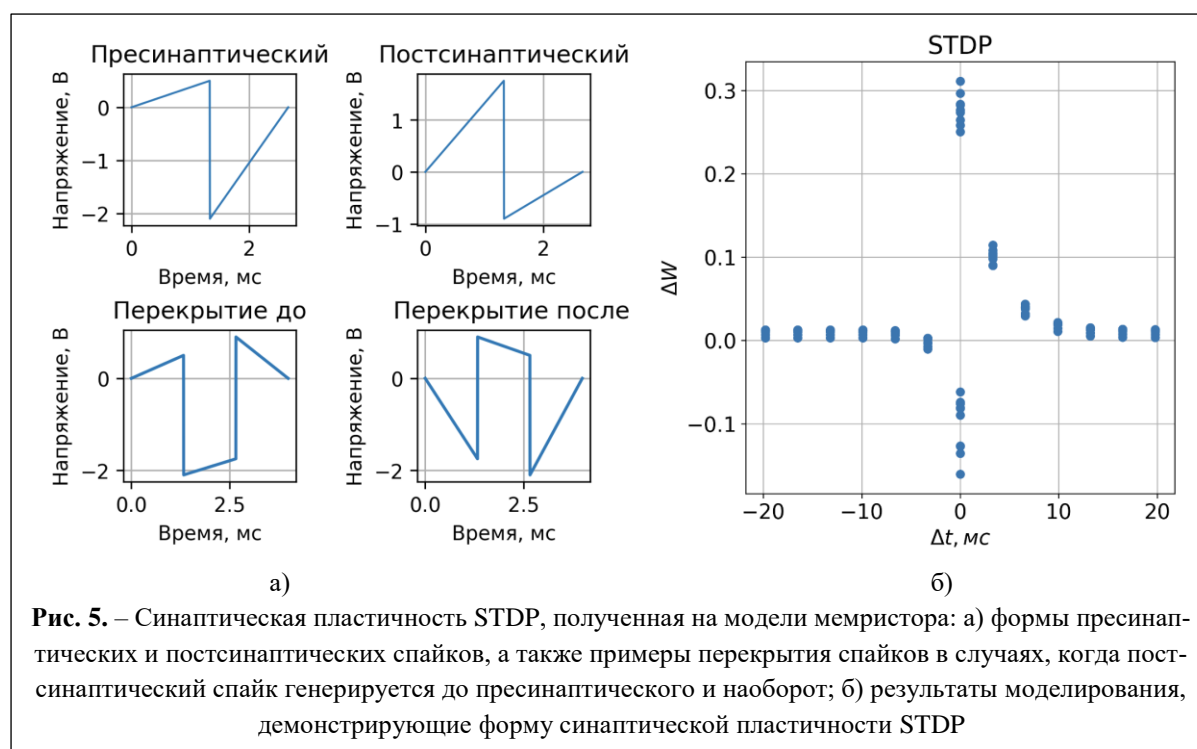
фektivность клетки А, как одного из активаторов клетки В, возрастает» [8]. Одним из вариантов реализации хеббовского правила обучения является пластичность зависящая от времени спайка – spike-timing-dependent plasticity (STDP). Согласно модели STDP, синаптический вес увеличивается, если пресинаптический нейрон генерирует спайк непосредственно перед постсинаптическим (что указывает на причинно-следственную связь), и синаптический вес уменьшается, если постсинаптический нейрон генерирует спайк непосредственно перед пресинаптическим (что указывает на отсутствие причинно-следственной связи) [9]. На рис. 5 показаны результаты моделирования синаптической пластичности вида STDP для рассматриваемой модели мемристивного устройства.

На рис. 5 а) показаны формы пресинаптического и постсинаптического спайков. Это биполярные треугольные импульсы, в которых положительные и отрицательные участки имеют различную амплитуду напряжения и

длительность. При подаче обоих спайков в канал с мемристивным устройством происходит их перекрытие, при этом постсинаптический спайк инвертируется, так как распространяется в обратном по отношению ко входу направлении. В зависимости от того, в какие моменты времени работы спайковой нейронной сети были сгенерированы спайки, форма результирующего сигнала, полученного после перекрытия, будет разной и соответственно такой сигнал будет приводить к разному изменению сопротивления мемристора. Это можно увидеть на рисунке 5 б), на котором по горизонтальной оси отложена разница во времени генерации пресинаптического и постсинаптического спайков, а по вертикальной – изменение веса синапса, рассчитанное по формуле:

$$\Delta W = \frac{W_{initial} - W_{current}}{W_{initial}} \cdot 100,$$

где  $W_{initial}$  – начальное значение веса;  $W_{current}$  – текущее значение веса.



**Рис. 5.** – Синаптическая пластичность STDP, полученная на модели мемристора: а) формы пресинаптических и постсинаптических спайков, а также примеры перекрытия спайков в случаях, когда постсинаптический спайк генерируется до пресинаптического и наоборот; б) результаты моделирования, демонстрирующие форму синаптической пластичности STDP

Из рис. 5 б) видно, что в случае, когда спайк от постсинаптического нейрона генерируется после спайка от пресинаптического нейрона (1 четверть), то сила связи увеличивается и наоборот – в случае, когда спайк от постсинаптического нейрона генерируется раньше спайка от пресинаптического нейрона (3 четверть), то сила связи уменьшается.

### Заключение

Таким образом, в данной работе были рассмотрены вопросы моделирования синаптической пластичности мемристивных устройств, применительно для двух подходов. В первом подходе синаптическая пластичность обеспечивается путем подачи на мемристивное устройство серии однополярных импульсов одинаковой амплитуды, а во втором – путем подачи пересекающихся биполярных спайков. Для моделирования использован язык программирования Python и численный метод Эйлера для решения дифференциальных уравнений. Результаты моделирования могут быть использованы при создании алгоритмов и цифро-аналоговых схем обучения спайковых нейронных сетей на базе мемристивных устройств.

*Работа выполнена при поддержке стипендии Президента РФ СП-5411.2021.5.*

### Литература

1. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории / А.И. Галушкин. Москва: Горячая линия-Телеком, 2013. 496 с.
2. От нейрона к мозгу / Пер. с англ. П. М. Балабана, А.В.Галкина, Р. А. Гиниатуллина, Р.Н.Хазипова, Л.С.Хируга. — М.: Едиториал УРСС, 2003 – 672 с.
3. Chua L.O. // IEEE Trans. Circuit Theory. 1971. V. 18. № 5. P. 507.
4. Surazhevsky I. A. et al. Noise-assisted persistence and recovery of memory state in a memristive spiking neuromorphic network //Chaos, solitons & fractals. – 2021. – Т. 146. – С. 110890.
5. Koryazhkina M. et al. Effect of pulse amplitude on depression and potentiation of ZrO<sub>2</sub> (Y)-based memristive synaptic device //2022 6th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – IEEE, 2022. – С. 147-150.
6. Emelyanov A. V. et al. Self-adaptive STDP-based learning of a spiking neuron with nanocomposite memristive weights //Nanotechnology. – 2019. – Т. 31. – №. 4. – С. 045201.
7. Gerasimova S. A. et al. Design of memristive interface between electronic neurons //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2018. – Т. 1959. – №. 1. – С. 090005.
8. Caporale N., Dan Y. Spike timing-dependent plasticity: a Hebbian learning rule //Annu. Rev. Neurosci. – 2008. – Т. 31. – С. 25-46.
9. Nikiruy K. E. et al. Dopamine-like STDP modulation in nanocomposite memristors //AIP Advances. – 2019. – Т. 9. – №. 6. – С. 065116.

**Поступила 04 ноября 2022 г.**

The article presents the results of modeling the synaptic plasticity of memristive devices, occurred when pulse signals of different polarity are applied. The Python programming language and the Euler numerical method for solving differential equations are used for modeling. The simulation results can be used to create algorithms and digital-analog circuits for training spiking neural networks based on memristive devices.

*Key words:* memristors, spiking neural networks, synaptic plasticity, numerical modeling, computer modeling.

---

*Щаников Сергей Андреевич* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории разработки систем искусственного интеллекта Муромского института (филиала) ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* seach@inbox.ru.

*Антонов Александр Михайлович* – лаборант-исследователь лаборатории разработки систем искусственного интеллекта Муромского института (филиала) ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* cfifant@mail.ru.

*Королев Леонид Ярославович* – студент кафедры информационных систем Муромского института (филиала) ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* madimtor@ya.ru.

*Адрес:* 602264, Муром, ул. Орловская, д. 23.