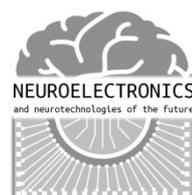


**Труды первой  
школы-конференции  
с международным участием**

**«НЕЙРОЭЛЕКТРОНИКА  
И НЕЙРОТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО»**

Нижний Новгород, 25-29 ноября 2024 г.

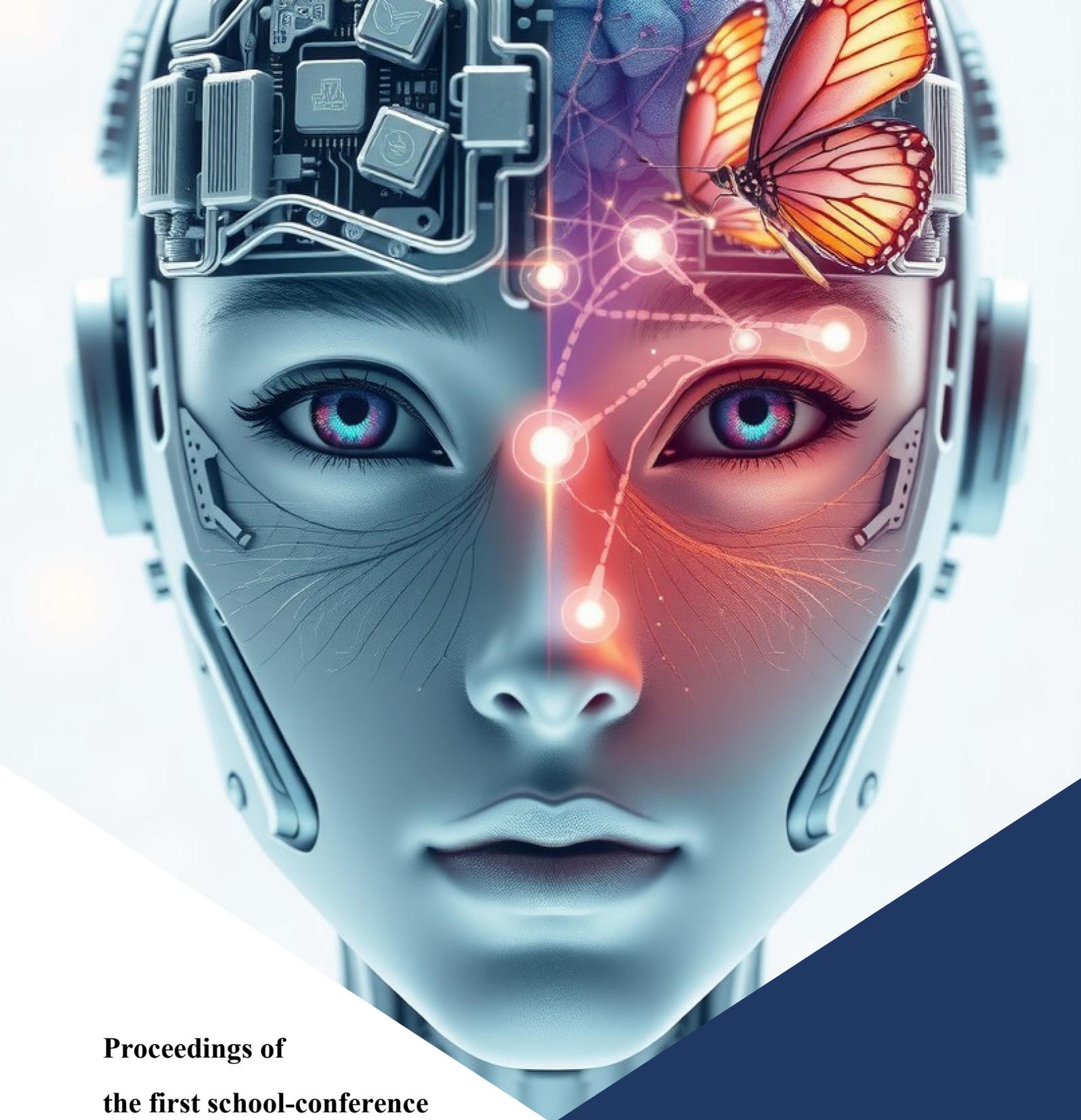


Редколлегия:

А.А. Федотов, В.А. Смирнов, О.Н. Горшков, А.Н. Михайлов, В.А. Демин,  
С.А. Щаников, В.Б. Казанцев, С.Ю. Гордлеева, З.Е. Вакулов,  
М.Н. Коряжкина, И.А. Борданов, Ю.А. Цыбина

**Труды первой школы-конференции с международным участием  
«НЕЙРОЭЛЕКТРОНИКА И НЕЙРОТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО»** (Нижний Новгород,  
25-29 ноября 2024 г.). Нижний Новгород: ННГУ, 2024. – 55 с.

Сборник содержит материалы докладов первой школы-конференции с международным участием «НЕЙРОЭЛЕКТРОНИКА И НЕЙРОТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО» (Нижний Новгород, 25-29 ноября 2024 г.), организованной Национальным исследовательским Нижегородским государственным университетом им. Н.И. Лобачевского. В рамках конференции ведущими специалистами в области нейроэлектроники и нейротехнологий впервые совместно обсуждались вопросы, связанные с механизмами работы мозга и нервной системы, воспроизведением этих механизмов в мозгоподобных информационно-вычислительных системах на новых принципах и новой элементной базе микро- и наноэлектроники, объединением синтетических и живых систем в рамках единых гибридных технологий нейросенсорики, нейроуправления, нейроинтерфейсов и биоморфной робототехники.



**Proceedings of  
the first school-conference  
with international participation**

**«NEUROELECTRONICS AND  
NEUROTECHNOLOGIES OF THE FUTURE»**

Nizhny Novgorod, November 25-29, 2024



Editorial Board:

A.A. Fedotov, V.A. Smirnov, O.N. Gorshkov, A.N. Mikhaylov, V.A. Demin,  
S.A. Shchanikov, V.B. Kazantsev, S.Yu. Gordleeva, Z.E. Vakulov,  
M.N. Koryazhkina, I.A. Bordanov, Yu.A. Tsybina

**Proceedings of the first school-conference with international participation  
«NEUROELECTRONICS AND NEUROTECHNOLOGIES OF THE FUTURE»** (Nizhny  
Novgorod, November 25-29, 2024). Nizhny Novgorod: UNN, 2024. – 55 p.

The proceedings include the papers presented at the first school-conference with international participation «NEUROELECTRONICS AND NEUROTECHNOLOGIES OF THE FUTURE» (Nizhny Novgorod, November 25-29, 2024), which was held by the National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod. Within the framework of the conference, leading specialists in the field of neuroelectronics and neurotechnology jointly discussed for the first time issues related to the mechanisms of the brain and nervous system operation, the reproduction of these mechanisms in brain-like information computing systems based on new principles and a new component base of micro- and nanoelectronics, the unification of synthetic and living systems within the framework of unified hybrid technologies of neurosensorics, neurocontrol, neurointerfaces and biomorphic robotics.



**Секция «Биоподобные  
электронные наноматериалы»**

**Section «Biosimilar electronic nanomaterials»**

Руководитель / соруководитель: А.А. Федотов, В.А. Смирнов  
Секретарь: З.Е. Вакулов

**Quantum theory of diffusive memristors**

N. Brilliantov<sup>1,2,\*</sup>, D. Ivanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Skolkovo Institute of Science and Technology, Russia*

<sup>2</sup>*University of Leicester, United Kingdom*

\*N.Brilliantov@skoltech.ru

We develop a first-principle quantum model for diffusive memristors, fabricated on amorphous silicon with the formation of conductive filaments, using electrochemical metallization technology [1]. The model is based on the quantum theory of tunneling through a barrier caused by the isolating layer between electrodes. The tunneling occurs via the localized electronic states, associated with impurities – the metallic ions randomly placed inside the isolating layer. Chains of the ions form conductive channels between the electrodes. The respective conductance of the chains is computed with the use of Lifshitz-Kirpichenkov theory [2]. The formation of the conductive chains is quantified using the diffusion equation for the metallic ions with the drift term due to applied electric field. We consider the diffusion of the ions in two regions – inside the conducting electrode, in the absence of electric field, and in the dielectric layer, under the action of the electric field. Firstly, the according partial differential equation is solved for the distribution of ions concentration in the bulk of the dielectric layer. Secondly, a system of random chains is generated by Monte Carlo method, based on the obtained local ion concentration. For a given system of random chains, we calculate the conductance of the system. In the lack of the electrical field, there are no ions in the bulk, and the conductive chains are lacking. When the field is applied, the ions start to move from the (positive) electrode to the other (negative) one. We observe that the conductance abruptly increases by a few orders of magnitude, after an application of the “set impulse”, when a voltage of about 5V is applied to the electrodes for about a few tens of seconds. The set impulse drives the ions from the positive to the negative electrode and leads to the formation of the conductive chains. In contrast, an application of an impulse of the opposite polarity drives the ions back and destroys the conductive chains. As the result, the application of such impulses restores the negligible conductance of the memristors. With the use of the developed model, we explore the respond of the memristor conductance to the application of set and reset impulses of different duration and amplitude. The theoretical predictions are compared with experimental data, obtained for the diffusive memristors [3, 4]. We also analyze the dependence of the memristor conductivity on temperature and observe its increase with increasing temperature [5]. This demonstrates a non-metallic nature of the conductance and confirms the tunneling mechanism.

[1] H. Yeon et al. *Nat. Nanotechnol.* (2020) **15**, 574-579

[2] I.M. Lifshitz et al. *JETP* (1979) **77**, 989-1016

[3] V.Ya. Kirpichenkov *JETP* (1999) **116**, 1048-1057

[4] V.Ya. Kirpichenkov et al. *JETP Lett.* (2016) **104**, 500-503

[5] A. Samsonova et al. *JETP* (2024) **166**, 255-260

**Bioinspired AlFeO<sub>3</sub> memristor with sensing, storage, and synaptic functionalities**

M. Kumar\*

*Indian Institute of Technology Jodhpur, India*

\*mkumar@iitj.ac.in

In traditional designs, sensory systems are separated from memory and computing units. Converting and transmitting data from analog sensing domains to digital storage leads to inefficient power usage and increased delay. In this study, we present an all-in-one memristor that can detect gamma radiation while also functioning as a data storage device, selector, and artificial synapse. The problem of sneak-path currents in crossbar arrays complicates the large-scale integration of oxide-based memristors for artificial neural networks. Resistive switching in AlFeO<sub>3</sub> is studied using different electrode materials (Ag, Au, Cr, Si and FTO), embedding metal (Ag, Au) nanocrystals to engineer a class of tunable memories in which forming free, multilevel, and bipolar resistive switching coexist with bidirectional threshold switching, capable of functioning as selector, memory, artificial synapse and dosimeter. Stoichiometric alterations induced by deposition temperature elicit a transition from bipolar to threshold switching within a single device. The concentration of electric field induced by the embedded metal nanocrystals influences the composition and stability of the filament. To tune the selector functionality, electrode engineering, high temperature deposition and nanocrystal seeding technique was employed. The devices emulate critical neural functions and demonstrate interconversion dynamics between short-term and long-term plasticity.

**Biomemristors based on carbon-based nanomaterials**

L. Wang\*

*Heilongjiang University, China*

\*wanglu@hlju.edu.cn

Carbon-based nanomaterials have the advantages of biocompatibility, thermal stability, and chemical stability, and they have shown excellent electrical properties in electronic devices. Memristor/Resistive random access memory (RRAM) has advantages over traditional memory in terms of low power consumption, high integrability, a fast reading speed and compatibility with CMOS technology. Its excellent performance has attracted the attention of researchers in various fields, and it has become a strong candidate to replace flash memory as a new generation of nonvolatile memory. Biomemristors are not only environmentally-friendly and sustainable but also offer the advantages of being biodegradable, biocompatible and compatible with flexible substrates [1-5]. We have carried out research on biomemristors based on carbon-based nanomaterials including graphene oxide, carbon nanotubes and graphene quantum dots. The biomemristor based on carbon-based nanomaterials has a simple structure, low power consumption, and enormous application potential for data storage, artificial intelligence, image processing, artificial neural networks and other applications.

- [1] L. Wang et al. *Adv. Sci.* (2024) **11**, 2308610
- [2] L. Wang et al. *ACS Sens.* (2023) **8**, 4810-4817
- [3] L. Wang et al. *ACS Sustain. Chem. Eng.* (2023) **11**, 2229-2237
- [4] L. Wang et al. *J. Alloys Compd.* (2023) **953**, 170119
- [5] L. Wang et al. *Appl. Phys. Lett.* (2022) **121**, 243505

**Исследование и моделирование процессов резистивного переключения в оксидных наноразмерных структурах титана**

А.С. Ванькаев<sup>1,2,\*</sup>, Е.В. Ключкина<sup>1,3</sup>, С.В. Ковешников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов  
Российской академии наук, Россия

<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Россия

<sup>3</sup>Первый Московский государственный медицинский университет  
имени И.М. Сеченова, Россия

\*s.vankaev14@gmail.com

Одним из наиболее перспективных вариантов компонентой базы для аналоговых нейроморфных систем является резистивная память, которая будет выполнять роль искусственных синапсов. Для использования в качестве биологических синапсов элементы резистивной памяти должны обладать многими промежуточными резистивными состояниями и воспроизводимыми характеристиками [1]. Для достижения многоуровневого переключения важную роль играет процесс переключения структуры в высокоомное состояние (Reset), в ходе которого проводимость контролируется величиной максимального приложенного напряжения (Рисунок 1). На основании анализа литературных данных и полученных нами экспериментальных результатов можно сделать вывод, что изменение проводимости в структуре достигается двумя механизмами: резким переключением (sharp Reset) и плавным переключением (gradual Reset). Для достижения многоуровневости плавный характер переключения является ключевым фактором [2]. Выяснение физического механизма плавного изменения проводимости структуры является важной научной задачей, решение которой позволит создавать мемристорные структуры с заданными физическими свойствами. В ходе проведенных нами исследований элементов памяти на основе оксида титана, который характеризуется филаментарным переключением, нами были получены данные, свидетельствующие о наличии нескольких устойчивых промежуточных состояний. Для объяснения результатов нами была разработана гипотеза о коллективном влиянии нескольких параллельно включенных проводящих филаментов разной длины на изменение проводимости в режиме Reset. Экспериментальная и теоретическая вольт-амперные характеристики (ВАХ) имеют хорошее соответствие. Результаты проведенных экспериментов подтвердили правильность разработанной гипотезы и проведенных расчетов.

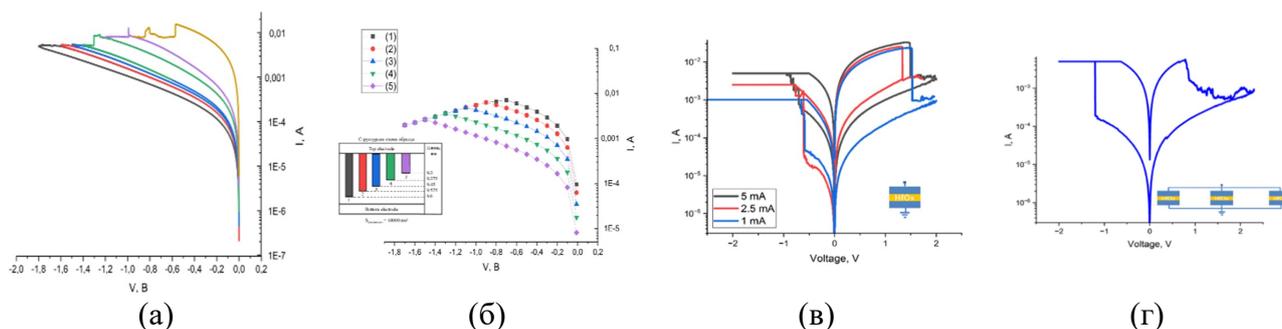


Рисунок 1. (а) Экспериментальная и (б) теоретическая ВАХ ячейки RRAM  $TiO_x$ . (в) ВАХ трех однофиламентных элементов резистивной памяти при различных максимальных токах, (г) ВАХ тех же ячеек, соединенных параллельно

[1] W. Wang et al. *Faraday Discuss.* (2019) **213**, 453-469

[2] P.A. Chen et al. *Proc. IEEE 14<sup>th</sup> NMDC* (2019) 1-5

**Пленки стабилизированного диоксида циркония со встроенными наночастицами, сформированными в процессе облучения ионами золота**

М.А. Жбанов\*, А.В. Круглов, А.Н. Антонов, Ю.А. Дудин, Р.Н. Крюков  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия  
\*maksimjbanov8@mail.ru

В своё время транзисторы помогли достичь большого прорыва в микроэлектронике, обеспечив нас дешевыми и быстрыми методами обработки данных. В настоящее время возникают трудности, связанные с ограничениями современных транзисторов по размерам и их требованием к большим затратам энергии для поддержания текущего состояния памяти. Решением упомянутых проблем может служить разработка мемристоров. Мемристор – резистор с памятью, представляющий собой структуру металл-диэлектрик-металл. При пропускании тока через такой резистор значение сопротивления изменяется и «запоминается» после исчезновения тока. В этом заключается основное преимущество мемристора – он является энергонезависимым элементом. В основе работы мемристора лежит эффект резистивного переключения. Данный эффект можно интерпретировать как образование проводящего канала (филамента) внутри слоя диэлектрика. Обычно считается, что в роли филаментов выступают кислородные вакансии [1, 2].

Несмотря на преимущества такого элемента, у него также имеются и недостатки, к которым можно отнести случайность процесса резистивного переключения и деградацию структуры в процессе эксплуатации [1]. При формировании пленки диэлектрика в структуре могут присутствовать примеси и субоксиды основного материала. Наличие в системе таких элементов или химических соединений могут как улучшить, так и ухудшить проводимость в пленке диэлектрика. По этой причине важно контролировать физико-химические свойства материалов, используемых для создания мемристоров.

В качестве исследуемых структур использовались образцы диоксида циркония, стабилизированные иттрием, ( $ZrO_2(Y)$ ). Толщина пленок составляла 42 нм. Формирование исследуемых структур происходило методом ВЧ-магнетронного распыления на кремниевой подложке. Также присутствовала постростовая обработка образцов, заключающаяся в термическом отжиге при температуре 450 °С и облучении ионами золота со следующими дозами  $0,5 \cdot 10^{16}$ ,  $2,0 \cdot 10^{16}$  и  $4,0 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> в установке «Радуга-3М». Золото выступало в качестве концентраторов дополнительного электрического поля, влияющее на формирование филаментов в диэлектрике. Отжиг происходил в атмосфере аргона. Исследования проводились на сверхвысоковакуумном (СВВ) комплексе Omicron Multiprobe RMTM.

При проведении работы было установлено, что в ходе магнетронного напыления пленок  $ZrO_2(Y)$  образуется сложная система, включающая в себя кислородосодержащие соединения Zr ( $ZrO_2$ , ZrO и  $Zr_2O$ ), профили распределения которых чувствительны к условиям постростовой обработки. Проведение имплантации ионов Au в пленки  $ZrO_2(Y)$  с последующим постимплантационным отжигом приводит к формированию кластеров, средний диаметр которых имеет максимальное значение в приповерхностных слоях. Отсутствие в ускорителе ионов «Радуга-3М» приставки для проведения масс-сепарации не приводит к формированию многомодового распределения ионов Au при ускоряющем напряжении менее 30 кВ.

[1] Д.О. Филатов и др. *Физика твердого тела* (2020) **62**, 556-561

[2] О.О. Пермякова и др. *Микроэлектроника* (2020) **49**, 323

**Исследования электрофизических свойств крови  
для разработки методов диагностики заболеваний**  
Е.В. Ключкина<sup>1,3,\*</sup>, А.С. Ванькаев<sup>2,3</sup>, С.В. Ковешников<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Первый Московский государственный медицинский университет  
имени И.М. Сеченова, Россия*

<sup>2</sup>*МИРЭА – Российский технологический университет, Россия*

<sup>3</sup>*Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов  
Российской академии наук, Россия*

\*katerina-klyukina@mail.ru

В настоящее время ведется активный поиск новых методов диагностики заболеваний, в особенности основанных на новых физических принципах. Один из возможных методов диагностики может быть основан на эффекте резистивного переключения, наблюдаемого в различных биологических материалах [1], в частности – в белках, ферментах, полисахаридах [2]. В данной работе мы демонстрируем наличие эффекта резистивного переключения в образцах человеческой крови. Целью работы является проведение исследования электрофизических свойств крови для разработки методов диагностики заболеваний, не выявляемых традиционными методами. В рамках работы было подготовлено 3 вида образцов: плазма крови, форменные элементы крови и неразделенная кровь. Электрические характеристики каждого из образцов измерялись с помощью вольт-амперного и вольт-фарадного методов, а также изучалось влияние УФ-излучения с длиной волны 253 нм. Результаты показывают, что образцы крови демонстрируют классическое биполярное резистивное переключение [3] с изменением сопротивления на 7 порядков, что указывает на их потенциальное использование в качестве элементов энергонезависимой резистивной памяти. Кроме того, образцы продемонстрировали плавное переключение в режиме Reset с 5 промежуточными состояниями, что указывает на их потенциальное использование в качестве искусственных синапсов в нейроморфных системах. Важно отметить, что физический механизм резистивного переключения в образцах крови остается невыясненным. В ходе исследования также обнаружен эффект увеличения проводимости цельной крови при ее облучении ультрафиолетом с длиной волны 253 нм, что говорит о возможности использования элементов памяти на основе человеческой крови в качестве слепых детекторов из-за реакции на коротковолновый ультрафиолет. Актуальной задачей для будущих исследований является экспериментальное изучение зависимости электрофизических характеристик крови при различных ее патологиях. Так, для сравнительной характеристики были проведены исследования вольт-амперных характеристик образцов крови 3-х участников проекта. Результаты показывают, что кровь разных людей, отличающихся как минимум по возрастной категории и по полу, обладает разными электрофизическими свойствами. В дальнейшем планируется проведение исследований на образцах крови добровольных доноров разных возрастных категорий, мужчин и женщин, с разной группой крови, с известными заболеваниями и с разными психоэмоциональными состояниями.

[1] N. Raeis-Hosseini et al. *J. Electroceramics* (2017) **39**, 223-238

[2] H. Wang et al. *Adv. Mater.* (2015) **27**, 7670-7676

[3] A. Sawa *Mater. Today* (2008) **11**, 28-36

**Определение динамики переходных процессов резистивного переключения  
в мемристивных структурах на основе оксидов металлов**

Д.С. Мазинг\*, Е.А. Рындин

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Россия

\*dmazing@yandex.ru

Мемристивные тонкопленочные структуры, в частности, функционирующие на основе окислительно-восстановительного механизма резистивного переключения, рассматриваются в качестве перспективного элемента энергонезависимой памяти, памяти со встроенной логикой, систем нейроморфных вычислений, сверхвысокочастотных ключей. В этой связи важным вопросом является определение динамики резистивного переключения мемристивных устройств в зависимости от установившегося резистивного состояния и параметров переключающего воздействия. Ранее проведенные исследования кинетики переключения на примере Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> [1] показали, что предел скорости переключения для подобных устройств может лежать в пределах десятков пикосекунд и на практике ограничивается в зависимости от размера структуры скоростью перезарядки емкости, а на фундаментальном уровне, в приближении высокого управляющего напряжения, частотами фононных мод, отвечающих за деформации связей аморфного материала.

Данная работа посвящена разработке методики и схемы измерений динамики переключения мемристивных тонкопленочных структур на основе диоксида титана и оксида алюминия. Для максимально эффективной передачи энергии коротких управляющих импульсов тестовые структуры были изготовлены с помощью обратной фотолитографии в виде копланарных линий, в центре которых на пересечении сигнальных нижнего и верхнего проводников были сформированы мемристивные устройства различной площади от 5 × 5 до 30 × 30 мкм. Размеры копланарных линий были адаптированы для проведения измерений при помощи СВЧ зондов конфигурации GSG с шагом контактов 150 мкм.

Предлагаемая схема измерений позволяет подавать на тестовые структуры управляющие прямоугольные импульсы переменной амплитуды и длительности, в том числе сверхкороткие импульсы с полушириной < 1 нс и фронтом < 500 пс. Прошедший сигнал, включающий переходные процессы, связанные с перезарядкой емкости и резистивного переключения, регистрируется при помощи осциллографа, последовательно включенного в цепь измерений. Сопротивление структур в процессе динамических измерений контролируется при помощи включенного параллельно генератору импульсов источника-измерителя. Дополнительно для изготовленных мемристивных структур были проведены исследования частотных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант FSEE-2020-0013.

[1] U. Böttger et al. *Sci. Rep.* (2020) **10**, 1-9

**Нейроморфные свойства мемристорных структур на основе  $\text{HfO}_2/\text{HfO}_x\text{N}_y$ , сформированных с помощью плазменной иммерсионной ионной имплантации аргона**

О.О. Пермякова\*, А.Е. Рогожин

*Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН, Россия*

\*o.permyakova@physteh.edu

Одним из электронных компонентов, подходящих для аппаратной реализации искусственного интеллекта, является мемристор [1]. С помощью мемристора можно реализовать функции синапса благодаря тому, что его значение сопротивления можно изменять непрерывно между двумя значениями сопротивления: низкоомным и высокоомным состоянием. Изменение сопротивления устройства под действием электрического поля называют резистивным переключением (РП). В качестве одного из основных преимуществ мемристора выделяют низкое потребление энергии устройством при его работе (пикоджоуль на операцию), сравнимое с биологическим синапсом [2]. Мемристоры на основе  $\text{HfO}_2$  могут быть интегрированы в процессы КМОП, а также демонстрируют хорошие результаты при испытаниях надёжности. Но такие мемристоры обладают филаментарным типом переключения и для их полного формирования обычно необходим процесс электроформовки, который значительно затрудняет формирование массивов мемристоров. В этой работе рассматривается влияние на нейроморфные свойства мемристорных структур плазменной иммерсионной имплантации ионов (ПИИИ)  $\text{Ar}^+$ , с помощью которой они были сформированы [3].

Для формирования структур  $\text{Pt}/\text{HfO}_2/\text{HfO}_x\text{N}_y/\text{Ta}/\text{Ti}/\text{N}/\text{Si}$  были использованы процессы атомно-слоевого осаждения и магнетронного распыления, которые подробно описаны в работе [4]. Исследование вольтамперных характеристик (ВАХ) отдельных мемристорных структур проводилось с помощью параметрического анализатора Kethly-4200SCS. Для импульсных измерений были использованы встроенные в параметрический анализатор генератор импульсов 4205-PG2 и осциллограф 4200-SCP2HR.

До имплантации требовалась электроформовка структур при среднем напряжении 7,1 В. После имплантации с энергией 2 кэВ и дозой ионов  $7,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  напряжение электроформовки было снижено до 2,4 В. Для РП структур после имплантации в диапазоне напряжений от -2 В до 2 В не требовалось внешнее ограничение тока, а также ВАХ в низкоомном состоянии были нелинейными [3]. Максимальное значение тока в таких структурах было порядка 0,4 мА, а для структур без имплантации воспроизводимое РП наблюдалось при внешнем ограничении тока 1 мА. Таким образом, формирование исследуемой структуры с помощью имплантации позволяло снизить мощность, необходимую для переключения состояния.

В то же время нелинейные ВАХ в низкоомном состоянии оказывают значительное влияние на форму STDP (Spike-timing-dependent plasticity). В частности, при увеличении амплитуды встречных импульсов значение обновления веса уменьшается для малых временных интервалах между встречными импульсами [5]. Поэтому необходимо исследование нейроморфных свойств мемристорных структур, сформированных с помощью ионной имплантации.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме №FFNN-2022-0021.

[1] S. H. Jo et al. *Nano Lett.* (2010) **10**, 1297

[2] D. Liu et al. *Adv. Intell. Syst.* (2021) **3**, 2000150

[3] O. Permyakova et al. *Nanomat.* (2024) **14**, 831

[4] O. Permyakova et al. *Microel. Eng.* (2023) **275**, 111983

[5] O. Permyakova et al. *Book of Abstract SpbOPEN 2022* (2022)

**КМОП-совместимые мемристорные структуры**

**для нейроморфных вычислений и резистивной памяти**

Д.А. Серов\*, А.В. Круглов, М.Н. Коряжкина, М.Е. Шенина,

И.Н. Антонов, А.Н. Михайлов, О.Н. Горшков

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия*

\*serow.dim2015@yandex.ru

В настоящее время ведутся активные исследования в области мемристорной электроники для создания на ее основе нового типа резистивной памяти и нейроморфных вычислительных систем [1]. Принцип работы мемристора основан на эффекте резистивного переключения (РП) – возобновляемом изменении сопротивления структуры под действием внешнего электрического поля, в процессе которого реализуются как минимум два состояния проводимости: высокоомное и низкоомное. Наиболее распространенным механизмом РП является образование и разрушение тонких проводящих каналов – филаментов [2]. Данный механизм характерен для мемристоров на основе оксидов переходных металлов, например  $ZrO_2(Y)$ . Для успешной интеграции мемристивных устройств в технологический процесс комплементарный «металл-оксид-полупроводник» (КМОП) рабочие напряжения и максимальные токи мемристоров не должны превышать соответствующих параметров управляющих элементов в КМОП-схемах (5 В и 10 мА), а параметры РП иметь малый разброс. Одними из способов удовлетворить данные требования являются подбор оптимального значения тока ограничения ( $I_{CC}$ ) [3] и использование дополнительного слоя  $Al_2O_3$  [4].

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование влияния токов ограничения на параметры РП мемристивных структур на основе стеков  $Ta/Al_2O_3/ZrO_2(Y)/Pt$  с разными толщинами (0, 3, 6 и 9 нм) слоя  $Al_2O_3$ . Проведено измерение вольтамперных характеристик (ВАХ) с их последующей статистической обработкой. В процессе записи ВАХ выполнялось ограничение тока при 50, 100, 200, 300, 500 и 1000 мкА, чтобы не допустить необратимого пробоя мемристоров. Проведены тесты удержания резистивных состояний мемристивных структур.

Результаты исследования свидетельствуют о наличии граничного значения тока ограничения, при котором резистивные состояния становятся устойчивыми и сохраняются со временем. Оптимальные значения параметров РП достигаются при величине тока ограничения  $I_{CC} = 300 - 500$  мкА. Использование дополнительного слоя  $Al_2O_3$  улучшает стабильность токовых состояний, что наиболее выражено при толщине  $Al_2O_3$ , равной 6 нм. Максимальные токи, протекающие через мемристор, и рабочие напряжения не превышают 2 мА и  $\pm 1,5$  В, что соответствует требованиям к КМОП-интеграции мемристивных устройств.

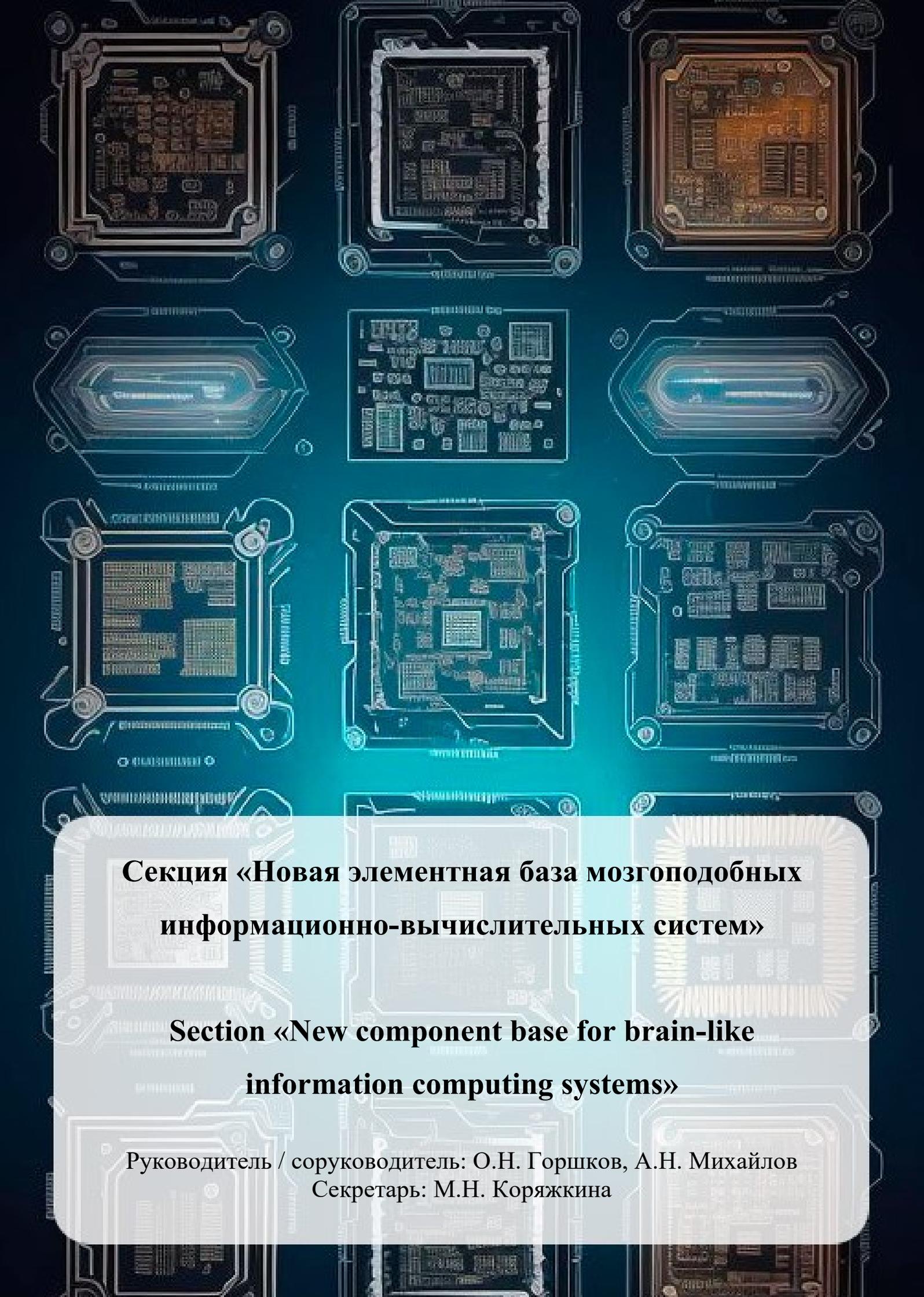
Работа выполнена в рамках гос. задания № FSWR-2022-0009. Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования – Научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

[1] Y. Huang et al. *Nat. Rev. Electr. Eng.* (2024) **1**, 286-299

[2] X.A. Tran et al. *IEEE Electron Device Lett.* (2011) **32**, 1290-1292

[3] K. Humood et al. *J. Electron. Mater.* (2021) **50**, 4397-4406

[4] R. Han et al. *Nanoscale Res. Lett.* (2017) **12**, 37



**Секция «Новая элементная база мозгоподобных  
информационно-вычислительных систем»**

**Section «New component base for brain-like  
information computing systems»**

Руководитель / соруководитель: О.Н. Горшков, А.Н. Михайлов  
Секретарь: М.Н. Коряжкина

## Inorganic memristive devices-based synaptic mechanisms

I.M. Kipelkin\*, S.A. Gerasimova, A.N. Mikhaylov, V.B. Kazantsev

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia

\*Ivan.kipelkin@yandex.ru

Novel technologies inspired by brain functionality, aimed at improving information and computational systems, have accelerated the transition towards the use of inorganic materials with the resistive switching effect. This effect is especially prominent in «metal-oxide-metal» architectures, commonly known as memristors. A distinctive feature of the memristor is its ability to continuously adjust resistance based on the amount of charge passing through it, similar to the synaptic plasticity mechanisms seen in biological neurons [1]. However, the inherent stochastic behavior of memristors makes it difficult to thoroughly investigate this mechanism and limits its potential for future hardware applications.

In this work we simulate the mechanism of synaptic plasticity focusing on linear potentiation in inorganic memristive devices.

The simulation was conducted as follows. Using a mathematical model [2] we created a neuron system with a segment of counter-parallel memristive nonlinearity. We then applied an external unipolar pulse to this segment (point 1 in Figure 1A and B) and measured the exit current response from the memristive devices (points 2 and 3 in Figure 1A). The models for inorganic memristive devices were developed based on its dynamics taking into account oxidation and reduction processes as well as the internal parameter of the device's state (Figure 1C, D, and E).

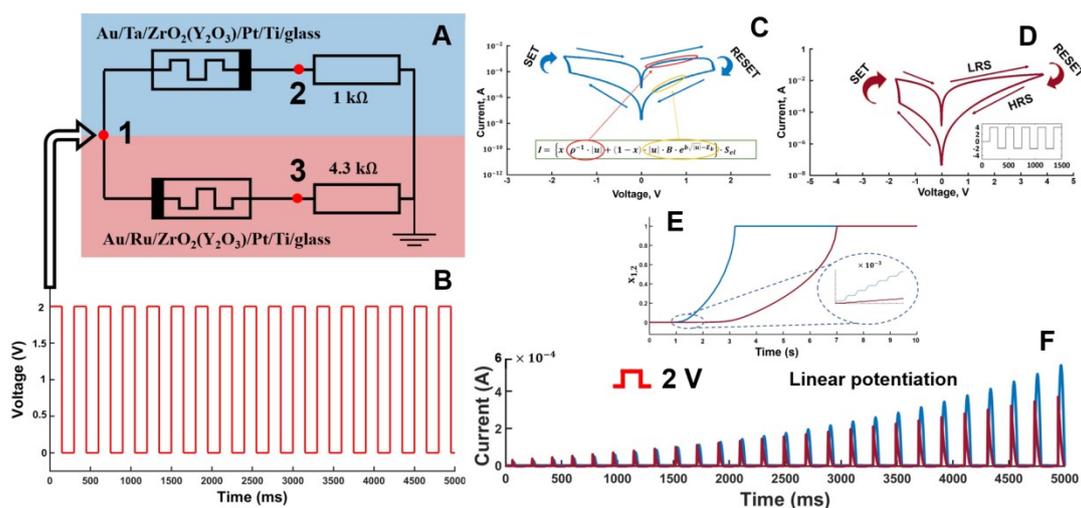


Figure 1. The simulating effect of synaptic potentiation in inorganic memristive devices. (A) The segment of counter-parallel memristive nonlinearity [2]. (B) Stimulation signal.

The profile of the voltage-current characteristics used in the simulation for (C)

Au-Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass and (D) Au/Ru/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass. (E) The parameter of the internal state of the devices. (F) An example of a prominent form of linear potentiation of the system. The blue color corresponds to the device Au-Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass, the red color corresponds to Au/Ru/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass

As a result of the simulation, we observed a correlation between the increase in the external pulse signal and the synaptic potentiation mechanism, e.g. the increase of the response pulse amplitudes similarly to biological synapses (Figure 1F). This result is particularly significant for understanding the processes of learning and memory in biological neural systems. This area has the potential to contribute to the development of advanced and intellectual neuromorphic systems.

[1] F. Luo et al. *Nano Mater. Sci.* (2024) **6**, 68-76

[2] I.M. Kipelkin et al. *Mathematics* (2023) **11**, 1268

**Исследование основных параметров мемристорных кроссбаров  
на основе диоксида циркония, стабилизированного иттрием**

Г.Д. Жарков\*, А.И. Белов, Ю.Г. Слияков, В.И. Лукоянов,  
Е.Г. Грязнов, В.В. Карзанов, А.Н. Михайлов

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия*

\*grigoriyzharkov@gmail.com

Важнейшими задачами современной вычислительной машины является хранение информации и её обработка. Одним из наиболее перспективных типов энергонезависимой памяти является память, основанная на эффекте резистивного переключения (РП). Этот эффект реализуется в структурах «металл-оксид-металл», также называемых мемристорами [1]. К важнейшим преимуществам мемристивных элементов памяти относят высокую скорость записи информации, низкое энергопотребление, а также способность выдерживать большое количество циклов перезаписи. Объединение мемристоров в матрицу кроссбар позволяет достичь высокой плотности хранения информации. Более того, с помощью мемристоров можно производить вычисления в памяти, что предоставляет альтернативу архитектуре фон Неймана, на которой основана работа современных компьютеров [2]. Для обучения современных нейронных сетей необходимо проводить большое количество операций векторно-матричного умножения. Кроссбар-матрицы на основе мемристоров могут служить аппаратным обеспечением для проведения таких операций, а также для создания нейроморфных интерфейсов.

Недостатком кроссбар-матриц является появление токов утечки: при работе с выбранной ячейкой памяти возможно протекание тока через соседние ячейки [3]. Для борьбы с утечками внутри ячеек памяти устанавливаются элементы, контролирующие ток через мемристор. Один из наиболее перспективных типов таких ячеек – 1Т1М (или 1Т1R), где в качестве управляющего элемента используется полевой транзистор.

В настоящей работе проведено исследование ячеек памяти конструкции 1Т1М в кроссбаре  $32 \times 8$ , где управляющим устройством является полевой транзистор с индуцированным каналом *n*-типа, запоминающим – мемристор на основе структуры Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y)/Pt. Измерены вольтамперные характеристики ячеек и проведена их статистическая обработка. Проведён тест на выносливость ячеек при переключении импульсами длительностью 12 мкс. Также были исследованы ячейки конструкции 5Т1М в кроссбаре  $64 \times 64$ .

В результате эксперимента установлено, что для исследованных структур 1Т1М отношение токов в состояниях с низким и высоким сопротивлением составляет около 8, для 5Т1М – 6, что достаточно для определения состояния ячейки при чтении. Показано, что структуры 1Т1М способны выдержать более  $6 \cdot 10^7$  переключений. Получено, что энергия, необходимая для переключения ячейки 1Т1М, составляет около 25 пДж при времени переключения 10 мкс, что демонстрирует возможность использования мемристивных структур в качестве быстрых и энергоэффективных элементов памяти.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах». Мемристивные структуры изготовлены в лаборатории мемристорной наноэлектроники ННГУ с использованием инфраструктуры Учебного дизайн-центра электроники ННГУ, созданного в рамках реализации федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности».

[1] А.Н. Михайлов и др. *Нейротехнологии и Нейроэлектроника* (2024) **1**, 44-109

[2] Q. Xia et al. *Nat. Mater.* (2019) **18**, 309-323

[3] H. Li et al. *Adv. Intell. Syst.* (2021) **3**, 2100017

**Разработка и исследование прототипа-демонстратора работы нейронных сетей на базе мемристивных устройств**

Л.Я. Королев\*, С.А. Щаников

*Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Россия*  
\*madimtor@ya.ru

В настоящее время основной аппаратной платформой для запуска моделей искусственных нейронных сетей являются графические процессоры GPU и нейропроцессорные ядра NPU. Они имеют большое энергопотребление (десятки и сотни ватт) и работают на высоких частотах (гигагерцы), потому что построены по архитектуре Джона фон Неймана с разделенной памятью и вычислителем. Как показывают результаты современных исследований, наиболее биоподобными принципами искусственной реализации нейронных сетей обладают системы на базе вычислений в памяти и мемристорах. Мемристор – это электронный компонент, который может менять свое сопротивление при воздействии электрического тока и сохранять это записанное значение длительное время.

Массив мемристоров одновременно хранит веса нейросети и выполняет ее работу подобно тому, как это происходит в живых нейросетях. Потенциальные преимущества мемристоров [1] вызывают интерес к работе и экспериментам с ними не только у больших лабораторий, имеющих в своем распоряжении профессиональное оборудование, позволяющее проводить различные опыты, но и у малых групп исследователей, не располагающих подобными дорогостоящими инструментами. Поэтому для получения возможности работы с мемристорами необходимо разработать компактный аппаратно-программный комплекс (АПК), позволяющий посылать различные сигналы на мемристоры и считывать их состояние. Для разработки такого АПК [2] были изучены технические характеристики мемристоров, а именно необходимые уровни сигналов и их длительность, диапазоны токов, были подобраны соответствующие задаче комплекующие, разработаны принципиальные схемы, проведена разводка печатной платы и её изготовление.

Характеристики АПК: амплитуда импульса записи  $\pm 2,5$  В, токи до 25 мА, амплитуда инференса  $\pm 0,5$  В, минимальная длительность импульса – 15 мкс, разрядность ЦАП – 12 бит, разрядность АЦП – 12 бит.

Разработанный АПК позволяет:

- 1) снимать вольтамперные характеристики мемристора;
- 2) программировать определенный уровень сопротивления мемристора;
- 3) проводить оценку устойчивости заданных резистивных состояний в зависимости от времени считывания (retention);
- 4) проводить оценку устойчивости заданных резистивных состояний в зависимости от числа циклов резистивного переключения (endurance);
- 5) снимать характеристики синаптической пластичности мемристора;
- 6) переводить мемристоры в состояние с высоким или низким сопротивлением одним импульсом.

В докладе рассмотрены: программный интерфейс АПК, принцип его работы и результаты применения АПК на мемристорах.

[1] Amirsoleimani A. et al. *Adv. Intell. Syst.* (2020) 2, 2000115

[2] Shchanikov S. et al. *Proc. 7<sup>th</sup> Scientific School DCNA* (2023) 249-251

**Влияние частоты следования обучающих импульсов  
на синаптическую пластичность мемристивного устройства на основе  $ZrO_2$**

М.Н. Коряжкина\*, А.И. Белов, И.Н. Антонов, А.Н. Михайлов

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия*

\*mahavenok@mail.ru

Прототипы вычислительных систем, построенных на базе мемристоров, значительно превосходят нейроморфные процессоры и графические процессоры, изготовленные на основе традиционной электронной компонентной базы, по плотности, производительности и энергоэффективности [1]. Однако исследователи и разработчики нейроморфных систем на основе мемристоров сталкиваются с рядом проблем, связанных с ухудшением эффективности вычислений в памяти. Это связано с наличием флуктуаций проводимости мемристоров, фундаментальной причиной которых является стохастическая природа резистивного переключения. Развиваемые в настоящее время подходы к решению выявленных проблем в основном заключаются в “правильном” выборе комбинаций электродов и диэлектрика или оптимизации управляющих протоколов.

В данной работе рассмотрено влияние величины частоты следования обучающих импульсов на синаптическую пластичность мемристивного устройства на основе стека  $Ta/ZrO_2(Y)/Pt$ . Детальную информацию о технологии изготовления мемристивного устройства и схематическое изображение экспериментальной установки можно найти в [2]. Исследования были реализованы при помощи зондовой станции Everbeing EB-6 и многофункционального устройства ввода-вывода National Instruments USB-6361. Выбор объекта исследования обоснован значительной выносливостью к многократному резистивному переключению и высокой стабильностью параметров резистивного переключения как от цикла к циклу, так и от устройства к устройству [2]. С целью выполнения вышеуказанного исследования на мемристивное устройство подавался сигнал, состоящий из одного переключающего в состоянии с высоким (низким) сопротивлением импульса положительной (отрицательной) полярности и серии из 100 обучающих импульсов отрицательной (положительной) полярности. Чтение резистивного состояния осуществлялось после каждого импульса. Выбор параметров обучающих импульсов основывался на результатах, полученных ранее [3-5]. Изменение величины частоты следования обучающих импульсов достигалось путём изменения интервала между обучающими импульсами в серии.

Мемристивное устройство демонстрировало поведение, соответствующее такой важной функции биологического синапса как парно-импульсная фасилитация (депрессия). Это явление имеет большое значение при обработке информации и обучении и заключается в том, что отклик клетки на второй импульс сильнее (слабее), чем на первый [6]. В данной работе также приводится анализ влияния от частоты следования обучающих импульсов на характеристики долговременной потенциации (депрессии).

Коряжкина М.Н. выражает признательность за поддержку программой стипендий при Президенте Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики. Мемристивные устройства были изготовлены с использованием оборудования и средств Лаборатории мемристорной наноэлектроники (государственное задание № FSWR-2022-0009) и Учебного дизайн-центра электроники ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования – Научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

[1] A.N. Mikhaylov et al. *Supercomput. Front. Innov.* (2023) **10**, 77-103

[2] M.N. Koryazhkina et al. *Chaos Solit. Fractals* (2022) **162**, 112459

[3] M. Koryazhkina et al. *Proc. 6<sup>th</sup> Scientific School DCNA* (2022) 147-150

[4] M. Koryazhkina et al. *Proc. 7<sup>th</sup> Scientific School DCNA* (2023) 148-150

[5] M.N. Koryazhkina et al. *Phys. Status Solidi A* (2023) **220**, 2200742

[6] T.W. Rosahl et al. *Cell* (1993) **75**, 661-670

**Широтно-импульсное управление для воспроизведения STDP  
в мемристивных устройствах**

М.А. Мищенко\*, Н.С. Ковалева, А.Н. Михайлов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия

\*mischenko@neuro.nnov.ru

Кодирование и хранение информации в нейронных сетях непосредственно связано с формированием пространственно-временных паттернов и сетевых структур [1, 2]. Для отражения процесса самоорганизации связей в процессе обучения Хэбб постулировал правило, согласно которому при многократном повторении возникновения импульсов на двух нейронах с сохранением причинно-следственного соответствия между ними происходит усиление связи или ослабление в противном случае [3]. Модель пластичности, отражающая правило Хэбба, получила название пластичности, зависящей от времен импульсов (STDP) [4-6].

Мемристивное устройство считается идеальным кандидатом на роль синаптической связи в электронных нейроморфных устройствах благодаря своей способности изменять состояние за счет внешнего воздействия и сохранять его длительное время. Для мемристивных устройств существуют реализации модели STDP, но большая часть из них основаны на упрощенном алгоритме, заключающемся в формировании управляющего сигнала за счет перекрытия профилей пре- и постсинаптического импульсов [7-9]. Этот подход требует значительного уровня амплитуд сигналов нейронов. В то же время в биологических нейронных сетях нейронные импульсы выступают скорее как информационные сигналы, которые запускают каскад реакций, приводящий к синаптической пластичности.

Предложен подход к управлению состоянием мемристивного устройства, в котором импульсы пре- и постсинаптического нейронов не изменяют состояния мемристора по причине их малой амплитуды, но запускают дополнительный блок. Этот блок действует на мемристор одиночным импульсом, полярность и ширина которого определяются порядком и временным интервалом между импульсами пре- и постсинаптического нейронов.

Классическое правило STDP изменяет вес связи на величину, убывающую при увеличении времени между импульсами нейронов. Изменение состояния мемристора на определенную величину может быть достигнуто изменением амплитуды воздействия или его длительности. В предлагаемом подходе на мемристор воздействуют импульсом постоянной амплитуды, но переменной длительности. Чем больше длительность, тем сильнее изменяется состояние мемристора. По аналогии с правилом STDP, в котором каждый импульс на пре- и постсинаптическом нейроне оставляет спадающий за ограниченное время «след», определяющий величину изменения веса связи, предложено чтобы «след» определял ширину импульса, воздействующего на мемристор, что более важно для экспериментальных исследований.

Предложенный подход исследован численно с помощью модели [10], которая стимулировалась внешними импульсами различной ширины. Полученные величины изменения состояния мемристора показали зависимость, качественно похожую на классическое STDP.

Работа выполнена при поддержке научной программы Национального физико-математического центра, секция № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах».

[1] O. Jensen et al. *Trends Neurosci.* (2005) **28**, 67-72

[2] H. Haken "Principles of Brain Functioning" *Springer* (Berlin, 2013, 350 p.)

[3] D.O. Hebb "The Organization of Behavior" *John Wiley & Sons* (New York, 1949, 335 p.)

[4] G. Bi and M. Poo *J. Neurosci.* (1998) **18**, 10464-10472

[5] G. Bi and M. Poo *Annu. Rev. Neurosci.* (2001) **24**, 139-166

[6] P. J. Sjöström et al. *Physiol. Rev.* (2008) **88**, 769-840

[7] C. Zamarreno-Ramos et al. *Front. Neurosci.* (2011) **5**, 00026

[8] A.V. Emelyanov et al. *Microelectron. Eng.* (2019) **215**, 110988

[9] S. Gerasimova et al. *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. CNN* (2021) 19-22

[10] M.A. Mishchenko et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.* (2022) **55**, 394002

**Проектирование нейронов с управляемой возбудимостью  
для механизмов внимания спайковых нейронных сетей**

В.Ю. Островский\*, Т.И. Каримов, В.Г. Рыбин, Д.Н. Бутусов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия*

\*vyostrovskii@etu.ru

Селективное внимание является одним из ключевых когнитивных механизмов мозга, обеспечивающих изменения в коррелированной активности нейронов для улучшения обработки важной сенсорной информации и подавления фонового шума. На уровне одиночных нейронов визуальной системы внимание к стимулу в рецептивном поле связывают с увеличением частоты генерации спайков. Оптимизация спайковой активности с помощью механизма внимания на уровне сети может позволить одновременно повысить производительность и энергоэффективность за счет адаптивного подавления реакции на шум [1]. Для развития архитектуры и технологии производства энергоэффективных нейроморфных вычислителей важное значение имеет проектирование искусственных нейронов на основе перспективной элементной базы с учетом внедрения механизмов внимания. В работе представлено два подхода к моделированию спайковых нейронов с внешней модуляцией активности по принципам КМОП-совместимой и сверхпроводниковой электроники.

Первый из предложенных подходов заключается в комбинировании селекторов с пороговым переключением и туннельных диодов. Выполнена идентификация моделей основных нелинейных элементов и анализ динамического поведения предлагаемой цепи нейрона. Рассматриваемая нейронная цепь состоит всего из пяти элементов, образующих три параллельные ветви: волатильный мемристор с настраиваемым источником постоянного напряжения, туннельный диод с модулирующим источником постоянного напряжения и конденсатор. Двухнаправленное пороговое переключающее селекторное устройство AND-TS [2] служит примером волатильного мемристора. В идентифицированной эмпирической компактной модели выбранные параметры позволяют воспроизводить основные кинетические и динамические характеристики, демонстрируемые устройством AND-TS. Также идентифицированы модели четырех германиевых обращенных туннельных диодов (ГИ401А, ГИ403А, BD4 и BD5), что позволило точно представить характеристики отрицательного дифференциального сопротивления. В работе изучено динамическое поведение предлагаемого нейрона с использованием двухпараметрических диаграмм высокого разрешения [3], дающих представление о реакции нейрона на различные входные стимулы. Подтверждено изменение класса возбудимости нейрона по Ходжкину в зависимости от модулирующего источника постоянного напряжения. Выполнена оценка энергетических характеристик предлагаемой цепи нейрона.

Второй подход оперирует новой моделью цепи сенсорного нейрона [4], в основе которого лежит схема СКВИД на постоянном токе. Исследована зависимость динамики разработанной модели от внешнего магнитного потока. Приводятся эквивалентная электрическая цепь и вывод соответствующих дифференциальных уравнений, описывающих динамику нейрона. Результаты численного моделирования подтверждают применимость и хорошую производительность предлагаемой цепи нейрона, чувствительного к магнитному потоку: рассматриваемое устройство может кодировать магнитный поток в форме спайковой нейронной динамики с линейным участком. Кроме того, обнаружено комплексное поведение исследуемой модели, а именно прерывистые хаотические всплески и потенциалы плато. Предложенная нейронная цепь может эффективно применяться для разработки интерфейсов между нейронами сенсорного и глубоких слоев с применением механизмов внимания.

Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 23-79-10151.

[1] M. Yao et al. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* (2023) **45**, 9393-9410

[2] Q. Hua et al. *Adv. Sci.* (2019) **6**, 1900024

[3] V. Rybin et al. *Int. J. Bifurc. Chaos Appl. Sci. Eng.* (2024) **34**, 2450134

[4] T. Karimov et al. *Sensors* (2024) **24**, 2367

**Фотомемристорные сенсоры для широкополосного автономного нейроморфного зрения**

Г.Н. Панин\*

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Россия

\*panin@iptm.ru

Нейроморфные вычисления в сенсоре на основе фотомемристоров [1-6] позволяют создать компактную, автономную и энергоэффективную систему детектирования, запоминания и распознавания визуальной информации в реальном времени для использования в авиопилотируемом транспорте, персональной медицине и других приложениях [2, 4]. Появление новых двумерных материалов семейства графена открывает уникальные возможности быстрой обработки электрических [7, 8] и оптических [3-6] сигналов в широком спектральном диапазоне от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного (ИК) и терагерцового излучения. Энергонезависимые резистивные состояния в мемристорных структурах, изготовленных на основе двумерных кристаллов и квази нульмерных квантовых точек [9, 10], могут контролироваться светом и электрической поляризацией [1], фотоиндуцированными структурными переходами [3] или перестройкой атомов углерода в  $sp^2$ - $sp^3$  гибридизации в электрическом поле [7, 8, 11]. Такие устройства имеют высокую фоточувствительность [12] и демонстрируют динамическое поведение [5], необходимое для нейроморфных вычислений непосредственно в сенсоре, что позволяет уменьшить энергетические и временные затраты, связанные с переносом данных между сенсором, памятью и процессором в классической архитектуре фон Неймана. Это открывает возможность классификации и распознавания объектов в обучаемом сенсоре, подобно обработке оптических сигналов в сетчатке глаза [6].

В данной лекции рассмотрены фотомемристоры на основе низкоразмерных материалов, таких как графен, оксид графена, диамант, слоистые квантовые точки для создания систем нейроморфного зрения. Показано, что такие материалы можно использовать для интеллектуальной визуализации в широком УФ-ИК диапазоне с предобработкой информации в сенсоре. Интеллектуальные сенсоры со встроенными нейронными сетями могут быть изготовлены из биосовместимых гибких материалов и использоваться в самых разных приложениях, включая персональную медицину. Использование фотомемристивных материалов является перспективным подходом к созданию энергоэффективных автономных систем нейроморфного зрения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-49-00159).

- [1] W. Wang et al. *Sci. Rep.* (2016) **6**, 31224
- [2] G.N. Panin *Electronics* (2022) **11**, 619
- [3] X. Fu et al. *Small* (2019) **15**, 1903809
- [4] G.N. Panin et al. *Nanotechnol. Russia* (2021) **16**, 706-721
- [5] G.N. Panin *Chaos Solit. Fractals* (2021) **142**, 110523
- [6] X. Fu et al. *Light Sci. Appl.* (2023) **12**, 39
- [7] G.N. Panin et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* (2011) **50**, 070110
- [8] O.O. Kapitanova et al. *J. Mat. Sci. & Tech.* (2020) **38**, 237-243
- [9] X. Fu et al. *Nanoscale* (2017) **9**, 1820-1826
- [10] N.N. Kovaleva et al. *2D Materials* (2019) **6**, 045021
- [11] E.V. Emelin et al. *Nanomaterials* (2023) **13**, 2978
- [12] X. Fu et al. *Mater. Horiz.* (2022) **9**, 3095-3101

**Кроссбар матрица мемристоров на основе париллен- $\text{MoO}_x$  для гомогенной резервуарной вычислительной системы**

М.А. Рябова<sup>1,3,\*</sup>, А.Н. Мацукатова<sup>1,2</sup>, А.В. Емельянов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт, Россия

\*rmargo01@mail.ru

Резервуарные вычислительные системы (РВС) в последние годы привлекают внимание, поскольку они позволяют понижать размерность входных данных и уменьшать число параметров нейронной сети без значительного уменьшения точности классификации [1]. РВС состоит из двух частей: первая – динамический резервуар, который извлекает признаки из входных данных; вторая – считывающий слой, который классифицирует полученные признаки. Обычно для разных частей РВС используют разные мемристоров, поскольку для первой части необходимы волатильные мемристоров, а для второй – неволатильные. В данной работе представлена модель гомогенной РВС на основе мемристоров из нанокompозита париллен(ППК)- $\text{MoO}_x$ .

Предварительные характеристики мемристоров на основе ППК- $\text{MoO}_x$  и возможный механизм резистивного переключения (РП) были исследованы в [2]. В данной работе получены основные мемристивные характеристики устройств кроссбар-матрицы на основе нанокompозита ППК- $\text{MoO}_x$ : высокая воспроизводимость параметров РП от цикла к циклу и от устройства к устройству, достаточная выносливость к циклическим РП, хороший выход годных устройств. Продемонстрировано сосуществование волатильного и неволатильного режимов РП, задаваемых током ограничения: на низком токе ограничения мемристор находится в волатильном режиме, на высоком – в неволатильном (Рисунок 1).

Была создана модель гомогенной РВС, состоящая из мемристоров на основе ППК- $\text{MoO}_x$ , в которой был учтен отклик волатильного мемристора-резервуара на 3х битные образы (Рисунок 2, вставка слева) и сопротивления восьми резистивных состояний (Рисунок 2, вставка справа), полученных в неволатильном режиме мемристора, для сверточной нейронной сети в обучающем слое [3]. Модель гомогенной мемристивной РВС была применена для классификации датасета MNIST, точность классификации составила 92,5 % (Рисунок 2).

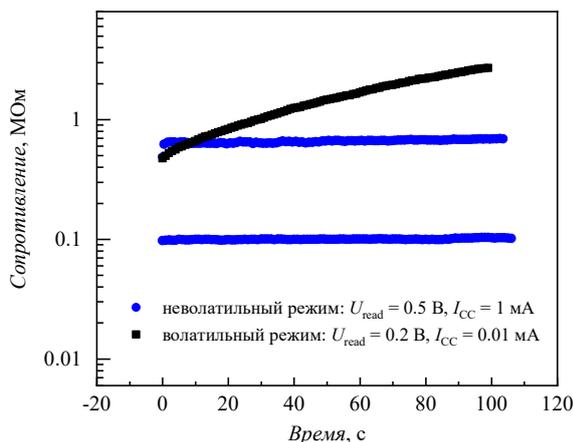


Рисунок 1. Сосуществование волатильного и неволатильного режима РП

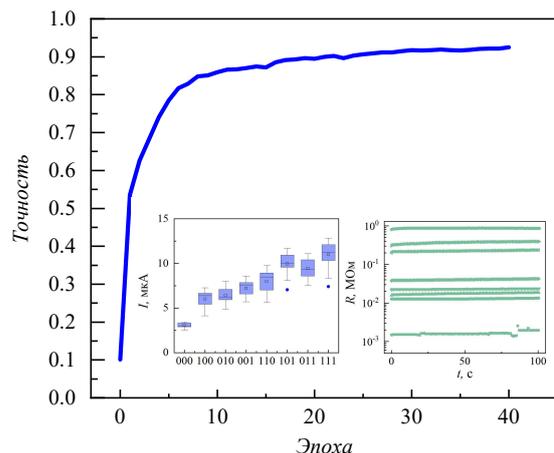


Рисунок 2. Точность распознавания датасета MNIST РВС на основе мемристоров

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 24-19-00200. Измерения были проведены на оборудовании Ресурсного центра (НИЦ «Курчатовский институт»).

[1] C. Du et al. *Nat. Commun.* (2017) **8**, 2204

[2] A. Minnekhanov et al. *ACS Appl. Mater. Interfaces* (2023) **15**, 54996-55008

[3] A. Matsukatova et al. *Adv. Intell. Syst.* (2023) **5**, 2200407

**Мемристоры в интегральной микросхеме: исследование поперечного среза**

А.А. Сушков\*, Д.А. Таран, Д.А. Павлов, И.Н. Антонов,  
Е.Г. Грязнов, В.И. Лукоянов, А.Н. Михайлов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия

\*sushkovartem@gmail.com

Исследовался поперечный срез тестового кристалла RRAM FB-II с модулем, содержащим кроссбар 32 на 8 ячеек памяти 1Т1М (1 транзистор – 1 мемристор). Последовательность слоев в мемристоре от верхнего до нижнего следующая: Au/Ta/Zr<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>O<sub>1.94</sub>/Pt/Ti. Исследование поперечного среза проводилось на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEOL JEM-2100F (200 кВ), который оснащен энергодисперсионным рентгеновским детектором X-Max компании Oxford Instruments.

Техническая сложность в изготовлении поперечного среза мемристора в интегральной микросхеме (ИМС) по стандартной технологии с использованием Gatan 691 Precision Ion Polishing System (PIPS) [1] заключается в том, что его латеральный размер достаточно мал и составляет примерно 10 на 10 мкм. Для реализации исследования на ПЭМ стандартная технология препарирования была скорректирована. Основные отличия следующие. В качестве «жертвенного» слоя, который склеивался с «лицевой» стороной микросхемы, использовалось стекло для упрощения высверливания цилиндра именно с кроссбаром. Механическое утонение ПЭМ-диска с одной из сторон и использование оптического микроскопа со 100-кратным увеличением проводилось друг за другом для контроля расположения поперечного среза относительно ряда из 8 мемристоров. После попадания в нужный поперечный срез с одной стороны, другая сторона утонялась механически и дальнейшие операции проводились по стандартной технологии.

На обзорных изображениях поперечного среза части микросхемы с типичным мемристором, полученных с помощью ПЭМ, виден характерный непрерывный контраст от слоев, что говорит о сплошности материала. При этом размер мемристора в исследуемом поперечном срезе составляет 11 мкм, а толщина слоев мемристора неоднородна и разница в общей толщине структуры на разных участках может достигать до 26 %.

Карты распределения элементов по поперечному срезу методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии позволили идентифицировать все слои мемристора. Совокупность микродифракции от выделенных с помощью селективной апертуры областей и последовательного удаления слоев путем ионного травления в PIPS позволила расшифровать структуру каждого слоя мемристора. Структура слоев: у Au, Zr<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>O<sub>1.94</sub> и Pt – поликристаллическая, у Ta – аморфная, у Ti – аморфная с нанокристаллическими включениями. Пространственная группа зерен поликристаллических слоев –  $Fm\bar{3}m$  ( $SG = 225$ ). С помощью ПЭМ высокого разрешения и Фурье-преобразования результаты расшифровки дифракционных картин подтвердились.

Из литературы известно, что Zr<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>O<sub>1.94</sub> может сформироваться в двух фазах: кубическая ( $Fm\bar{3}m$ ) и тетрагональная ( $P4_2/nmc$ ). Расчет параметра решетки Zr<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>O<sub>1.94</sub> по формуле для кубических решеток, используя измеренные межплоскостные расстояния, дает значение  $(5.15 \pm 0.02)$  Å. Используя формулу, представленную в статье [2], получаем  $x = 0.21 \pm 0.07$ . Отличительные для тетрагональной фазы Zr<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>O<sub>1.94</sub> ( $x = 0.21 \pm 0.07$ ) рефлекссы не были обнаружены в исследуемой области поперечного среза образца. При этом в работе [3] говорится о том, что при  $x = 0.21$  формируется стабильная кубическая фаза, что подтверждает наши результаты.

Представленные результаты анализа позволяют расширить знания о структурных свойствах мемристора в ИМС. Отработанный подход препарирования поперечного среза мемристора в ИМС и его детальный анализ методами ПЭМ могут послужить в качестве научного задела для структурных исследований мемристоров следующих поколений.

[1] A.A. Sushkov et al. *Semiconductors* (2022) **56**, 122-133

[2] R.P. Ingel et al. *J. Am. Ceram. Soc.* (1986) **69**, 325-332

[3] M.-S. Park et al. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* (2019) **17**, 1224-1230

**Моделирование самосовмещенного селектора для матриц RRAM,  
необходимых для создания нейроморфных систем**

М.И. Федотов<sup>1,2,\*</sup>, В.И. Коротыцкий<sup>2</sup>, С.В. Ковешников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов

Российской академии наук, Россия

\*fedotov.mi@phystech.edu

Резистивная память с произвольным доступом (RRAM) является перспективным типом энергонезависимой памяти, среди преимуществ которого – масштабируемость, низкое энергопотребление, высокая скорость чтения и записи. Ключевой особенностью RRAM является способность к многоуровневому переключению, что делает RRAM перспективной элементной базой для аналоговых нейроморфных систем [1]. Помимо этого, массивы Crossbar RRAM являются идеальной элементной базой для нейроморфных систем благодаря возможности энергоэффективного аналогового векторно-матричного умножения [2], используемого в нейроморфных вычислениях.

Основным вызовом, связанным с созданием Crossbar-массивов RRAM, является необходимость ограничивать токи утечки через соседние ячейки при операциях считывания и записи. Для этого применяется специальное устройство – селектор. Проблема заключается в том, что в массивах Crossbar именно селектор является фактором, ограничивающим практически достижимый размер ячейки и, следовательно, размер самой матрицы, так как, в отличие от элемента RRAM, электрофизические характеристики селектора зависят от его площади. Поэтому создание селектора с минимально возможной площадью является актуальной научной задачей.

В данной работе мы предлагаем решение в виде самосовмещенного селектора на основе туннельного диода, площадь которого совпадает с площадью самой ячейки памяти (Рисунок 1). Такой селектор обладает высокой нелинейностью ВАХ и высокой проводимостью, однако эти два качества являются взаимоисключающими для туннельного диода с однослойным диэлектриком. Поэтому мы создали модель туннельной проводимости для многослойных диэлектрических структур. На основе нашей модели мы рассчитали параметры самосовмещенного селектора для матриц RRAM гигабитного масштаба. Полученные нами результаты имеют важное значение для создания памяти нового поколения и аналоговых нейроморфных систем.

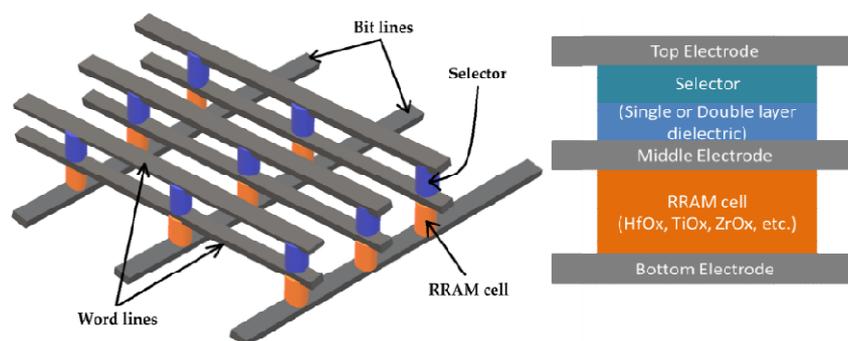


Рисунок 1. Матрица Crossbar RRAM с самосовмещенным селектором

[1] M. Prezioso et al. *Nature* (2015) **521**, 61-64

[2] P. Gu et al. *Proc. 20<sup>th</sup> ASP-DAC* (2015) 106-111

Синаптические функции в мемристивных структурах на основе парилена

Г.А. Юкляевских<sup>1,2,\*</sup>, Б.С. Швецов<sup>1</sup>, А.В. Емельянов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия

\*gyuklyaevskikh@bk.ru

Перспективным элементом для создания нейроморфных вычислительных систем (НВС) является мемристор – прибор, способный изменять свое резистивное состояние под воздействием внешнего поля и прошедшего тока и сохранять его после отключения поля. При этом для создания носимой «умной» электроники необходимо наличие возможности выполнения этими структурами синаптических функций – алгоритмов, наблюдаемых в нервной системе живых существ.

В данной работе изучались конденсаторные структуры мемристоров на основе парилена (ППК), осажденные методом газовой полимеризации на поверхности. Импульсы напряжения при исследованиях подавались на верхний электрод, который был сделан из меди (Cu). В качестве нижнего электрода использовался оксид индия олова (ITO). Во время всех исследований он был заземлен.

Резистивное состояние мемристоров может быть изменено с помощью серии импульсов, конфигурация которых задается в соответствии с биоподобными алгоритмами, которые также называются синаптическими функциями. В данной работе изучался отклик структур на основные синаптические функции: пластичность, зависящая от времени прихода/длительности/амплитуды/частоты импульсов (STDP/SWDP/SADP/SRDP, Рисунок 1), изменение отклика на вторичный импульс (парная фасилитация/депрессия, PPF/PPD), долговременная потенциация и депрессия (LTP/LTD).

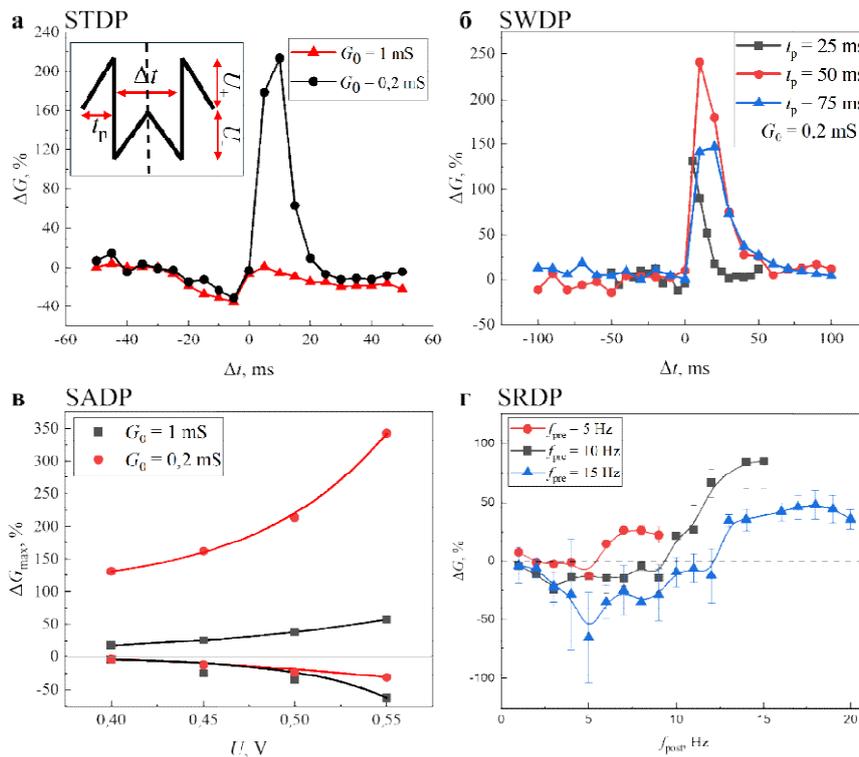
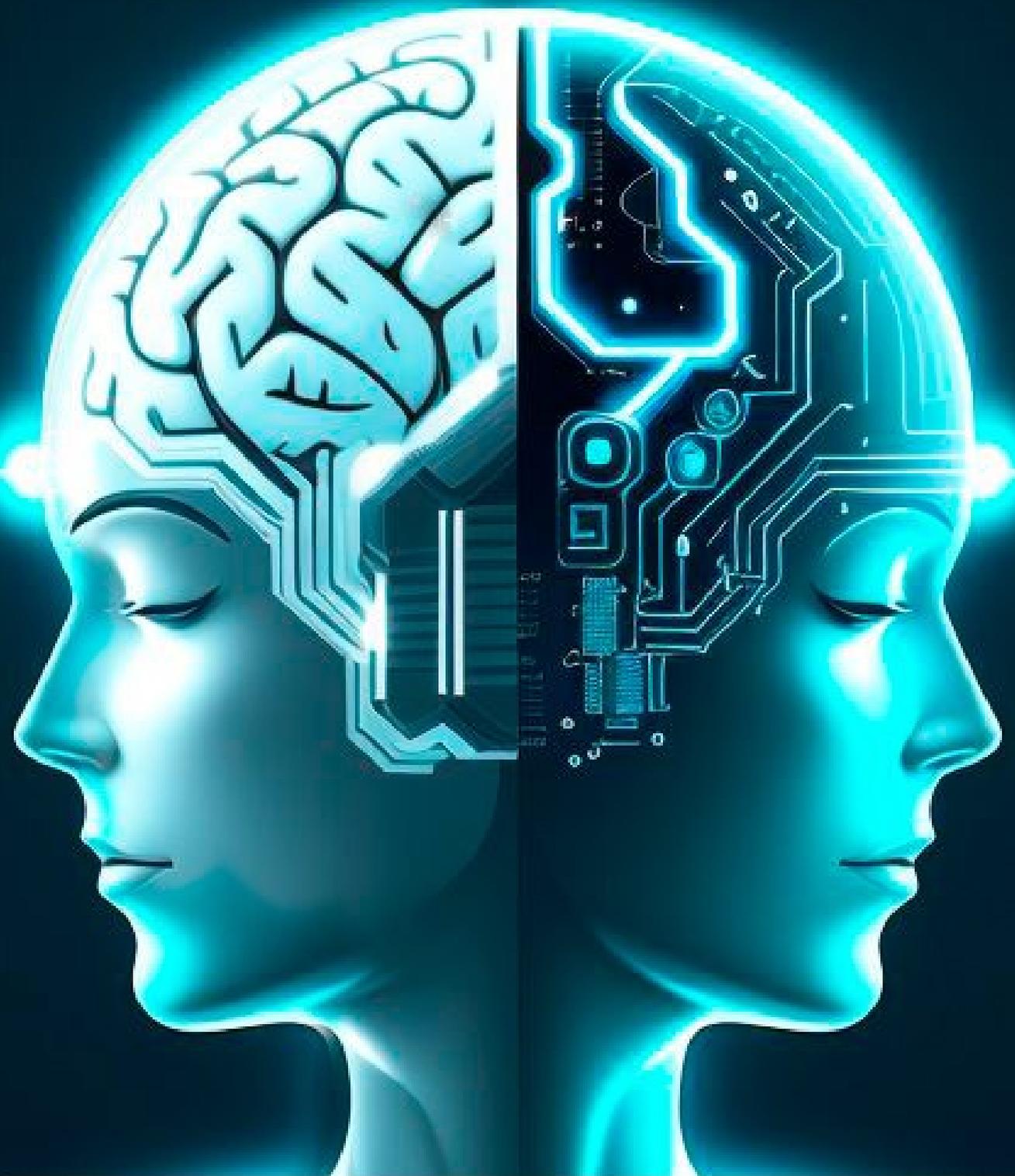


Рисунок 1. Синаптические функции, реализованные на ППК мемристорах: а) STDP в случае различных начальных состояний мемристора, на вставке – пример используемых импульсов; б) SWDP в зависимости от длительности тестирующих импульсов; в) SADP для двух различных начальных состояний мемристора; г) SRDP для фиксированных частот пре-спайков и с изменяющейся частотой пост-спайков

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 24-19-00200.



**Секция «Нейроморфные вычислительные системы»**

**Section «Neuromorphic computing systems»**

Руководитель / соруководитель: В.А. Демин, С.А. Щаников  
Секретарь: И.А. Борданов

Energy, demand for computing power and the Green World

N.A. Sobolev\*

Universidade de Aveiro, Portugal

\*niksob@gmail.com

The gross domestic product (GDP) per capita in different countries clearly correlates with the creation and use of energy sources.

However, the drawbacks resulting from the use of fossil fuels are colossal, and the rate at which renewable energy has grown has been outpaced by ever-growing energy demand.

Somewhat unexpectedly, electronics and telecommunications have become a major consumer of energy. Until 2012, computing power demand doubled every 24 months; recently this has shortened to approx. every 2 months. As a result, e.g. machine learning is on track to consume all the energy being supplied in the world.

In this talk, I'll analyse the efficiency and applicability of different technologies for producing energy and ways to reduce energy consumption.

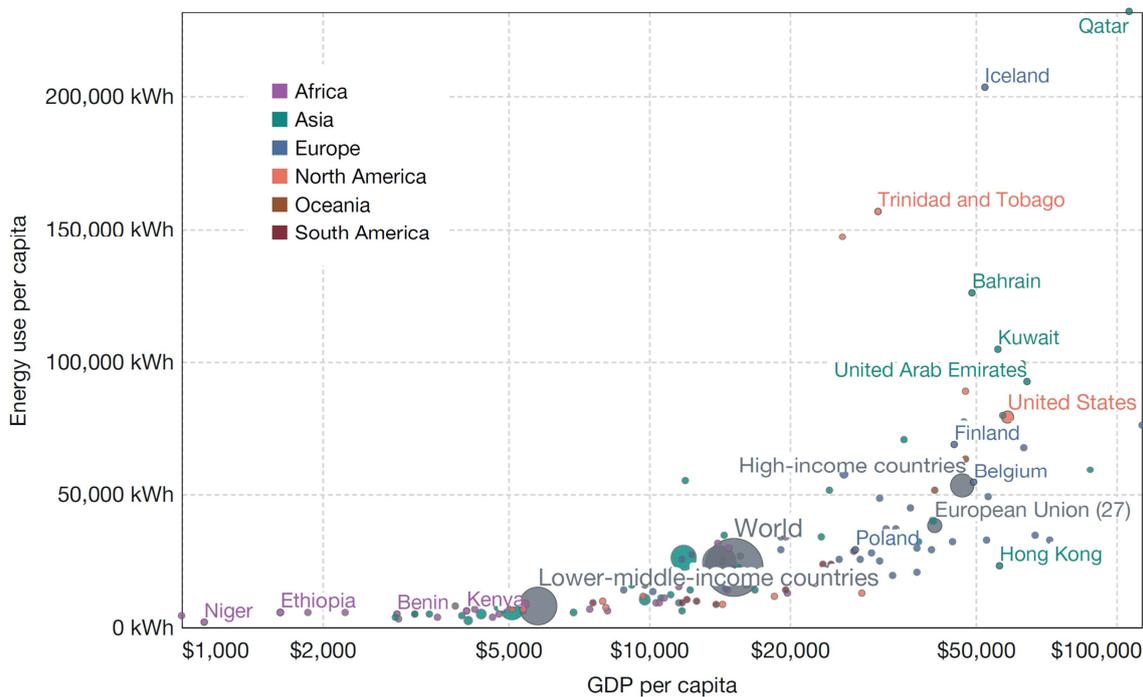


Figure 1. GDP per capita versus energy consumption in 2015. Source: Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/energy-use-per-capita-vs-gdp-per-capita>

**Перевод формальной нейронной сети в спайковую и её инференс на мемристорах**

А.М. Антонов\*, С.А. Щаников

*Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Россия*

\*cfifant@mail.ru

Сегодня методы искусственного интеллекта все более активно внедряются в область обработки данных. Хотя формальные искусственные нейронные сети (формальные ИНС) наиболее распространены, более перспективными можно считать спайковые или импульсные нейронные сети (СИНС). В СИНС информация кодируется последовательностью импульсов или же спайков, что позволяет этим сетям иметь ряд преимуществ над формальными ИНС, такие как: более реалистичная физиологическая модель, масштабируемость и возможность работы на энергоэффективных электронных компонентах, например, мемристорах.

Нейрон в СИНС схож с биологическим: имеет входы (дендриты), связи (синапсы), тело (сома), осуществляющее обработку информации, и выход (аксон). Сигналы проходят через аксон на синапс следующего нейрона, где комбинируются с другими сигналами, определяя поведение нейрона. В отличие от формальных ИНС, в импульсных нейросетях нейроны обмениваются короткими импульсами одинаковой амплитуды, называемыми спайками [1].

Работа нейрона в СИНС заключается в получении и генерации импульсов. Это происходит так: получив и обработав входной спайк, нейрон накапливает потенциал со временем и, достигнув определенного порога мембранного потенциала, генерирует выходной спайк, после чего потенциал сбрасывается до нижнего уровня. Таким образом, сеть получает серию спайков на входе и выдает их на выходе, кодируя информацию точной позицией спайков во времени или их средней частотой. Временной фактор играет важную роль в таких нейронных сетях, включая задержки распространения импульсов и временные характеристики нейронов [2].

Наиболее быстрый метод создания рабочих СИНС [3] – это перевод обученной формальной ИНС в спайковую. Веса, полученные в формальной ИНС, преобразуются в соответствующие параметры спайковой нейронной сети с учетом временного кодирования и применения советуемых ему функций активации, которые могут генерировать спайки.

В данной работе продемонстрирована программная реализация алгоритма преобразования формальной ИНС в СИНС. Созданный модуль позволяет импортировать модель формальной ИНС из фреймворка Keras, конвертировать входные данные в спайковые последовательности, конвертировать формальные нейроны в спайковые и провести модельный инференс СИНС. Также в работе показан инференс конвертированной модели на реальных мемристивных устройствах в топологии кроссбар-массива  $32 \times 8$  1T1R с применением программно-аппаратного комплекса.

[1] М.В. Киселев *I Национальный конгресс по когнитивным исследованиям, искусственному интеллекту и нейроинформатике. Сборник пленарных и индустриальных докладов. Доклады симпозиумов (2020)* 81-84

[2] В.А. Евграфов и др. *Int. J. Open Inf. Technol.* (2021) **9**, 21-31

[3] А.Г. Сбоев и др. *Вестник военного инновационного технополиса «Эра»* (2022) **3**, 314-321

Решение задачи коммивояжера спайковой нейронной сетью

Н. И. Базенков<sup>1,\*</sup>, К.А. Завьялов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, Россия

<sup>2</sup>МГУ им. М. В. Ломоносова, Россия

\*n.bazenkov@yandex.ru

Основным назначением нейроморфных процессоров обычно считают задачи, связанные с машинным обучением: компьютерное зрение, обучение с подкреплением, управление роботами и др. Однако в настоящее время достаточно много исследований посвящено разработке нейроморфных алгоритмов решения традиционных алгоритмических и оптимизационных задач [1]. Библиотека Lava для процессора Intel Loihi имеет расширение для задач оптимизации [2]. Развитие и исследование ограничений этих методов имеет как научный, так и практический интерес.

Мы рассматриваем метод решения задачи коммивояжера с помощью спайковой нейронной сети, предложенный в статье [3]. Даны  $N$  городов, для каждой пары городов  $i, j$  известна  $c_{ij}$  – стоимость путешествия между ними. Требуется построить такой маршрут, в котором каждый город посещается строго один раз, а общая стоимость путешествия минимальна. Спайковая сеть для решения этой задачи показана на Рисунке 1. Сеть состоит из  $N$  блоков WTA (Winner Takes All). Каждый WTA блок включает  $N$  нейронов, связанных латеральными тормозящими связями таким образом, что стабильно активен может быть только один нейрон в блоке (Рисунок 2). Блок с номером  $k$  соответствует  $k$ -му городу в текущем маршруте коммивояжера. Если в  $k$ -м блоке активен нейрон  $i$ , это означает, что на шаге  $k$  будет посещен город  $i$ . Нейроны с одинаковыми номерами во всех блоках соединены тормозящими связями. Блоки  $k$  и  $k+1$  соединены полносвязным слоем синапсов, в котором нейроны с разными номерами  $i$  и  $j$  соединены возбуждающими связями, вес которых обратно пропорционален стоимости путешествия между городами  $i$  и  $j$ . Устойчивое состояние активности сети соответствует возможному решению задачи коммивояжера.

Мы исследуем модификацию сети, в которой к мембранному потенциалу нейронов добавляется адаптивный шум, интенсивность которого убывает по мере понижения стоимости текущего решения.

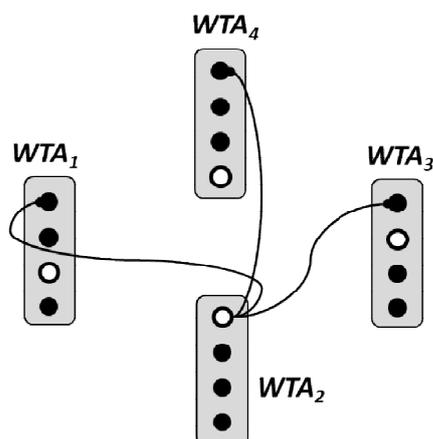


Рисунок 1. Архитектура сети. Активные нейроны (белые) кодируют последовательность обхода графа

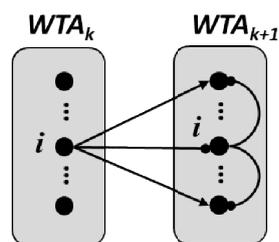


Рисунок 2. Полносвязный слой синапсов между WTA блоками. Стрелки – возбуждающие связи, кружки – тормозящие

[1] J.B. Aimone et al. *Neuromorphic Comput. Eng.* (2022) **2**, 032003

[2] Neuromorphic Constrained Optimization Library. <https://github.com/lava-nc/lava-optimization/>

[3] Z. Jonke et al. *Front. Neurosci.* (2016) **10**, 156676

**Дискретная рекурсивная модель нейрона**

Д.И. Большаков\*, М.А. Мищенко, Д.В. Чиндарев, В.В. Матросов

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия*

\*denis.bolhakov@gmail.com

На сегодняшний день одной из наиболее актуальных задач междисциплинарной науки является проектирование и исследование нейроморфных устройств [1]. Разработка такой нейроморфной электроники позволит строить вычислительные устройства и системы обработки информации по новым принципам и с высоким уровнем параллелизма [2]. Нейроморфные устройства требуют разработки электронных компонентов: нейронов и синапсов.

В данной работе предложена новая дискретная рекурсивная модель нейроподобного генератора. Предложенная модель построена на основе дискретного преобразования основных функциональных характеристик ранее исследованной модели нейроподобного генератора на основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с полосовым фильтром. Такая модель, с одной стороны, обладает богатой колебательной динамикой [3, 4], с другой стороны, имеет сравнительно простую аппаратную реализацию [5] вследствие высокой пространственности систем фазовой автоподстройки частоты в современной аналоговой и цифровой технике.

Базовая модель нейроподобного генератора на базе системы ФАПЧ с полосовым фильтром имеет ряд недостатков: в случае численного счета она имеет высокую вычислительную сложность, так как в непрерывном времени она описывается системой из трех дифференциальных уравнений, в случае аппаратной реализации тяжело (особенно в интегральном исполнении) создать достаточно большое количество идентичных по параметрам моделей в следствии разброса параметров элементной базы. Кроме того, вызывает сложности получение возбуждимого режима, так как без изменения конструкции в данной модели такой режим реализуется только в области начальной частотной расстройки системы равной 0, т.е. только в одной точке [6].

Предложенная в данной работе новая дискретная рекурсивная модель нейроподобного генератора лишена вышеописанных недостатков и, с одной стороны, она обладает такой же колебательной динамикой, как и базовая модель, а с другой стороны, сравнительно невысокой вычислительной сложностью и способна быть реализованной при помощи элементов стандартной дискретной логики.

Работа выполнена при поддержке Научно-образовательного математического центра «Математика технологий будущего», Контракт № 075-02-2024-1439.

[1] J. Zhu et al. *Appl. Phys. Rev.* (2020) **7**, 011312

[2] T. Wunderlich et al. *Front. Neurosci.* (2019) **13**, 260

[3] V.D. Shalfeev *Radiophys. Quantum Electron.* (1968) **11**, 221-226.

[4] М.А. Мищенко и др. *Известия вузов. ПНД* (2012) **20**, 122-130

[5] М.А. Мищенко и др. *ПЖТФ* (2017) **43**, 10

[6] Д.И. Большаков и др. *ПЖТФ* (2022) **48**, 23

**Применение методологии имитационного моделирования для оценки точности работы искусственных нейронных сетей на базе мемристивных устройств**

И.А. Борданов\*, С.А. Щаников

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия

\*bordanov2011@yandex.ru

В настоящее время искусственные нейронные сети (ИНС) применяются для решения множества различных задач, таких как генерация текста [1], распознавание образов [2] и т.д. Однако с увеличением сложности задач, которые решает ИНС, растет и количество их параметров, что, в свою очередь, требует много времени и энергии как на этапах обучения [3], так и в процессе инференса [4]. Это затрудняет применение подходов машинного обучения в системах с жесткими ограничениями ресурсов, таких как носимая электроника и т.д.

Одним из перспективных решений повышения эффективности ИНС является их аппаратная реализация на базе мемристивных устройств (энергонезависимых переменных резисторов). Применение мемристивных устройств в качестве синапсов ИНС позволяет перейти от архитектуры фон Неймана в сторону вычислений в памяти, в которых устройство хранения и обработки информации является единым, что, в свою очередь, позволяет снизить накладные расходы на передачу данных и, соответственно, повысить эффективность их работы [5].

Однако, несмотря на все преимущества такой реализации, у неё есть недостаток, связанный с вариациями резистивных характеристик мемристивных устройств, что, в свою очередь, может приводить к изменению значений весовых коэффициентов синапсов нейронов и негативно сказывается на точности работы ИНС [6]. Соответственно, качество работы таких ИНС необходимо оценивать на этапе проектирования.

Для оценки точности работы ИНС на базе мемристивных устройств (ИНСМ) в данной работе предложен подход, основанный на методологии имитационного моделирования, который состоит из следующих этапов:

1. Создание эмпирической модели мемристивного устройств на основе экспериментальных данных, полученных в процессе его программирования в определенном диапазоне резистивных состояний.
2. Создание эмпирической модели веса синапса нейрона на основе экспериментальных данных, позволяющей оценить погрешность конкретного его значения.
3. Выполнение имитационного моделирования с применением созданных моделей для оценки точности работы ИНСМ с учетом вариаций сопротивлений мемристивных устройств.

Применение данного подхода было апробировано на примере ИНСМ обученной решению задачи классификации данных.

[1] L. Junyi et al. *ACM Comput. Surv.* (2024) **56**, 1-39

[2] F. Rahman *Commun. Appl. Nonlinear Anal.* (2023) **30**, 16-31

[3] E. Strubell et al. *Proc. 57<sup>th</sup> Annual Meeting of the ACL* (2018) 3645-3650

[4] S. Han et al. *Proc. 4<sup>th</sup> International Conference on Learning Representations* (2016)

[5] A. Amirsoleimani et al. *Adv. Intell. Syst.* (2020) **2**, 2000115

[6] I. Bordanov et al. *Proc. 2023 ICIEAM* (2023) 1008-1012

**ArNI-X – новый подход к конфигурированию и эмуляции  
импульсных нейронных сетей**

М.В. Киселев\*

ЧГУ имени И.Н.Ульянова

\*mkiselev1@yandex.ru

В настоящее время существует несколько десятков программных пакетов для задания структуры импульсных нейронных сетей (ИмНС) и эмуляции их выполнения на CPU, GPU или специализированных нейропроцессорах [1]. В качестве наиболее известных примеров можно назвать Brian [2], Nengo [3], NEST [4]. С точки зрения пользователя, практически все они оформлены как пакеты на языке Python. При этом и процедура конфигурирования, и процесс эмуляции («выполнения») нейросети представлены алгоритмически – как последовательность инструкций языка Python.

Такой подход дает необходимую гибкость – при наличии достаточного набора функциональных примитивов, Python, будучи универсальным алгоритмическим языком, дает возможность моделировать любые структуры ИмНС. Однако он имеет и недостатки, главные из которых:

- значительный «порог вхождения», требующий наличия программных навыков, а в случае сложных проектов – профессионального владения Python;
- сложность автоматических манипуляций со структурой сети, так как эта структура никак явным образом не представлена – она создается вызовами процедур.

Как альтернатива, предлагается описывать структуру сети в декларативном стиле и только те ее фрагменты, которые выходят за пределы типовых структур (если таковые имеются), формировать программно. Данный подход реализован в рассматриваемом в данном докладе эмуляторе ИмНС ArNI-X [5]. В этом эмуляторе работа с очень широким классом ИмНС не требует программирования – сеть описывается на языке XML в терминах популяций (множеств нейронов со схожими свойствами) и проекций (наборов синаптических связей между двумя популяциями). При этом поддерживается иерархичность (сети большего масштаба могут включать меньшие типовые компоненты) и возможность создания шаблонов сетей (что, в частности, облегчает автоматическое построение новых нейронных структур в парадигме эволюционного программирования). Данный подход не противоречит требованию гибкости – при необходимости создать нестандартные структуры ИмНС или для индивидуального задания свойств нейронов и синапсов предоставляется C++ API. Для практических приложений предоставляется также API для подачи спайкового сигнала на сеть (дающее возможность привязать эмуляцию к реальному времени) и для считывания активности (команд) сети.

Другой спецификой ArNI-X является ориентированность на реализацию ИмНС на специализированных нейропроцессорах (хотя существующая версия ArNI-X реализована только на x64-совместимых CPU и на GPU). В виду этой специфики в ArNI-X реализованы упрощенные варианты моделей импульсных нейронов и синаптической пластичности. Все вычислительные процедуры разделены на частые (не включающие мультипликативные операции) и редкие (допускающие ограниченное использование мультипликативных операций). Эти и другие инновационные черты ArNI-X подробно рассмотрены в докладе.

[1] Sh.R. Kulkarni et al. *Neurocomputing* (2021) **447**, 145-160

[2] M. Stimberg et al. *eLife* (2019) **8**, e47314

[3] T. Bekolay et al. *Front. Neuroinform.* (2014) **7**, 1-13

[4] M.O. Gewaltig et al. *Scholarpedia* (2007) **2**, 1430

[5] ArNI-X. <https://arni-x.pro/>

Емкость гибкой модели рабочей памяти с учетом двух типов пластичности

Н.С. Ковалева\*, В.В. Матросов, М.А. Мищенко

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия

\*natazh29@yandex.ru

Рабочая память (РП) – это ограниченная по емкости часть памяти человека, которая сочетает в себе кратковременное хранение и обработку информации. В синаптической теории РП запоминаемые элементы поддерживаются за счет кратковременного усиления связей в выборочных, заранее сформированных популяциях нейронов [1]. В рассматриваемой гибкой модели рабочей памяти на основе синаптической теории с двумя типами пластичности [2, 3], популяции, кодирующие входные элементы, формируются во время загрузки элементов за счет механизмов пластичности, зависящей от времени импульсов на нейронах (STDP) [4]. Связи в такой модели не настраиваются заранее по отношению к хранимому объекту, что соответствует механизмам РП.

Моделируемая сеть состоит из 1000 нейронов-пороговых интеграторов, 80 % нейронов – возбуждающие, 20 % нейронов – тормозные. Все элементы находятся в возбудимом режиме, связность сети – 20 %. Связи между возбуждающими нейронами описываются феноменологическими моделями кратковременной пластичности [1] и STDP [4]. Спустя некоторое время спонтанной активности в сеть загружаются образы посредством воздействия внешним стимулом последовательно на 8 групп возбуждающих нейронов одинакового размера. Емкость определяется как число кластеров, в которых наблюдается синхронная активность в течении 5 секунд после полного прекращения внешней стимуляции и спустя секунду для каждой популяции, чтобы устранить эффекты переходных процессов. Показано, что емкость данной модели увеличивается в среднем при увеличении параметра времени восстановления уровня кальция или при уменьшении параметра времени восстановления нейротрансмиттеров, что согласуется с полученными ранее результатами для модели с одним типом пластичности – кратковременной [5]. Скорость обучения STDP  $\lambda$  играет масштабирующую роль в емкости РП: увеличение параметра  $\lambda$  приводит к увеличению емкости РП в среднем, при этом зависимость от времен синаптической пластичности сохраняется (Рисунки 1, 2).

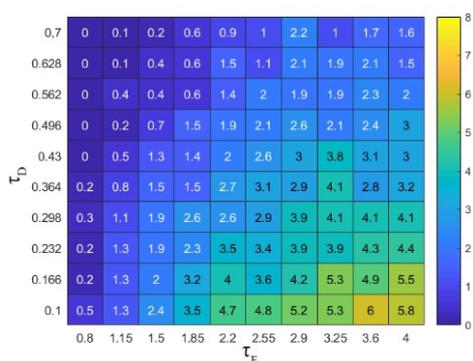


Рисунок 1. Емкость гибкой модели РП в зависимости от времен синаптической пластичности,  $\lambda = 0,001$

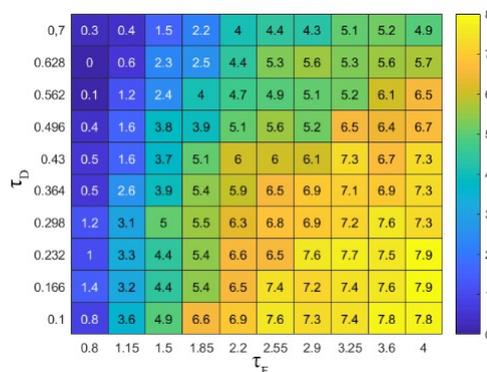


Рисунок 2. Емкость гибкой модели РП в зависимости от времен синаптической пластичности,  $\lambda = 0,0012$

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWR-2023-0031).

[1] G. Mongillo et al. *Science* (2008) **319**, 1543-1546

[2] Н.С. Ковалева и др. *Тезисы докладов XX научной школы «Нелинейные волны – 2022»* (2022) 131

[3] Н.С. Ковалева и др. *Труды XXVI научной конференции по радиофизике, посвященной 120-летию МТ Греховой* (2022) 215-218

[4] A. Morrison et al. *Biol. Cybern.* (2008) **98**, 459-478

[5] Н.С. Ковалева и др. *Известия вузов. ПНД* (2023) **31**, 86-102

**Исследование динамики астроцита системы Уллаха-Юнга**

Л.П. Никифорова\*, С.Ю. Маковкин

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия*

\*ladanik2002@gmail.com

Модель Уллаха-Юнга [1] описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений третьего порядка. Поскольку речь идет об «обычных» нелинейных уравнениях, их решение удобно проводить методом Рунге-Кутты 4-го порядка с постоянным временным шагом. В астроцитах одним из ключевых механизмов, приводящих к автоколебательным процессам, является бифуркация Андронова-Хопфа, которая отвечает за изменение устойчивости стационарного состояния концентрации кальция [2, 3].

Целью данного исследования является анализ динамики системы, где параметр  $IP_3^*$  выступает в качестве управляющей переменной, а  $v_4$  остается постоянным. Для исследования определяются значения экстремумов кальциевых колебаний, что позволяет выявить устойчивые состояния, проанализировать бифуркации и переходы между ними, а также выявить критические точки системы. На графике, показывающем максимальные и минимальные амплитуды концентрации кальция, (Рисунок 1) можно наблюдать диаметр предельного цикла.

В работе исследуется отклик астроцита на внешние импульсы с изменяющимися параметрами: амплитуда  $A$ , длительность  $\tau$  и интервал  $T$ . При интервалах стимуляции, близких к временам релаксации системы, отклик приобретает более сложный и нерегулярный характер [4]. С дальнейшим уменьшением периода стимуляции концентрация кальция может переходить в квазистационарное состояние.

В результате вычисления показателей Ляпунова выявлено, что при  $\lambda > 0$  система находится в режиме странного аттрактора, что характеризует хаотическое поведение. При  $\lambda = 0$  система движется по предельному циклу – замкнутой траектории в фазовом пространстве, что указывает на периодичность поведения. При  $\lambda < 0$  система находится в устойчивом фокусе и стремится к определенному состоянию равновесия, однако в данной модели значение  $\lambda < 0$  не применимо, поскольку астроцит изначально находится в устойчивом фокусе. Эти два режима отображены на Рисунке 2: верхний график показывает максимальную амплитуду концентрации кальция, а нижний – соответствующие показатели Ляпунова.

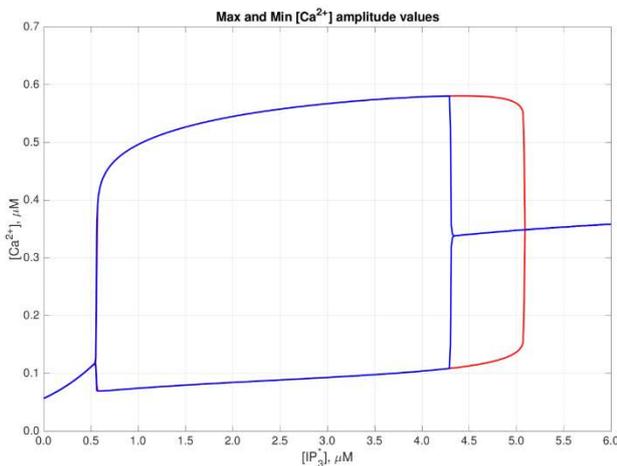


Рисунок 1. Бифуркационная диаграмма динамических режимов астроцита

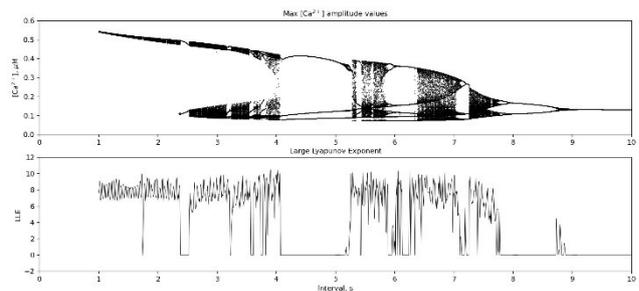


Рисунок 2. Результаты вычислений старшего показателя Ляпунова

[1] G. Ullah et al. *Cell Calcium* (2006) **39**, 197  
 [2] S.Y. Makovkin et al. *Chaos Solit. Fractals* (2020) **138**, 109951  
 [3] V.V. Matrosov et al. *Chaos* (2011) **21**, 023103  
 [4] С.Ю. Гордлеева и др. *Известия вузов. ПНД* (2012) **20**, 29

**Разработка программы для имитационного моделирования процесса  
распределенной обработки информации в нейронных сетях  
на базе мемристивных кроссбар массивов**

Д.А. Никишов\*, С.А. Щаников

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия*

\*daniilnikisov74@gmail.com

Искусственные нейронные сети (ИНС) нашли своё применение во множестве сфер человеческой деятельности, начиная с развлечений и заканчивая наукой. Они доказали свою эффективность в решении задач, которые сложно или невозможно точно формализовать. С каждым годом объёмы данных, обрабатываемых ИНС, продолжают расти, что приводит к ужесточению требований к их производительности и качеству работы. На эти параметры влияют не только архитектура и структура ИНС, но также качество обучения и способы их аппаратной реализации.

Существует несколько подходов к аппаратной реализации ИНС, среди которых можно выделить нейропроцессоры, программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), тензорные и графические процессоры. Все они основаны на цифровых технологиях и осуществляют основную для ИНС операцию – векторно-матричное умножение (ВМУ) в цифровом формате. В настоящее время многие производители электроники и исследовательские группы активно изучают возможность применения наномемристоров (мемристоров) для ускорения процесса выполнения ВМУ [1].

Главной причиной повышенного интереса к мемристорам является их потенциальная возможность обеспечивать более высокую производительность вычислительных систем по сравнению с традиционными технологиями [2]. Это подтверждают многочисленные исследования и мнения экспертов, таких как Саймон Харст и Томас Стерлинг [3].

Однако, несмотря на их преимущества, устройства на основе мемристоров сталкиваются с проблемой нестабильных электрофизических характеристик, что может приводить к ошибкам в их работе. Эти отклонения вызваны несовершенством производственных процессов мемристоров и напрямую влияют на точность нейроморфных систем на основе мемристивных кроссбар массивов [4].

Один из подходов к решению этой проблемы заключается в учёте возможных погрешностей на стадии проектирования нейроморфных систем и создании таких систем с требуемым уровнем точности [5]. Так как производство мемристоров является сложным и дорогостоящим процессом, для исследования их возможностей целесообразно использовать методы имитационного моделирования.

В данном докладе представлена программа, которая моделирует процесс распределённой обработки данных в нейронных сетях на основе мемристивных кроссбар массивов.

[1] A. Serb et al. *arXiv*: 1907.10508 (2019)

[2] Y. Guo et al. *Front. Neurosci.* (2019) **13**, 413

[3] А.И. Галушкин *Информационные технологии* (2015) **2**, 146-156

[4] A. Mehonic et al. *Front. Neurosci.* (2019) **13**, 593

[5] И.А. Борданов и др. *Телекоммуникации* (2020) **8**, 35-48

**Супер экстремальные события и хаос в малом ансамбле элементов ФитцХью-Нагумо с химическими и мемристивными связями**

С.М. Оленин<sup>1</sup>, А.Г. Коротков<sup>1</sup>, И.М. Кипелкин<sup>1</sup>,  
С.А.Герасимова<sup>1</sup>, Т.А. Леванова<sup>1,\*</sup>, А.Н. Писарчик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия

<sup>2</sup>Политехнический университет Мадрида, Испания

\*tatiana.levanova@itmm.unn.ru

Экстремальные события (ЭС) являются одной из актуальных тем в междисциплинарных исследованиях из-за катастрофических последствий воздействия на систему и нерегулярного возникновения этих маловероятных событий. Примеров экстремальных событий, в том числе в живых системах, множество, и одним из самых ярких являются эпилептические припадки [1-3].

Одним из широко используемых подходов является исследование ЭС в модельных динамических системах. В этом случае траектория динамической системы большую часть времени находится внутри некоего ограниченного аттрактора, но иногда выходит за пределы ограниченной области. Это отклонение отражается в виде отклонения большой амплитуды (ЭС) в динамической переменной системы из-за появления областей неустойчивости в пространстве состояний. Несмотря на достаточно обширные исследования последних лет (см., например, обзор [4] и ссылки в нем), здесь остается целый ряд вопросов, включая роль связей различного типа в появлении ЭС.

Целью предлагаемого исследования является изучение сценариев возникновения ЭС, связанных со спецификой мемристивных связей (связей через общее поле) в феноменологической модели малого нейронного ансамбля. В работе детально исследованы сценарии возникновения и разрушения ЭС в ансамбле нейроноподобных элементов ФитцХью-Нагумо, связанных с синаптическими (как химическими, так и электрическими) и мемристивными связями. С помощью двухпараметрического бифуркационного анализа показано, что возникновение ЭС, а также супер ЭС связано с появлением спирального гомоклинического аттрактора в фазовом пространстве системы. В зависимости от значений параметров связи были выявлены и изучены области существования и устойчивости сложных хаотических временных паттернов, а также бифуркационные переходы, приводящие к их возникновению и разрушению. Также предложена экспериментальная апробация нашей модели в программном обеспечении Simulink.

Исследование поддержано Минобрнауки, Соглашение FSWR-2024-0005.

- [1] K. Lehnertz “Epilepsy: Extreme Events in the Human Brain” *Springer* (Berlin, 2006, pp. 123-143)  
[2] A. Pisarchik et al. *Eur. Phys. J.: Spec. Top.* (2018) **227**, 921-932  
[3] N.S. Frolov et al. *Sci. Rep.* (2019) **9**, 1-8  
[4] S.N. Chowdhury et al. *Phys. Rep.* (2022) **966**, 1-52

**Экстремальные события в ансамбле двух нейронов Рутькова  
с химическими и мемристорными связями**

С.М. Оленин<sup>1</sup>, Т.А. Леванова<sup>1,\*</sup>, А.Н. Писарчик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия

<sup>2</sup>Политехнический университет Мадрида, Испания

\*tatiana.levanova@itmm.unn.ru

Экстремальные события – это редкие нерегулярные события, суть которых в том, что наблюдаемая переменная проявляет необычное поведение, например, принимает необычно большие значения. Наиболее ярким примером экстремальных событий в неврологии и медицине являются эпилептические припадки. Несмотря на значительный прогресс в этой области исследований, во многих случаях точные механизмы возникновения экстремальных событий еще предстоит изучить.

В контексте нейродинамики изучение роли различных факторов, таких как типы и топология связей в нейронных ансамблях, в возникновении экстремальных событий является важной и актуальной задачей [1]. Предыдущие исследования [2, 3] показали, что наличие т.н. мемристивных связей в нейронном ансамбле может привести к возникновению хаоса и экстремальных событий.

В настоящей работе исследованы экстремальные события в малом нейронном ансамбле, состоящем из двух нейронов Рутькова, связанных мемристорными и химическими связями. Отображение Рутькова – это простая дискретная модель, которая способна моделировать сложное динамическое поведение, включая различные типы спайковой и пачечной нейрональной активности [4, 5]. В недавней работе [3] были изучены экстремальные события в двух нейронах Рутькова, связанных посредством только мемристивной связи. Основываясь на этих результатах, мы изучили совместное влияние связей различного типа на динамику описанной системы. Рассматриваемый пример ансамбля является более биологически правдоподобным по сравнению с описанным в работе [3].

В представленной работе показано наличие экстремальных событий в рассматриваемой системе, изучены их статистические свойства, а также бифуркационные сценарии рождения и исчезновения экстремальных событий.

Работа поддержана грантом РФФИ 24-11-00339.

[1] A.N. Pisarchik et al. *Eur. Phys. J.: Spec. Top.* (2018) **227**, 921-932

[2] A.G. Korotkov et al. *Eur. Phys. J.: Spec. Top.* (2019) **228**, 2325-2337

[3] P. Durairaj et al. *Eur. Phys. J.: Spec. Top.* (2024) 1-11

[4] R.C. Elson et al. *Phys. Rev. Lett.* (1998) **81**, 5692-5695

[5] N.F. Rulkov *Phys. Rev. E* (2002) **65**, 041922

**Мультикомпарментальный нейрон**

**как перспективный элемент резервуарных вычислений**

В.А. Пчелко\*, О.В. Васильченко, Г.Ю. Колев, М.А. Гальченко, И.А. Бабкин, Т.И. Каримов\*\*  
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия

\*vapchylko@stud.etu.ru

\*\*tikarimov@etu.ru

Казе и др. [1] показали, что интеграция дендритного дерева в модель нейрона (так называемая мультикомпарментальная модель) способна разрешать линейно неразделимые функции. Это актуально, в том числе при организации резервуарных вычислений, имеющих потенциал для промышленных задач [2, 3].

Недавно мы представили новый метод детекции дефектов подшипников на основе снимаемых акселерометром сигналов и одного нейрона ФитцХью-Нагумо с параметрами, при которых он может демонстрировать хаотическое поведение. Нейрон используется в качестве ячейки резервуарных вычислений, на которую подается нормализованный сигнал, подлежащий классификации. Динамика нейрона анализируется путём аппроксимации гистограммы межспайковых интервалов нормальным распределением. Матожидание и дисперсия используются в качестве признаков в простом классификаторе по методу  $k$  ближайших соседей. С помощью этого подхода была успешно произведена классификация трех типов сигналов: нормальных подшипников и двух типов неисправных, поврежденных методом ускоренного старения.

В данном исследовании мы добавили к нейрону дендритное дерево. Чтобы усложнить задачу классификации, мы рассмотрели два других типа неисправностей: искусственные дефекты с низкой выраженностью повреждения. Обучение сводилось к настройке временного масштабирования динамики моделей, а также проводимостей между дендритами и сомой. Классификатор на одном нейроне практически не справился с задачей, в то время как мультикомпарментальный нейрон с V-образным дендритным деревом достиг лучшей точности. Рисунок 1 и Таблица 1 показывают сравнение тестируемых моделей.

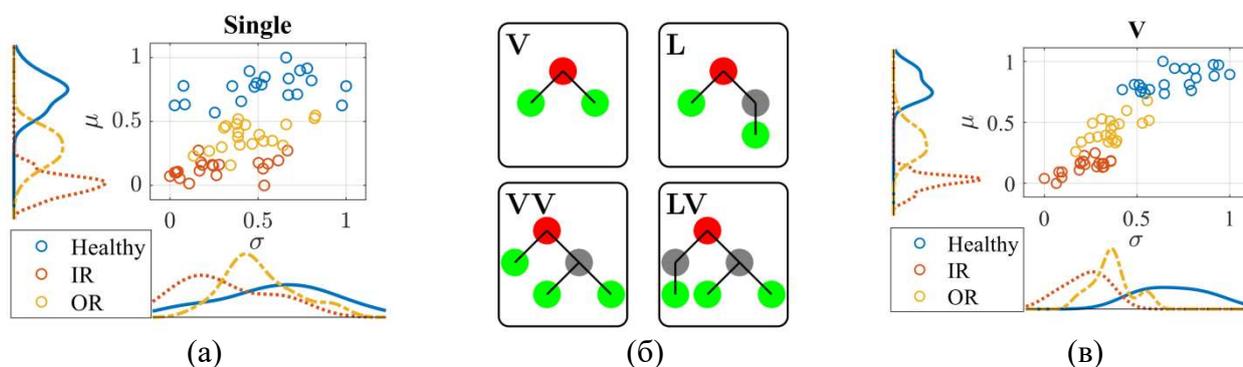


Рисунок 1. Улучшение классификации за счет использования мультикомпарментальной модели нейрона. (а) Пространство признаков, полученное с помощью модели одного нейрона (сомы). (б) Топологии некоторых исследованных моделей дендритных деревьев: зеленый – дендриты, в которые подается сигнал, красный – сома, серый – промежуточные дендриты. (с) Результаты, полученные с помощью V-дерева

Таблица 1 – Сравнение эффективности моно- и мультикомпарментальной модели

Дендритное дерево	Accuracy	Recall	F1-Score
Нет	63,33 %	0,7019	0,6439
V-типа	93,33 %	0,9380	0,9331

Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 23-79-10151.

[1] R.D. Cazé et al. *PLoS Comput. Biol.* (2013) **9**, e1002867

[2] W. Maass et al. *Neural Comput.* (2002) **14**, 2531-2560

[3] V. Kholkin et al. *Big Data Cogn. Comput.* (2023) **7**, 110

**Архитектуры КМОП- и мемристорных нейроморфных процессоров**

О.А. Тельминов\*

АО «НИИМЭ», Россия

\*otelminov@niime.ru

Технологии искусственного интеллекта можно разделить на три категории: экспертные системы, методы машинного обучения без использования нейросетей и методы машинного обучения с применением нейросетей. Именно благодаря принципиальной параллельности нейросетей возможно масштабирование их аппаратной реализации. Применяемая модель нейрона, формальная или спайковая, определяет программные среды для работы с нейросетями, а также нейропроцессоры и нейроморфные процессоры. Они сравниваются по различным потребительским характеристикам с помощью тестов [1].

Ключевую роль в нейропроцессорах играет центральный процессор, управляющий специализированными нейросетевыми ядрами. Сравниваются архитектуры ARM и RISC-V, выделяются особенности архитектур зарубежных и отечественных нейропроцессоров [2]. Рассматриваются альтернативные для общепринятой КМОП-технологии печатные методы изготовления таких процессоров.

Нейроморфные процессоры имеют высокие энергоэффективность и быстродействие, отличаются от нейропроцессоров применением элементной базы на новых физических принципах и/или новыми архитектурами и/или новым способом представления циркулирующих сигналов. Рассматриваются архитектуры отечественного нейроморфного процессора «Алтай» фирмы «Мотив НТ», а также ряд зарубежных процессоров, включая TrueNorth, Tianjic, Loihi 2.

Развитие архитектур движется в направлении сокращения времени пересылки данных между элементами памяти и процессорными элементами и реализуются в виде «вычислений рядом с памятью» и «вычислениями в памяти». Совмещение хранения и обработки информации удастся достичь в перспективных элементах – мемристорах, организованных в виде матриц для выполнения векторно-матричных операций в наиболее быстрой аналоговой форме. Рассмотрены различные варианты реализации нейроморфных процессоров на таких матрицах, а также способы их интеграции с управляющими КМОП-схемами [3].

[1] А.Н. Михайлов др. *Физмат* (2023) 1, 42-64

[2] Г.Я. Красников, Е.С. Горнев, И.В. Матюшкин “Общая теория технологий и микроэлектроника” *Техносфера* (Москва, 2020, 434 с.)

[3] О.А. Telminov et al. *Proc. 6th Scientific School DCNA* (2022) 278-281

**Влияние астроцитов на кратковременную память  
в биофизических моделях нейрон-астроцитарных сетей мозга**

Ю.А. Цыбина<sup>1,2,\*</sup>, С.Ю. Гордлеева<sup>1,2</sup>, В.Б. Казанцев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия

<sup>2</sup>АНО Неймарк, Россия

\*lotarevaj@gmail.com

В основе традиционной концепции обработки и хранения информации в мозге лежит передача электрических импульсов по нейронным сетям. Однако экспериментальные исследования последних лет выявили также важную роль астроцитов, глиальных клеток мозга, в этих процессах. Астроциты генерируют импульсы химической активности, а именно кратковременное повышение внутриклеточной концентрации ионов кальция, в ответ на генерацию потенциалов действия нейронами. Эти астроцитарные кальциевые импульсы вызывают высвобождение глутрансмиттеров, которые связываются с рецепторами, расположенными на пре- и постсинаптических терминалях близлежащих синапсов, модулируя в них синаптическую передачу. Несмотря на большое количество экспериментальных данных, подтверждающих существование астроцитарной регуляции синаптической передачи, ее роль в механизмах обработки информации и формировании кратковременной памяти до сих пор неясна и остается предметом активных исследований. Поэтому в данной работе была разработана математическая модель нейрон-астроцитарной сети для уточнения и объяснения биофизических механизмов формирования кратковременной памяти.

Разработанная модель нейрон-астроцитарной сети состоит из синаптически связанных нейронов Ижикевича [1], двунаправленно взаимодействующих с астроцитами. Для описания динамики внутриклеточной концентрации кальция в астроците используется модель Уллаха [2]. Астроциты друг с другом связаны гЭП-контактами, проницаемыми для молекул инозитол-1,4,5-трифосфата (ИТФ) и ионов кальция ( $Ca^{2+}$ ). Топология синаптических связей в сети случайная, подчиняющаяся экспоненциальному распределению. Входной сигнал в виде цифрового изображения преобразовывается в электрический ток и подается в нейронную сеть таким образом, что один пиксель изображения соответствует одному пирамидальному нейрону сети. Выходной сигнал декодируется как средняя частота генерации потенциалов действия (ПД) пирамидальными нейронами.

В результате проведенного исследования эффективности кратковременной памяти в разработанной модели нейрон-астроцитарной сети было показано, что учет механизма астроцитарной модуляции синаптической передачи в модели спайковой нейронной сети, обученной по правилу STDP пластичности, приводит к увеличению на 10 % эффективности хранения информационных сигналов с высокой степенью пересечения (до 80 %) стимул-специфичных нейронных ансамблей по сравнению с моделью спайковой нейронной сети, обученной только согласно правилу STDP.

Данная работа выполнена при поддержке Российского научного фонда грант № 22-12-00216.

[1] E. Izhikevich *IEEE Trans. Neural Netw.* (2003) **14**, 1569

[2] G. Ullah *Cell calcium* (2006) **39**, 197



**Секция «Нейротехнологии  
и биоморфная робототехника»**

**Section «Neurotechnology and biomorphic robotics»**

Руководитель / соруководитель: В.Б. Казанцев, С.Ю. Гордлеева  
Секретарь: Ю.А. Цыбина

**Phase-trajectory analysis self-organized of the spinal CPG**

A.Y. Fedorova<sup>1,\*</sup>, I.M. Kipelkin<sup>2,\*\*</sup>, M.O. Talanov<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>*Kazan Federal University, Russia*

<sup>2</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>3</sup>*Institute for Artificial Intelligence R&D of Serbia, Serbia*

<sup>4</sup>*University of Messina, Italy*

\*Alinok20015@gmail.com

\*\*Ivan.kipelkin@yandex.ru

The study of neural activity in humans is currently a fundamental aspect of neuromorphic systems. In this context, attention is focused not only on the brain but also on the spinal cord. The spinal cord (SC) is a complex and highly interconnected network of neurons, with the central pattern generator (CPG) being one of its most critical components. The CPG is essential for facilitating rhythmic movements, particularly post-injury [1]. However, the intricate network of numerous neurons and synapses within these structures poses significant challenges in accurately replicating the requisite neuronal activity. Therefore, a comprehensive study of the spinal cords structure and function, coupled with the application of simulation models and dynamic systems theory, may be pivotal for advancing the understanding of the underlying mechanisms involved in recovery from SC injuries.

In this work, we introduce a simulated SC self-organizing model. We focus on the analysis of phase trajectories of the main neural structures underlying functioning in SC. Our SC model extends [2] and has a number of significant improvements, including feedback and elements of self-learning based on STDP.

The CPG model includes the structure of interconnected neurons and muscles of two legs, which are linked by inhibitory interneurons. Activity for both legs comes from neurons in the brainstem, which excite the rhythm generators of the flexor and extensor, as well as from the skin to the extensor muscles. The extensor and flexor form a feedback loop that starts with rhythm generators, which excite motor neurons that, in turn, stimulate muscle fibers. Through afferent connections, the excitatory signal is sent back to the rhythm generators. The extensor and flexor work in antiphase, which is why they are connected by inhibitory interneurons. STDP modifies synaptic weights between different types of neurons, either strengthening or weakening the synaptic connections. This influences the excitation strength of the rhythm generators, as well as the coordination between the flexors and extensors. STDP can modulate connections with motor neurons, potentially affecting the strength and coordination of muscle contractions. It can also influence sensory inputs from the skin to the extensors, altering the sensitivity to external stimuli.

We analyzed phase portraits and identified transient dynamic processes in which the system initially undergoes stepwise changes in discrete jumps later evolving into a limit cycle in three-dimensional space. The stable periodic trajectory is formed by the overlapping peaks of oscillations and synaptic, axonal and neuronal delays of the flexor-extensor antagonist muscle system. The system's phase space indicates the periodic nature of this trajectory.

Understanding the CPG mechanisms provides valuable insights into the nature of neural activity and motor control. It also forms the basis for developing new approaches in rehabilitation medicine and robotics.

[1] S. Grillner *Prog. Brain Res.* (2002) **137**, 97-108

[2] I.A. Rybak et al. *ENeuro* (2015) **2**, 5

**Analysis and prediction of local field potentials for activity recovery in rodent hippocampal slices using a recurrent GRU network**

V.V. Razin\*, M.I. Samburova, N.V. Gromov, A.V. Naumov,  
S.V. Gerasimova, T.A. Levanova, A.V. Lebedeva, L.A. Smirnov  
*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia*  
\*razinvyacheslav@gmail.com

As life expectancy increases, neurodegenerative diseases (NDD) are becoming an increasingly pressing issue in the medical field. Since current solutions in this area do not provide the expected results, scientists are currently developing new medical technologies for the treatment of NDD. Neuroprosthetics is one of the new promising approaches, which is based on the connection of an artificially created system with living neurons. To successfully create neuroprosthetics for various areas of the brain, it is necessary that the artificial system be able to successfully restore healthy activity to damaged areas.

The aim of this work is to restore healthy activity in hippocampal slices of laboratory mice as a first step to restoring the functions of the damaged hippocampus of rodents *in vivo* and further development of the technology for creating effective medical technologies for the treatment of neurodegenerative diseases and brain damage in humans. To achieve this goal, the problem of predicting activity in the CA1 region of the mouse hippocampus was solved based on the activity of the CA3 region of the hippocampus using a neural network approach. Having a neural network that is capable of making such predictions, it is possible to develop a neurochip that will replace the functioning of the damaged CA1 region.

The data in this work were taken from recordings of local field potentials (LFP) in the CA3 and CA1 regions of hippocampal slices of laboratory mice during electrical stimulation of the *dentate fascia*. In the experiments, pairs of LFP signals were recorded in the CA1 and CA3 areas before and after the destruction of the CA1 area of the rodent hippocampus at different amplitudes of electrical stimulation: 100, 200, 300, 400, 500 and 1000 microamperes. For pairs of correctly recorded signals, classical preprocessing methods for biological data were used: removal of artifacts and noise, as well as standardization, necessary for subsequent more effective training of neural networks.

In the scientific community, time frequency or statistical analysis and deep learning methods [1-4] are used to analyze LFP. In this work, the recurrent GRU network, which works well with time series of various natures, was used to solve the problem of predicting neuronal activity in the CA1 region based on the input (activity in the CA3 region).

The result of the work is the proposed recurrent GRU network, which is capable of reproducing the response in the CA1 region of the hippocampus based on a signal from the CA3 region of the hippocampus of laboratory mice. The concept of a replacement hippocampal chip was tested on data from hippocampal slices. The results obtained are of interest, since they can be used to improve the predictive ability of the considered deep learning models by constructing all sorts of ensembles.

The acquisition of biological data was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-75-10099), the numerical experiments were supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project FSWR-2024-0005.

[1] В.В. Разин *Актуальные проблемы управления: Сборник научных статей по итогам X Юбилейной Всероссийской научно-практической конференции* (2024) 650-653

[2] В.В. Разин *Биосистемы: организация, поведение, управление: Тезисы докладов 77-й Всероссийской с международным участием школы-конференции молодых ученых* (2024) 302

[3] В.В. Разин и др. *Математика и ИТ – вместе в цифровое будущее. Сборник трудов Молодежной школы* (2022) 78-86

[4] А.А. Краснов и др. *Математика и ИТ – вместе в цифровое будущее. Сборник трудов Молодежной школы* (2022) 44-50

**Q-анализ как эффективный подход для выявления взаимодействий высокого порядка в функциональных сетях головного мозга: примеры применения**

С.А. Куркин<sup>1,\*</sup>, Н.С. Смирнов<sup>1</sup>, Р. Паунова<sup>2</sup>, Д. Стоянов<sup>2</sup>, А.Е. Храмов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия

<sup>2</sup>Пловдивский медицинский университет, Болгария

\*kurkinsa@gmail.com

Анализ функциональных сетей открывает широкие возможности для понимания процессов, происходящих в мозге человека как в норме, так и при патологии. Например, различные психические расстройства характеризуются тонкими отклонениями от нормы функциональных связей на разных сетевых масштабах. Традиционно функциональные сети анализируются только на уровне парных взаимодействий. Однако такое упрощение не позволяет изучать одновременные взаимодействия нескольких областей мозга, характерные для сложных механизмов функционирования мозга. Применение методов анализа взаимодействий высокого порядка в сетях является более мощной и эффективной методикой. Одним из таких подходов является Q-анализ, который выявляет сильно связанные симплициальные комплексы на различных топологических уровнях. Мы применили этот метод к модельным сетям с различными топологиями, а также к функциональным сетям мозга, реконструированным на основе данных фМРТ в состоянии покоя здоровых людей и пациентов с большим депрессивным расстройством (БДР), чтобы выявить особенности взаимодействий высокого порядка в сети, связанные с БДР.

В исследовании БДР приняли участие 164 человека: 94 из группы здорового контроля и 70 пациентов с БДР. фМРТ-сканирование проводилось на 3 Тл МРТ-системе (GE Discovery 750w), объем мозга был разделен на 165 областей в соответствии с атласом AAL3. Для каждого участника были вычислены функциональные матрицы связности на основе данных фМРТ с использованием коэффициентов корреляции Пирсона между средними временными рядами BOLD для каждой из 165 областей мозга. Использовались следующие метрики Q-анализа [1]: первый структурный вектор (FSV, количество q-связанных компонент для каждого q); второй структурный вектор (SSV, количество симплексов порядка q и выше); третий структурный вектор (TSV): отношение  $1 - FSV/SSV$ ; топологическая энтропия (вероятность участия узла в симплексе порядка q); топологическая размерность (количество симплексов, в которых участвует узел). Для определения статистической значимости различий метрик проводился перестановочный тест.

Полученные нами результаты свидетельствуют о том, что у людей с БДР снижено топологическое разнообразие и сложность функциональных сетей мозга. В частности, в группе БДР наблюдался более низкий максимальный уровень топологии ( $q_{max} = 9$ ), по сравнению со здоровыми людьми ( $q_{max} = 11$ ), а также увеличение числа изолированных ребер и цепей на уровне парных взаимодействий и уменьшение числа клик и связей между ними на более высоких уровнях топологии. Кроме того, значительные изменения наблюдались в топологических размерностях отдельных областей мозга. Например, *substantia nigra* демонстрировала более высокую топологическую размерность в группе БДР, участвуя в большем количестве клик, по сравнению с группой контроля. Наконец, мы выявили нарушенные подсети и нарушенные узлы в группе БДР. В частности, гипоактивированная подсеть включала узлы, расположенные в областях затылочной, височной и теменной долей, а также в мозжечке, пре- и постцентральных извилинах. В то же время гиперактивированная подсеть включала нарушенные узлы в областях височной доли и мозжечка, гиппокампа и парагиппокампальной извилины. Таким образом, при БДР сильнее вовлечены лимбические структуры, такие как *substantia nigra*, парагиппокампальная извилина и гиппокамп, и слабее – затылочная и височная доли и мозжечок. Это исследование подчеркивает потенциал Q-анализа как инструмента для изучения сложной динамики функционирования мозга.

Исследование поддержано Российским научным фондом (грант № 23-71-30010).

[1] M. Andjelković et al. *Sci. Rep.* (2020) **10**, 17320

**Нейротехнологии в образовании: как улучшить обучение**

М.С. Литвинова\*

*Ухтинский государственный технический университет, Россия*

\*ilovebeer@internet.ru

Современные нейротехнологии открывают новые перспективы для улучшения образовательных процессов. Применение интерфейсов мозг-компьютер (ИМС), нейромоделирования и нейромониторинга позволяет глубже понять когнитивные процессы и адаптировать образовательные методы под индивидуальные особенности учащихся.

Роль нейротехнологий в персонализированном обучении: нейротехнологии предоставляют инструменты для мониторинга активности мозга, что позволяет лучше понимать когнитивное состояние учащихся. Это помогает разрабатывать персонализированные подходы к обучению, оптимизируя время и методы подачи информации в зависимости от уровня концентрации, усталости и восприятия информации.

Использование нейророботной связи для улучшения когнитивных функций: технологии нейророботной связи могут помочь учащимся улучшить свои когнитивные функции, такие как внимание, память и способность к обучению. Благодаря регулярным тренировкам с использованием таких систем возможно улучшение ментальной гибкости и способности решать сложные задачи.

Когнитивные усилители и возможности их применения в образовании: применение когнитивных усилителей, основанных на нейростимуляции (например, транскраниальная магнитная стимуляция), может повысить способность к обучению и концентрации. Это может быть особенно полезным для студентов с нарушениями внимания или обучаемости.

Мониторинг стресса и эмоционального состояния в процессе обучения: нейротехнологии позволяют в реальном времени отслеживать эмоциональное состояние учащихся, что дает возможность своевременно корректировать учебный процесс. Например, преподаватели могут адаптировать сложность задач в зависимости от уровня стресса или тревожности учащихся.

Виртуальная реальность и нейроинтерфейсы для иммерсивного обучения: комбинирование виртуальной реальности с нейроинтерфейсами позволяет создать иммерсивные образовательные среды, где учащиеся могут обучаться в интерактивных симуляциях. Это способствует более глубокому пониманию сложных концепций и развитию практических навыков.

Этические аспекты и потенциальные риски использования нейротехнологий в образовании: применение нейротехнологий в образовании связано с рядом этических вопросов, таких как приватность данных, несанкционированное использование информации о мозговой активности, а также возможные риски когнитивных вмешательств. Необходимо создание четких законодательных рамок и этических норм для минимизации таких рисков.

Нейротехнологии обладают огромным потенциалом для повышения эффективности образовательных процессов. Их внедрение может способствовать индивидуализации обучения, улучшению когнитивных функций и созданию новых методик преподавания. Для успешной интеграции необходимо учитывать этические и социальные последствия их использования.

**Исследование эффективности адаптивной нейронной сети с функцией обратной связи для восстановления нарушенной электрической активности в гиппокампе**

М.В. Матвеева\*, М.А. Мищенко, А.А. Федулina, А.Н. Михайлов, В.Б. Казанцев

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия*

\*m.matveeva288@gmail.com

Разработка инновационных методов и технологий реабилитации, включая нейропротезы, для восстановления утраченных функций становится ключевой задачей в нейронауке и технике. Основная задача при разработке таких устройств – функциональное соединение живых нейронов с электронными компонентами с помощью искусственных синапсов и нейронов. Обучаемые нейронные сети, используемые в нейрогибридных технологиях и нейроинтерфейсах, являются перспективными подходами. Это может обеспечить прорыв в диагностике и лечении неврологических и нейродегенеративных заболеваний и в нейропротезировании.

Данная работа направлена на проведение фундаментальных исследований по разработке концепции и основных компонентов физического устройства на базе электронных элементов, способной регулировать активность нейронных систем мозга через выработку адаптивных стимулирующих воздействий на уровне клеточных и клеточно-сетевых нейроинтерфейсов.

Цель этого исследования – создать нейроинженерные принципы технологии восстановления повреждённых областей мозга с помощью искусственных нейронных сетей с адаптивными связями.

В ходе исследования были проведены эксперименты с использованием переживающих срезов гиппокампа взрослых самцов мышей линии C57BL/6 в возрасте 9-12 недель. Для регистрации электрофизиологической активности внеклеточных структур применялись методы фиксации локального потенциала. В процессе работы была проведена стимуляция перфорантного пути в срезах гиппокампа с использованием искусственных сетей. Это позволило определить потенциал локального поля (LFP). Для управления активностью нейронов гиппокампа в режиме реального времени была разработана система пропорционального управления. В её основе лежит многоканальная система АЦП/ЦАП NI USB-6211.

В процессе исследования были проведены эксперименты по регистрации локальных полевых потенциалов на срезах гиппокампа, которые были соединены по замкнутому контуру с разработанной системой в режиме реального времени. Было продемонстрировано, что система способна стимулировать гиппокамп с адаптивной амплитудой или наклоном LFP и контролировать уровень его активности в области CA1. Были настроены параметры пропорционального управления и подобраны характеристики временной задержки, учитывающие расположение электродов на срезах мозга.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального физико-математического центра, секция № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах» и гранта Программы «Мозг» АНО «Идея».

**Стимуляция нейрональной активности в срезе гиппокампа мыши  
для восстановления активности в гиппокампе  
с помощью сигнала, предсказанного LSTM**

А.В. Наумов<sup>1,\*</sup>, И.М. Кипелкин<sup>1</sup>, М.И. Самбунова<sup>1</sup>, В.В. Разин<sup>1</sup>, Н.В. Громов<sup>1</sup>,  
М.И. Яшанова<sup>2</sup>, С.А. Герасимова<sup>1</sup>, Т.А. Леванова<sup>1</sup>, Л.А. Смирнов<sup>1</sup>,  
А.В. Лебедева<sup>1</sup>, А.Н. Писарчик<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия

<sup>2</sup>Приволжский исследовательский медицинский университет, Россия

<sup>3</sup>Мадридский политехнический университет, Испания

\*alexandr.naumov@unn.ru

В данной работе представлен экспериментальный подход, основанный на подаче искусственной нейронной активности в виде предсказанных сигналов, генерируемых нейронной сетью с долгой краткосрочной памятью (LSTM), обученной на массиве нейронных данных. Цель данного подхода заключается в получении локального полевого потенциала гиппокампа в ответ на поданные сигналы.

Заболевания и травмы нервной системы составляют около 6,3 % от глобального бремени болезней [1]. Эти состояния затрагивают более миллиарда человек во всем мире и, как ожидается, ухудшатся в ближайшие годы из-за старения населения. Безусловно, одним из наиболее перспективных методов в данной области является разработка мозг-компьютерных интерфейсов [2].

В ходе эксперимента на срезах гиппокампа мыши проводилась регистрация локальных полевых потенциалов в областях CA1 и CA3 в ответ на электрическую стимуляцию зубчатой фасции. Стимулирующий сигнал представлял собой предсказанную активность, полученную с использованием LSTM-сети, и был сгенерирован с помощью программно-аппаратной платформы Arduino UNO R3.

На начальном этапе экспериментов в качестве стимулирующего сигнала использовался предсказанный LSTM-сетью шумный сигнал, однако его подача не приводила к появлению локальных полевых потенциалов в регистрируемых областях гиппокампа. Для устранения этого недостатка было предложено использовать сигнал после фильтрации, избавленный от шумов. Эксперименты показали, что подача отфильтрованного сигнала с амплитудой 4 В, частотой 0,2 Гц и длительностью 9 мс обеспечила появление локального полевого потенциала. Это свидетельствует о реальном отклике дендритов пирамидных нейронов в области CA1 на дополнительную нейронную активность, сформированную на платформе Arduino UNO R3 с использованием аналого-цифрового преобразования.

Данный подход позволил разработать схемотехническое решение для нейробиологической задачи восстановления нейрональной активности в гиппокампе, которая может быть нарушена при нейродегенеративных заболеваниях. Полученные результаты могут стать основой для создания новых методов нейростимуляции, направленных на восстановление когнитивных функций и улучшение качества жизни пациентов.

Проведение экспериментальных работ по регистрации нейрональной активности в срезах гиппокампа и предъявлению предсказанного сигнала в биологическом эксперименте было поддержано грантом РФФИ (соглашение № 23-75-10099). Проведение вычислений для получения предсказанного сигнала нейронной сетью было поддержано грантом Министерства науки и образования РФ (соглашение FSWR-2024-0005).

[1] Y. Mu et al. *Mol. Neurodegener.* (2011) **6**, 85

[2] L.E. Jarrard et al. *J. Neurosci.* (1999) **19**, 1492-1507

**Оценка влияния эпилептиформной нейрональной активности  
в срезах гиппокампа мышей на функциональные свойства мемристора**

Д.Д. Пахомова<sup>1</sup>, М.Н. Коряжкина<sup>1,\*</sup>, Е.Д. Будылина<sup>1</sup>, А.А. Иванов<sup>1</sup>, А.В. Лебедева<sup>1,2</sup>,  
И.Н. Антонов<sup>1</sup>, В.В. Разин<sup>1</sup>, А.И. Белов<sup>1</sup>, А.Н. Михайлов<sup>1</sup>, А.А. Конаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия

<sup>2</sup>Приволжский исследовательский медицинский университет, Россия

\*mahavenok@mail.ru

Разработка нейропротезов и нейроинтерфейсов, способных помочь в восстановлении функционирования нейронных сетей в мозге при их нарушениях, является крайне актуальной задачей на стыке нейробиологии, инженерии и медицины [1]. Такие устройства имеют широкое практическое применения. В частности, они могут быть использованы для стимуляции нервной ткани с целью остановки гиперсинхронности нейронных сетей, например, таких, которые возникают при эпилепсии. В последнее время мемристоры – новые элементы электронной компонентной базы, рассматриваются как перспективная основа для разработки таких устройств, благодаря их способности плавным (аналоговым) образом изменять свою проводимость и, вследствие этого, демонстрировать ряд функций, присущих биологическим нейронам [2]. Более того, мемристоры относят к энергоэффективным и миниатюрным устройствам, способным совместно с искусственными нейрональными сетями выполнять обработку данных в реальном времени (см., например, [3] и ссылки в ней). В данной работе разрабатываются подходы к обработке нейрональных сигналов мемристивным устройством на основе  $ZrO_2(Y)$  и проводится оценка его функциональных свойств. В частности, исследуется изменение резистивного состояния устройства в ответ на эпилептиформную нейрональную активность. В качестве объекта биологических экспериментов использованы переживающие срезы гиппокампа мышей линии *c57bl/6* возрастом от 3 до 7 месяцев, полученные в ЦГКЛЖ ННГУ. Все животные получали пищу и питье *ad libitum* и находились в содержании при учете 12-часового светового цикла. Все экспериментальные процедуры были одобрены биоэтическим комитетом ННГУ. Протокол подготовки срезов гиппокампа мышей была проведена в соответствии с методикой, описанной в [1]. После инкубации срезы помещались в камеру электрофизиологического микроскопа Olympus для регистрации активности клеток. Регистрировались локальные полевые потенциалы (ЛПП) в поле *str. radiatum* гиппокампа с помощью стеклянного микроэлектрода с сопротивлением 3-7 МОм при электрической стимуляции зубчатой фасции (*dentate gyrus*) с разной амплитудой стимулирующего сигнала (100, 200, 300, 400, 500, 1000 мкА) и длительностью 50 мкс. ЛПП регистрировались в контроле и при эпилептиформной активности («эпилепсия»), полученной с использованием хемоконвульсанта 4-аминопиридина с концентрацией 1 мкмоль. Было получено 50 записей ЛПП для группы контроля и 50 записей для группы «эпилепсия». Записи были предобработаны: удалялся артефакт от стимулирующего сигнала, производилась нормировка к базовой линии и применялся фильтр Гаусса. Затем сигналы масштабировались таким образом, чтобы их амплитуды были близки по порядку величины к напряжениям резистивного переключения. Затем сигналы прикладывались к мемристивному устройству при помощи зондовой станции Everbeing EB-6 и многофункционального устройства ввода-вывода National Instruments USB-6361. Отклик устройства записывался и анализировался.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-21-00440). Мемристивные устройства были изготовлены с использованием оборудования и средств Лаборатории мемристорной наноэлектроники (государственное задание № FSWR-2022-0009) и Учебного дизайн-центра электроники ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП – Научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

[1] S.A. Gerasimova et al. *Chaos Solit. Fractals* (2021) **146**, 110804

[2] H. Qin et al. *Appl. Phys. Lett.* (2024) **125**, 143502

[3] A.N. Mikhaylov et al. *Supercomput. Front. Innov.* (2023) **10**, 77-103

**Прогнозирование fEPSP гиппокампа грызунов  
посредством использования двух взаимосвязанных резервуаров**

В.В. Разин\*, М.И. Самбурова, Н.В. Громов, А.В. Наумов, С.В. Герасимова,  
Т.А. Леванова, А.В. Лебедева, Л.А. Смирнов

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия*

\*razinvyacheslav@yandex.ru

С увеличением средней продолжительности жизни нейродегенеративные заболевания становятся все более острой проблемой. Кроме того, черепно-мозговые травмы, мозговые инфекции и другие неврологические заболевания приводят к серьезным проблемам и трудностям для таких пациентов. Лечение таких заболеваний и травм мозга требует разработки более совершенных медицинских технологий, таких как технологии мозг-компьютер (или интерфейсы мозг-компьютер, ВСИ). Один из наиболее перспективных подходов в этой области основан на инвазивных технологиях мозг-компьютер из-за их способности работать с использованием сигнала, полученного непосредственно из нужных областей мозга.

Последние достижения в методах машинного обучения потенциально могут существенно улучшить производительность ВСИ в различных задачах. Более того, следует отметить, что архитектуры машинного обучения и глубокого обучения в настоящее время широко используются в медицине [1-3]. Одним из наиболее перспективных и обсуждаемых подходов здесь является резервуарное вычисление (RC) из-за его простоты реализации и высокой универсальности. Другим ценным моментом для использования архитектуры RC в задачах ВСИ и восстановления памяти является соответствующая близость RC к биологическим нейронным сетям, что дает им уникальное преимущество в преобразовании переходной динамики многомерных нелинейных систем для обработки данных временных рядов.

Показано, что двойная архитектура RC по сравнению с одинарной архитектурой RC не показывает существенного повышения качества предсказания сигнала. Выдвигается предположение, что это связано с тем, что при использовании одного резервуара входной сигнал (сигнал из региона СА3) и выходной предсказанный сигнал (сигнал из региона СА1) значительно похожи друг на друга. В связи с этим резервуару проще воспроизвести такой сигнал после обучения. В случае двух взаимосвязанных резервуаров на вход подается сигнал в виде прямоугольного стимулирующего сигнала, на основе которого необходимо получить биологический сигнал (fEPSP) в области СА3, а затем на его основе получить выходной сигнал в области СА1. В этом случае качество метрик предсказания сигнала снижается, особенно для некоторых амплитуд стимула. Именно биологические сигналы на входе и выходе в резервуар могут способствовать получению наиболее эффективного предсказания такого биологического сигнала.

Конечная цель исследования – разработка гиппокампального нейронного чипа для восстановления когнитивных функций после повреждения гиппокампа. Полученные сигналы, предсказанные архитектурой резервуара, будут использоваться в биологическом эксперименте в реальном времени для проверки концепции замены активности в гиппокампе мышей с использованием технологий искусственного интеллекта. Есть надежда, что разработка подходов к восстановлению нейрональной активности гиппокампа мышей откроет блестящие перспективы в области нейропротезирования.

Получение биологических данных выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-75-10099), проведение численных экспериментов поддержано Министерством образования и науки Российской Федерации, проект FSWR-2024-0005.

[1] В.В. Разин *Актуальные проблемы управления: Сборник научных статей по итогам X Юбилейной Всероссийской научно-практической конференции* (2024) 650-653

[2] В.В. Разин *Тезисы докладов 77-й Всероссийской с международным участием школы-конференции молодых ученых* (2024) 302

[3] В.В. Разин и др. *Математика и ИТ – вместе в цифровое будущее. Сборник трудов Молодежной школы* (2022) 78-86

**Разработка системы для нейромодуляции спинного мозга  
методом временной интерференции**

И.Г. Шалаева<sup>1,\*</sup>, О.В. Горский<sup>2,3,4</sup>, П.Е. Мусиенко<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>*ААНОО ВО «Университет «Сириус», Россия*

<sup>2</sup>*Институт трансляционной биомедицины, СПбГУ, Россия*

<sup>3</sup>*Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Россия*

<sup>4</sup>*«ЛИФТ Центр», Россия*

\*00irinaschalaeva00@gmail.com

Временная интерференция – это метод нейростимуляции, который использует генерируемые поверхностными электродами высокочастотные электрические поля для стимуляции глубоких нейронных структур, не затрагивая поверхностные, нецелевые структуры. Данный метод может иметь клиническое применение в области реабилитации после травм спинного мозга. Он может помочь в восстановлении контроля двигательных и висцеральных функций, что может значительно улучшить качество жизни пациентов.

Ведется разработка системы нейромодуляции спинного мозга методом временной интерференции электрических полей с использованием имплантируемых эпидуральных электродов. На данном этапе разработана программа для моделирования распределения полей в фантоме спинного мозга и изготовлен макет системы глубокой стимуляции спинного мозга. Созданная программа упрощает определение оптимальных параметров управляющих сигналов стимулятора по критериям достижения порога возбуждения в координате целевой области и минимизации паразитной активации прочих зон. Адекватность расчётов была позднее проверена на цилиндрическом фантоме в ходе стендового эксперимента.

Разработана аппаратная часть системы, найдено схемотехническое решение и создана система для тестирования работоспособности прототипа и проверки точности моделирования. Генерация управляющих сигналов и регистрация экспериментальных данных осуществлялась при помощи модуля ввода и вывода аналого-цифровых сигналов E-502 (L-Card), а также разработанных и изготовленных преобразователей сигналов. Один из них представлял собой ключевое звено стимулятора – выходной каскад, преобразующий сигнал перед его подачей на эпидуральные электроды. Он был разработан с учетом ряда ограничений, таких как возможная интерференция сигнала вблизи стимулирующих электродов.

Для тестирования макета и проверки результатов моделирования была изготовлена система позиционирования стимулирующих и регистрирующих электродов на поверхности и в объёме цилиндрического фантома, заполненного физиологическим раствором, с использованием трехмерного манипулятора, позволившая оценить распределение потенциалов в объёме.

Работа выполнена при поддержке проекта NRB-BFT-2406 государственной программы федеральной территории «Сириус».

## Содержание

<b>Секция «Биоподобные электронные наноматериалы»</b> .....	<b>5</b>
Quantum theory of diffusive memristors .....	6
<i>N. Brilliantov, D. Ivanov</i>	
Bioinspired AlFeO <sub>3</sub> memristor with sensing, storage, and synaptic functionalities.....	7
<i>M. Kumar</i>	
Biomemristors based on carbon-based nanomaterials .....	8
<i>L. Wang</i>	
Исследование и моделирование процессов резистивного переключения в оксидных наноразмерных структурах титана.....	9
<i>А.С. Ванькаев, Е.В. Клюкина, С.В. Ковешников</i>	
Пленки стабилизированного диоксида циркония со встроенными наночастицами, сформированными в процессе облучения ионами золота .....	10
<i>М.А. Жбанов, А.В. Круглов, А.Н. Антонов, Ю.А. Дудин, Р.Н. Крюков</i>	
Исследования электрофизических свойств крови для разработки методов диагностики заболеваний.....	11
<i>Е.В. Клюкина, А.С. Ванькаев, С.В. Ковешников</i>	
Определение динамики переходных процессов резистивного переключения в мемристивных структурах на основе оксидов металлов .....	12
<i>Д.С. Мазинг, Е.А. Рындин</i>	
Нейроморфные свойства мемристивных структур на основе HfO <sub>2</sub> /HfO <sub>x</sub> N <sub>y</sub> , сформированных с помощью плазменной иммерсионной ионной имплантации аргона .....	13
<i>О.О. Пермякова, А.Е. Рогожин</i>	
КМОП-совместимые мемристивные структуры для нейроморфных вычислений и резистивной памяти .....	14
<i>Д.А. Серов, А.В. Круглов, М.Н. Коряжкина, М.Е. Шенина, И.Н. Антонов, А.Н. Михайлов, О.Н. Горшков</i>	
<b>Секция «Новая элементная база мозгоподобных информационно-вычислительных систем»</b> .....	<b>15</b>
Inorganic memristive devices-based synaptic mechanisms.....	16
<i>I.M. Kipelkin, S.A. Gerasimova, A.N. Mikhaylov, V.B. Kazantsev</i>	
Исследование основных параметров мемристивных кроссбаров на основе диоксида циркония, стабилизированного иттрием .....	17
<i>Г.Д. Жарков, А.И. Белов, Ю.Г. Слияков, В.И. Лукоянов, Е.Г. Грязнов, В.В. Карзанов, А.Н. Михайлов</i>	
Разработка и исследование прототипа-демонстратора работы нейронных сетей на базе мемристивных устройств .....	18
<i>Л.Я. Королев, С.А. Щаников</i>	
Влияние частоты следования обучающих импульсов на синаптическую пластичность мемристивного устройства на основе ZrO <sub>2</sub> .....	19
<i>М.Н. Коряжкина, А.И. Белов, И.Н. Антонов, А.Н. Михайлов</i>	
Широтно-импульсное управление для воспроизведения STDP в мемристивных устройствах.....	20
<i>М.А. Мищенко, Н.С. Ковалева, А.Н. Михайлов</i>	
Проектирование нейронов с управляемой возбудимостью для механизмов внимания спайковых нейронных сетей .....	21
<i>В.Ю. Островский, Т.И. Каримов, В.Г. Рыбин, Д.Н. Бутусов</i>	

## Table of contents

---

Фотомемристорные сенсоры для широкополосного автономного нейроморфного зрения .....	22
<i>Г.Н. Панин</i>	
Кроссбар матрица мемристоров на основе парилена-MoO <sub>x</sub> для гомогенной резервуарной вычислительной системы.....	23
<i>М.А. Рябова, А.Н. Мацукатова, А.В. Емельянов</i>	
Мемристоры в интегральной микросхеме: исследование поперечного среза.....	24
<i>А.А. Сушков, Д.А. Таран, Д.А. Павлов, И.Н. Антонов, Е.Г. Грязнов, В.И. Лукоянов, А.Н. Михайлов</i>	
Моделирование самосовмещенного селектора для матриц RRAM, необходимых для создания нейроморфных систем.....	25
<i>М.И. Федотов, В.И. Короткицкий, С.В. Ковешников</i>	
Синаптические функции в мемристивных структурах на основе парилена.....	26
<i>Г.А. Юкляевских, Б.С. Швецов, А.В. Емельянов</i>	
<b>Секция «Нейроморфные вычислительные системы».....</b>	<b>27</b>
Energy, demand for computing power and the Green World.....	28
<i>N.A. Sobolev</i>	
Перевод формальной нейронной сети в спайковую и её инференс на мемристорах.....	29
<i>А.М. Антонов, С.А. Щаников</i>	
Решение задачи коммивояжера спайковой нейронной сетью.....	30
<i>Н. И. Базенков, К.А. Завьялов</i>	
Дискретная рекурсивная модель нейрона .....	31
<i>Д.И. Большаков, М.А. Мищенко, Д.В. Чиндарев, В.В. Матросов</i>	
Применение методологии имитационного моделирования для оценки точности работы искусственных нейронных сетей на базе мемристивных устройств.....	32
<i>И.А. Борданов, С.А. Щаников</i>	
AgNI-X – новый подход к конфигурированию и эмуляции импульсных нейронных сетей .....	33
<i>М.В. Киселев</i>	
Емкость гибкой модели рабочей памяти с учетом двух типов пластичности.....	34
<i>Н.С. Ковалева, В.В. Матросов, М.А. Мищенко</i>	
Исследование динамики астроцита системы Уллаха-Юнга.....	35
<i>Л.П. Никифорова, С.Ю. Маковкин</i>	
Разработка программы для имитационного моделирования процесса распределенной обработки информации в нейронных сетях на базе мемристивных кроссбар массивов.....	36
<i>Д.А. Никишиов, С.А. Щаников</i>	
Супер экстремальные события и хаос в малом ансамбле элементов ФитцХью-Нагумо с химическими и мемристивными связями.....	37
<i>С.М. Оленин, А.Г. Коротков, И.М. Кипелкин, С.А.Герасимова, Т.А. Леванова, А.Н. Писарчик</i>	
Экстремальные события в ансамбле двух нейронов Рутькова с химическими и мемристорными связями .....	38
<i>С.М. Оленин, Т.А. Леванова, А.Н. Писарчик</i>	
Мультикомпарментальный нейрон как перспективный элемент резервуарных вычислений.....	39
<i>В.А. Пчелко, О.В. Васильченко, Г.Ю. Колев, М.А. Гальченко, И.А. Бабкин, Т.И. Каримов</i>	
Архитектуры КМОП- и мемристорных нейроморфных процессоров .....	40
<i>О.А. Тельминов</i>	
Влияние астроцитов на кратковременную память в биофизических моделях нейрон-астроцитарных сетей мозга.....	41
<i>Ю.А. Цыбина, С.Ю. Гордлеева, В.Б. Казанцев</i>	

---

<b>Секция «Нейротехнологии и биоморфная робототехника» .....</b>	<b>42</b>
Phase-trajectory analysis self-organized of the spinal CPG .....	43
<i>A.Y. Fedorova, I.M. Kipelkin, M.O. Talanov</i>	
Analysis and prediction of local field potentials for activity recovery in rodent hippocampal slices using a recurrent GRU network.....	44
<i>V.V. Razin, M.I. Samburova, N.V. Gromov, A.V. Naumov, S.V. Gerasimova, T.A. Levanova, A.V. Lebedeva, L.A. Smirnov</i>	
Q-анализ как эффективный подход для выявления взаимодействий высокого порядка в функциональных сетях головного мозга: примеры применения .....	45
<i>С.А. Куркин, Н.С. Смирнов, Р. Паунова, Д. Стоянов, А.Е. Храмов</i>	
Нейротехнологии в образовании: как улучшить обучение .....	46
<i>М.С. Литвинова</i>	
Исследование эффективности адаптивной нейронной сети с функцией обратной связи для восстановления нарушенной электрической активности в гиппокампе .....	47
<i>М.В. Матвеева, М.А. Мищенко, А.А. Федулина, А.Н. Михайлов, В.Б. Казанцев</i>	
Стимуляция нейрональной активности в срезе гиппокампа мыши для восстановления активности в гиппокампе с помощью сигнала, предсказанного LSTM48	
<i>A.V. Naumov, I.M. Kipelkin, M.I. Самбунова, В.В. Разин, Н.В. Громов, М.И. Яшанова, С.А. Герасимова, Т.А. Леванова, Л.А. Смирнов, А.В. Лебедева, А.Н. Писарчик</i>	
Оценка влияния эпилептиформной нейрональной активности в срезах гиппокампа мышей на функциональные свойства мемристора.....	49
<i>Д.Д. Пахомова, М.Н. Коряжкина, Е.Д. Будылина, А.А. Иванов, А.В. Лебедева, И.Н. Антонов, В.В. Разин, А.И. Белов, А.Н. Михайлов, А.А. Конаков</i>	
Прогнозирование fEPSP гиппокампа грызунов посредством использования двух взаимосвязанных резервуаров .....	50
<i>В.В. Разин, М.И. Самбунова, Н.В. Громов, А.В. Наумов, С.В. Герасимова, Т.А. Леванова, А.В. Лебедева, Л.А. Смирнов</i>	
Разработка системы для нейромодуляции спинного мозга методом временной интерференции .....	51
<i>И.Г. Шалаева, О.В. Горский, П.Е. Мусиенко</i>	
<b>Содержание .....</b>	<b>52</b>

Труды первой школы-конференции с международным участием  
«НЕЙРОЭЛЕКТРОНИКА И НЕЙРОТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО»  
Нижний Новгород, 25-29 ноября 2024 г.

Proceedings of the first school-conference with international participation  
«NEUROELECTRONICS AND NEUROTECHNOLOGIES OF THE FUTURE»  
Nizhny Novgorod, November 25-29, 2024

---