

Астапова Марина Алексеевна – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: astapova.m@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79675329363; младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем.

Astapova Marina Alekseevna – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: astapova.m@iias.spb.su; St. Petersburg, Russia; phone: +79675329363; junior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems.

УДК 621.385.21

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-30-40

И.Л. Житяев, М.С. Картель, Ю.Ю. Житяева, А.А. Авакян, В.А. Смирнов

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕМРИСТИВНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР
С ПРОФИЛИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОДОМ ДЛЯ НЕЙРОМОРФНОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ**

Представлены результаты разработки наноразмерных мемристорных структур, применение которых является перспективным для аппаратной реализации систем искусственного интеллекта. Предложена конструкция мемристорной ячейки на основе пленки оксида титана толщиной от 3 до 50 нм, верхний электрод которой представлял профилированную структуру в виде двух высокоаспектных острых наноразмерных структур (ВОНС), у которой одно из острий было с радиусом 10 нм, а радиус острия второй варьировался в диапазоне от 10 до 50 нм. В качестве материала для верхнего электрода была выбрана платина из-за ее уникальных физико-химических свойств, в том числе высокой химической инертности в широком диапазоне температур и агрессивных сред, низкого удельного электрического сопротивления и устойчивости к окислению. Эти характеристики делают платину оптимальным материалом для использования в электронных устройствах и сенсорных системах, где требуется долговременная стабильность и минимальные потери энергии при передаче сигнала. Представлены результаты моделирования распределения напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке мемристорной ячейки. Моделирование проводилось с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics, в которой решаются системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов, при разности потенциалов между электродами 5 В. На основе результатов моделирования получены и проанализированы зависимости величины напряженности электрического поля от геометрических параметров мемристорной ячейки. Выявлено локальное усиление напряженности электрического поля по периметру интерфейса оксида с ВОНС. Усиление неоднородности напряженности электрического поля возрастает с увеличением толщины оксидной пленки и может достигать 13,4%. Полученные результаты могут быть использованы при разработке нейроморфной электронной компонентной базы робототехнических систем и систем искусственного интеллекта на основе мемристоров.

Мемристор; нейроэлектроника; нейроморфные системы; резистивное переключение; наноразмерные оксидные пленки; напряженность электрического поля.

I.L. Jityaev, M.S. Kartel, Yu.Yu. Jityaeva, A.A. Avakyan, V.A. Smirnov

**INVESTIGATION OF MEMRISTIVE NANOSCALE STRUCTURES WITH
PROFILED INTERFACE FOR NEUROMORPHIC ELECTRONICS**

The article presents the results of the development of nanoscale memristive structures, the application of which is promising for the hardware implementation of artificial intelligence systems. A design of a memristive cell based on a titanium oxide film with a thickness ranging from 3 to 50 nm is proposed. The upper electrode of the cell features a profiled structure in the form of two high-aspect-ratio nanoscale tip structures (HANTS), where one tip has a radius of 10 nm, and the radius of the second tip varies in the range of 10 to 50 nm. Platinum was chosen as the material for the upper electrode due to its unique physicochemical properties, including high chemical inertness across a wide range of temperatures and aggressive environments, low electrical resistivity, and resistance to oxidation. These characteristics make platinum an optimal material for use in electronic devices and sensor systems where long-term stability and minimal energy losses during signal transmission are required. The results of modeling the electric field strength distribution in the interelectrode gap of the memristive cell are presented. The modeling was

performed using COMSOL Multiphysics software, which solves systems of nonlinear partial differential equations using the finite element method, with a potential difference of 5 V between the electrodes. Based on the modeling results, the dependencies of the electric field strength on the geometric parameters of the memristive cell were obtained and analyzed. Local enhancement of the electric field strength was identified along the perimeter of the oxide-HANTS interface. The increase in the non-uniformity of the electric field strength grows with the thickness of the oxide film and can reach 13.4%. The obtained results can be used in the development of neuromorphic electronic components for robotic systems and artificial intelligence systems based on memristors.

Memristor; neuroelectronics; neuromorphic systems; resistive switching; nanoscale oxide films; electric field strength.

Введение. Человечество достигло значительного прогресса в разработке и совершенствовании технологий искусственного интеллекта (ИИ), что привело к их активному внедрению во многие сферы человеческой деятельности, включая медицину, промышленное производство, транспортные системы, образовательные процессы и другие сферы [1–3]. Однако в последние годы темпы прогресса в развитии ИИ снижаются, что обусловлено принципиальными ограничениями, вызванными аппаратными возможностями современных вычислительных систем. Ключевой проблемой является архитектура компьютеров, основанная на принципах, предложенных Джоном фон Нейманом в середине XX века. Архитектура фон Неймана предполагает разделение вычислительной системы на два основных компонента: блок памяти и вычислительный блок, которые физически и функционально изолированы. Такая организация приводит к возникновению так называемого «бутылочного горлышка фон Неймана», которое проявляется в виде задержек при передаче данных между памятью и процессором. Хотя увеличение объема оперативной памяти и повышение производительности процессоров может частично компенсировать эти задержки, такие меры сопровождаются экспоненциальным ростом энергопотребления, что делает их экономически и экологически невыгодными в долгосрочной перспективе.

Для преодоления этих ограничений и обеспечения дальнейшего прогресса в области искусственного интеллекта необходим переход к принципиально новым архитектурным решениям, которые позволят исключить зависимость от традиционной модели фон Неймана [4]. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка нейроморфных вычислений на основе использования мемристоров [5, 6]. Мемристор – это биполярный элемент, способный изменять свое сопротивление под воздействием внешнего электрического поля, сохраняя свое состояние даже после отключения питания [7, 8]. Это свойство, известное как резистивная пластичность, делает мемристоры перспективными кандидатами для создания энергоэффективных запоминающих устройств и вычислительных систем следующего поколения.

Помимо применения в качестве энергоэффективных запоминающих устройств, мемристоры активно используются в нейроморфных технологиях, направленных на создание вычислительных систем, имитирующих работу биологических нейронных сетей [9–11]. Это связано с тем, что резистивное переключение мемристоров демонстрирует сходство с поведением синапсов – связей между нейронами в мозге. Благодаря этому свойству мемристоры могут быть использованы для создания искусственных синапсов, что открывает перспективы для разработки нейроморфных чипов, способных к обучению и адаптации, подобно биологическим системам.

Нейроморфные системы, построенные на мемристорах, имитируют принципы работы биологических нейронных сетей, что позволяет существенно повысить эффективность обработки данных и снизить энергопотребление. Такие системы способны выполнять сложные вычисления параллельно, что особенно важно для задач, связанных с машинным обучением и обработкой больших объемов информации.

Мемристоры обладают потенциалом для создания компактных и высокопроизводительных устройств. Это открывает новые горизонты для развития технологий ИИ и робототехники, где они могут быть интегрированы в системы, имитирующие работу органов чувств человека. Например, мемристорные технологии позволяют создавать устройства,

воспроизводящие функции тактильных рецепторов, терморецепторов и ноцицепторов (болевых рецепторов) [12, 13]. Это дает возможность роботам "чувствовать" механические воздействия, изменения температуры и даже болевые стимулы, что способствует повышению их автономности и безопасности в различных условиях эксплуатации.

Конструкция и моделирование. Мемристор представляет собой многослойную структуру, состоящую из трех основных компонентов: верхнего и нижнего электродов, между которыми расположен активный слой. Материалы, используемые в активном слое (например, оксиды металлов), играют ключевую роль в определении функциональных характеристик устройства, включая его способность переключаться между состояниями с высоким и низким сопротивлением [14–16]. Это переключение осуществляется за счет изменения проводимости активного слоя под воздействием приложенного электрического напряжения, что позволяет мемристорам выполнять функции как хранения, так и обработки информации в единой физической структуре. Такая интеграция устраняет необходимость разделения блоков памяти и вычислений, что является одним из ключевых преимуществ мемристоров перед традиционными архитектурами фон Неймана.

Моделирование мемристорных структур является важным инструментом для изучения их физических свойств, оптимизации параметров и проектирования устройств на их основе [17–19]. Оно включает анализ процессов, происходящих в активном слое, таких как миграция ионов, образование и разрушение наноразмерных каналов проводимости, а также изменение электронной структуры материалов [20, 21]. Моделирование позволяет исследовать влияние различных материалов активного слоя и геометрии электродов на ключевые характеристики мемристоров, включая скорость переключения, энергопотребление и долговечность, а также определять оптимальные параметры для их создания.

В данной работе рассматривается модель мемристорной структуры, состоящей из слоя диоксида титана (TiO_2), сформированного на титановой подложке с профилированным платиновым верхним электродом в виде высокоаспектной осривной наноразмерной структуры (ВОНС) (рис. 1). Одной из ключевых задач мемристоров является воспроизведение синаптических функций, что обеспечивается резистивным переключением, характерным для TiO_2 . Диоксид титана зарекомендовал себя, как перспективный материал для реализации таких функций благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам. Резистивное переключение в TiO_2 связано с изменением его проводимости под воздействием внешнего электрического поля, что обусловлено сложными процессами, происходящими в активном слое материала [22–24].

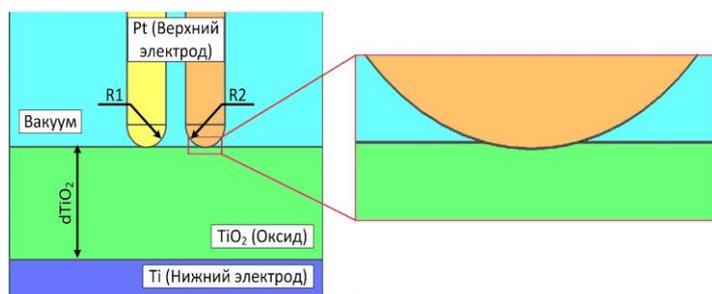


Рис. 1. Общий вид модели мемристорной ячейки с увеличенной областью зоны контакта профилированного верхнего контакта с оксидным слоем

Одним из основных механизмов резистивного переключения в TiO_2 является образование и разрушение наноразмерных каналов проводимости, состоящих из кислородных вакансий. Под воздействием высокой напряженности электрического поля происходит миграция ионов кислорода, что приводит к формированию каналов проводимости, увеличивающих проводимость материала. При изменении направления или величины электрического поля эти каналы могут разрушаться, возвращая материал в состояние с высоким сопротивлением. Кроме того, Джоулев нагрев, возникающий при высокой напря-

женности поля, способствует активации ионов кислорода и их миграции, что усиливает процессы образования и разрушения проводящих каналов, а также влияет на устойчивость переключения. Эти механизмы делают TiO_2 перспективным материалом для создания мемристоров с высокой надежностью и производительностью.

Для инициирования резистивного переключения в диоксиде титана необходимо достижение определенной пороговой напряженности электрического поля, которая зависит от таких параметров, как толщина активного слоя и геометрия электродов [25–27]. При превышении пороговой напряженности поля начинается процесс формирования каналов проводимости, что сопровождается резким снижением сопротивления активного слоя. Однако чрезмерно высокая напряженность поля может привести к неконтролируемому формированию множественных нитей, что негативно сказывается на стабильности и долговечности устройства. Кроме того, высокие напряженности поля могут вызывать деградацию материала, например, из-за электромиграции ионов или локального перегрева, что приводит к необратимым изменениям структуры активного слоя. Таким образом, при проектировании наноразмерных мемристорных структур критически важно понимать характер распределения электрического поля в активном слое и контролировать его напряженность для обеспечения стабильной работы устройства.

Важным аспектом при проектировании мемристоров является выбор материалов для электродов, поскольку их свойства оказывают влияние на характеристики прибора [28, 29]. В данном исследовании в качестве материала для верхнего электрода была выбрана платина (Pt) из-за ее высокой химической стабильности, низкого удельного сопротивления и устойчивости к окислению даже в агрессивных средах [30]. На верхний электрод подавалось напряжение до 5 В, а нижний титановый электрод был заземлен. Для минимизации влияния внешних факторов, таких как окисление поверхности или адсорбция молекул из окружающей среды, вся конструкция была помещена в вакуумную среду. При моделировании учитывалось, что верхний электрод локально погружен в активный слой на небольшую глубину, как показано на рис. 1. Одина из ВОНС имела фиксированный радиус острия (10 нм), а радиус острия второй ВОНС изменялся от 10 нм до 50 нм. Толщина оксидного слоя (TiO_2) при моделировании изменялась от 3 нм до 50 нм.

Основной целью работы является исследование влияния радиуса ВОНС и толщины оксидного слоя на распределение электрического поля в активном слое. Изменение радиуса кривизны ВОНС и толщины оксидного слоя может существенно влиять на локальную концентрацию поля. Распределение напряженности электрического поля в активном слое TiO_2 является ключевым фактором, определяющим эффективность и надежность мемристора.

Результаты и обсуждение. На основе результатов численного моделирования наноразмерной мемристорной ячейки были получены пространственные распределения напряженности электрического поля в межэлектродном зазоре (рис. 2). Анализ полученных данных выявил, что максимальные значения напряженности электрического поля сосредоточены в области интерфейса верхнего электрода, а именно вблизи периметра зоны контакта ВОНС с оксидной пленкой. Локализация напряженности поля обусловлена геометрическими особенностями конструкции, в том числе радиусом ВОНС и толщиной активного слоя, а также свойствами материалов, используемых в конструкции. Такое распределение напряженности поля необходимо для понимания механизмов резистивного переключения, поскольку именно в областях с высокой напряженностью поля начинаются процессы образования ионов и последующей их миграции с формированием наноразмерных каналов проводимости.

Наблюдаемое увеличение напряженности поля в приконтактной области связано с эффектом концентрации электрического поля, который возникает из-за резкого изменения геометрии на границе контакта ВОНС и оксидного слоя (рис. 3).

Особенно выражено этот эффект проявляется при наноразмерных радиусах ВОНС, где локальная кривизна поверхности способствует усилению поля. Увеличение толщины оксидной пленки приводит к тому, что локальное усиление напряженности электрического поля по периметру контакта ВОНС с оксидом становится неоднородным в пределах каждой ВОНС. Поле усиливается в направлении от соседней ВОНС наружу. Выявлено, что у нижнего интерфейса также появляются локальные участки, где наблюдается усиление напряженности электрического поля. Понимание процессов распределения на-

пряженности электрического поля у нижнего электрода также важно, так как локализованное электрическое поле у нижнего электрода будет влиять на процессы генерации и рекомбинации вакансий, способствующих образованию/разрушению проводящих каналов проводимости.

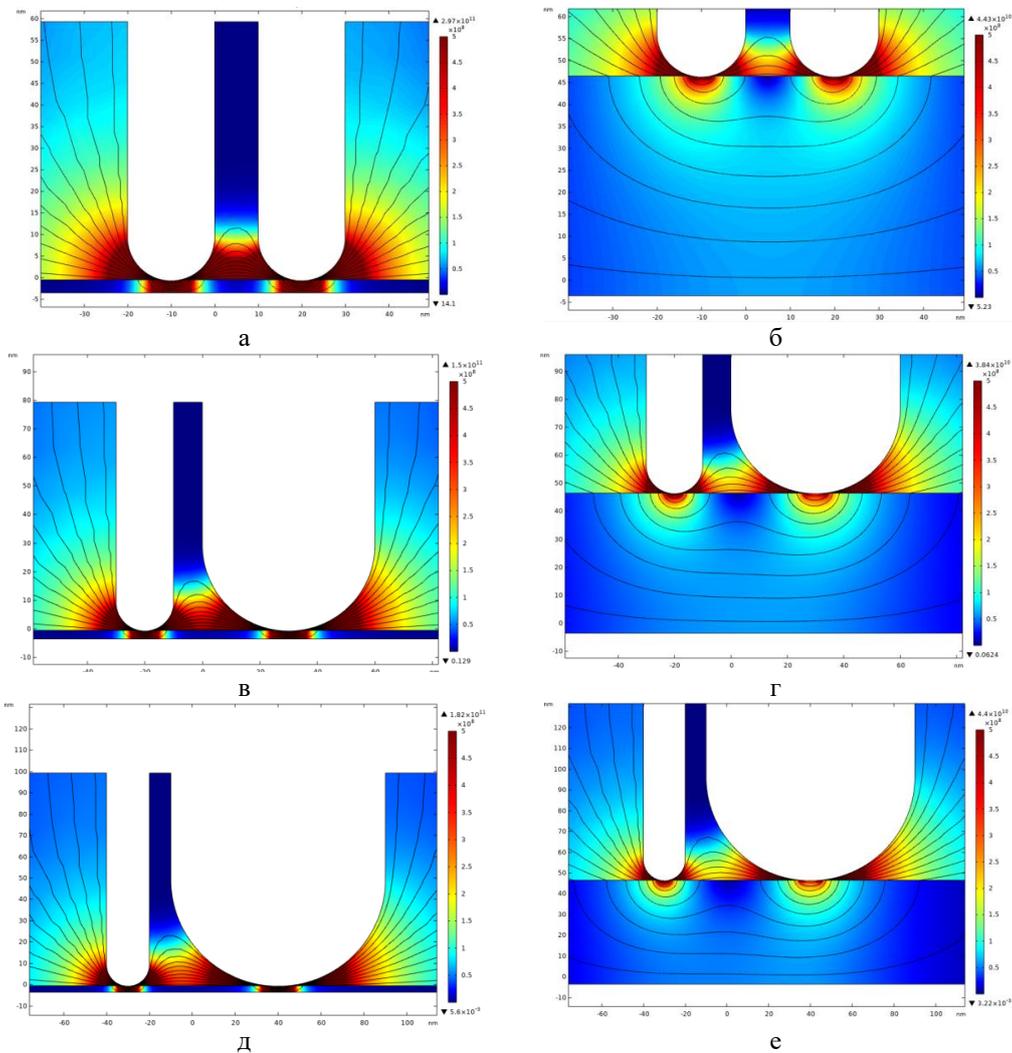


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в мемристорной структуре при различных значениях радиусов ВОНС и толщины оксидного слоя:
 а – $R1 = 10$ нм, $R2 = 10$ нм, $dTiO_2 = 3$ нм; б – $R1 = 10$ нм, $R2 = 10$ нм, $dTiO_2 = 50$ нм;
 в – $R1 = 10$ нм, $R2 = 30$ нм, $dTiO_2 = 3$ нм; г – $R1 = 10$ нм, $R2 = 30$ нм, $dTiO_2 = 50$ нм;
 д – $R1 = 10$ нм, $R2 = 50$ нм, $dTiO_2 = 3$ нм; е – $R1 = 10$ нм, $R2 = 50$ нм, $dTiO_2 = 50$ нм

На основе полученных данных были получены зависимости максимальной напряженности электрического поля, локализованного по периметру контактов ВОНС с оксидом, а также в центральной части этих контактов (рис. 4). Так как поле неоднородно распределяется по периметру контакта ВОНС с оксидной пленкой, то на зависимостях (рис. 4) представлены зависимости для внутренних и внешних участков интерфейса каждой из ВОНС. На рис. 4,г представлена зависимость напряженности электрического поля для центральных точек интерфейсов.

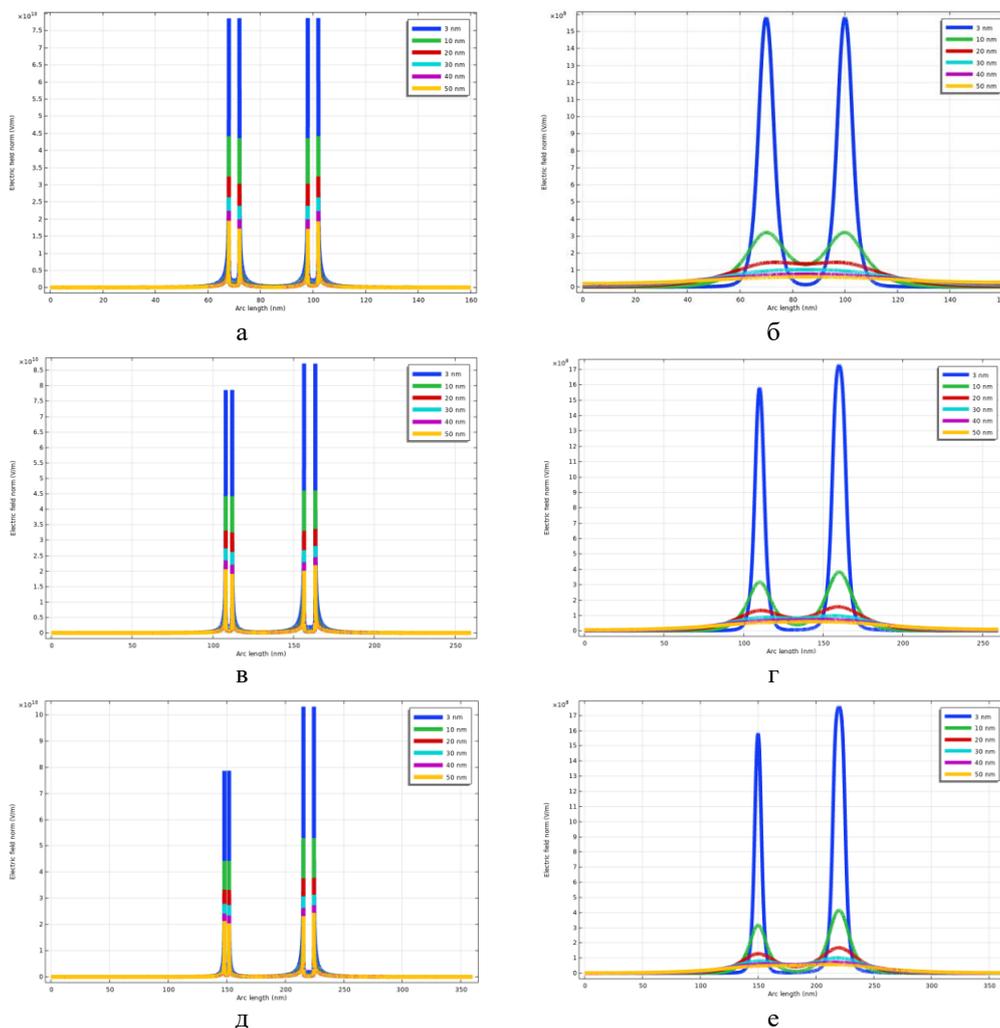


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля вдоль поверхности оксидной пленки мемристорной структуры при различных значениях радиусов ВОНС и толщины оксидного слоя ($dTiO_2 = 3-50$ нм):

- а* – сверху, $R1 = 10$ нм, $R2 = 10$ нм; *б* – снизу, $R1 = 10$ нм, $R2 = 10$ нм;
- в* – сверху, $R1 = 10$ нм, $R2 = 30$ нм; *г* – снизу, $R1 = 10$ нм, $R2 = 30$ нм;
- д* – сверху, $R1 = 10$ нм, $R2 = 50$ нм; *е* – снизу, $R1 = 10$ нм, $R2 = 50$ нм

В результате анализа полученных зависимостей можно сделать вывод от том, что увеличение толщины оксидной пленки приводит к локальным неоднородностям напряженности электрического поля у поверхности профилированного верхнего электрода. Неоднородность наблюдается как при ВОНС разного радиуса, так и при идентичных параметрах ВОНС. Неоднородность поля по периметру интерфейса достигает значений 4,4-13,4%. Уменьшение толщины оксидной пленки с 50 до 3 нм способствует возрастанию максимальной напряженности электрического поля по периметру верхнего интерфейса до 4,56 раз и в центре интерфейса – до 5,4 раз. Разница напряженности электрического поля между ВОНС может достигать 31%.

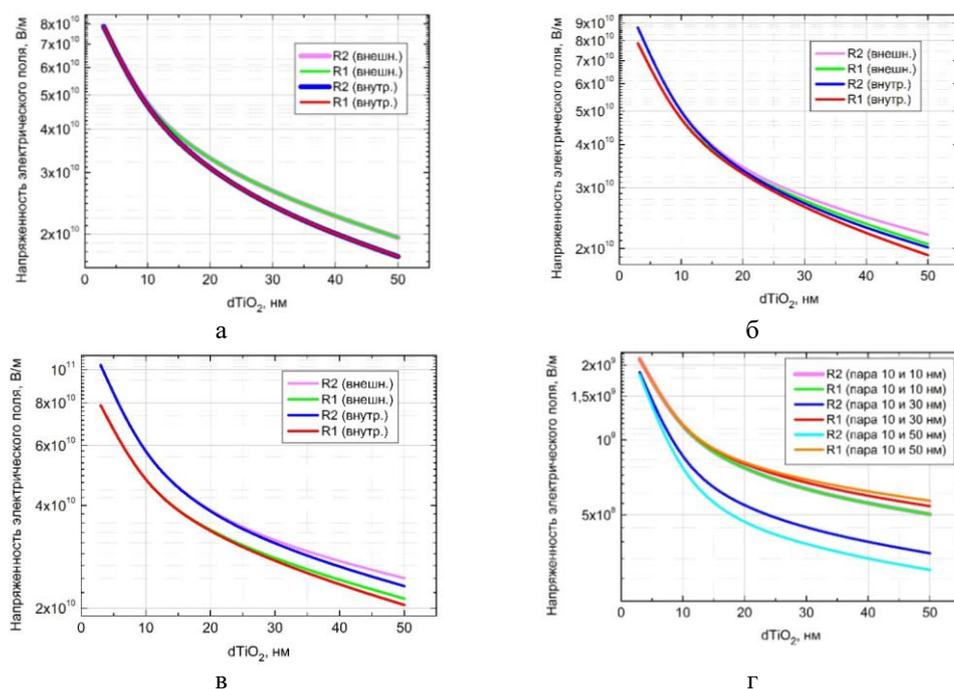


Рис. 4. Зависимости напряженности электрического поля у интерфейса ВОНС/оксид от толщины оксидного слоя ($d\text{TiO}_2 = 3\text{--}50$ нм): а – периметр, $R1 = 10$ нм, $R2 = 10$ нм; б периметр, $R1 = 10$ нм, $R2 = 30$ нм; в – периметр, $R1 = 10$ нм, $R2 = 50$ нм; г – центр, $R1 = 10$ нм, $R2 = 10\text{--}50$ нм

Заключение. В результате исследования показано, что использование профилированных электродов в виде ВОНС с наноразмерным радиусом острия обеспечивает локализацию напряженности электрического поля в заданных областях, что способствует более контролируемому процессу формирования наноразмерных каналов проводимости в мемристорных структурах. Результаты моделирования показали, что уменьшение толщины оксидного слоя приводит к увеличению эффективной напряженности электрического поля, что в свою очередь позволяет снизить приложенное напряжение, необходимое для достижения порогового значения, при котором происходит резистивное переключение. Обеспечение условий для увеличения напряженности электрического поля способствует ускоренной миграции ионов кислорода и процессу формирования проводящих нитей, что приводит к сокращению времени переключения между состояниями с высоким и низким сопротивлением. Это открывает перспективы для создания быстродействующих мемристорных устройств.

Разработка мемристорных структур с профилированными электродами имеет потенциал для повышения производительности, надежности и функциональности устройств, используемых в сенсорике и адаптивных системах управления в робототехнике. Такие структуры позволяют реализовывать более сложные и гибкие схемы обработки информации, что особенно актуально для создания интеллектуальных систем, способных адаптироваться к изменяющимся условиям. Полученные результаты исследований позволяют оптимизировать геометрические параметры наноразмерных мемристоров, включая толщину оксидного слоя и форму профилированных электродов, что является ключевым фактором для повышения их эффективности, стабильности и интеграции в современные электронные системы, энергоэффективные и высокопроизводительные устройства хранения и обработки информации, а также для создания нейроморфных систем, имитирующих принципы работы биологических нейронных сетей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00306, <https://rscf.ru/project/24-79-00306/> в Южном федеральном университете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Haleem A., Javaid M., and Khan I.H.* Current status and applications of Artificial Intelligence (AI) in medical field: An overview // *Current Medicine Research and Practice*. – 2019. – Vol. 9, No. 6. – P. 231-237.
2. *Javaid M., Haleem A., Singh R.P., and Suman R.* Artificial intelligence applications for industry 4.0: A literature-based study // *Journal of Industrial Integration and Management*. – 2022. – Vol. 7, No. 01. – P. 83-111.
3. *Holmes W., and Tuomi I.* State of the art and practice in AI in education // *European journal of education*. – 2022. – Vol. 57, No. 4. – P. 542-570.
4. *Seok H., Lee D., Son S., Choi H., Kim G., and Kim T.* Beyond von Neumann architecture: brain-inspired artificial neuromorphic devices and integrated computing // *Advanced Electronic Materials*. – 2024. – Vol. 10, No. 8. – P. 2300839.
5. *Kumar S., Wang X., Strachan J. P., Yang Y., and Lu W.D.* Dynamical memristors for higher-complexity neuromorphic computing // *Nature Reviews Materials*. – 2022. – Vol. 7, No. 7. – P. 575-591.
6. *Park S. O., Jeong H., Park J., Bae J., and Choi S.* Experimental demonstration of highly reliable dynamic memristor for artificial neuron and neuromorphic computing // *Nature Communications*. – 2022. – Vol. 13, No. 1. – P. 2888.
7. *Chua L.* Resistance switching memories are memristors // *Handbook of memristor networks*. – 2019. – P. 197-230.
8. *Avilov V.I., Ageev O.A., Jityaev I.L., Kolomiitsev A.S., and Smirnov V.A.* Investigation of memristor effect on the titanium nanowires fabricated by focused ion beam // *International Conference on Micro and Nano-Electronics 2016*. – SPIE, 2016. – Vol. 10224. – P. 205-209.
9. *Hong Q., Zhao L., and Wang X.* Novel circuit designs of memristor synapse and neuron // *Neurocomputing*. – 2019. – Vol. 330. – P. 11-16.
10. *Avilov V.I., Tominov R.V., Vakulov Z.E., Zhavoronkov L.G., and Smirnov V.A.* Titanium oxide artificial synaptic device: Nanostructure modeling and synthesis, memristive cross-bar fabrication, and resistive switching investigation // *Nano Research*. – 2023. – Vol. 16. – P. 10222-10233.
11. *Avilov V.I., Tominov R.V., Vakulov Z.E., Rodriguez D.J., Polupanov N.V., and Smirnov V.A.* Nanoscale titanium oxide memristive structures for neuromorphic applications: atomic force anodization techniques, modeling, chemical composition, and resistive switching properties // *Nanomaterials*. – 2025. – Vol. 15 (1). – P. 75.
12. *Yang C., Wang H., Cao Z., Chen X., Zhou G., Zhao H., Wu Zh., Zhao Y., and Sun B.* Memristor-based bionic tactile devices: Opening the door for next-generation artificial intelligence // *Small*. – 2024. – Vol. 20, No. 19. – P. 2308918.
13. *Du S., Song Y., Yuan J., Hao R., Wu L., Lei S., and Hu W.* An artificial universal tactile nociceptor based on 2D polymer film memristor arrays with tunable resistance switching behaviors // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2024. – Vol. 16, No. 26. – P. 33907-33916.
14. *Mikhaylov A., Belov A., Korolev D., Antonov I., Kotomina V., Kotina A., Gryaznov E., Sharapov A., Koryazhkina M., Kryukov R., Zubkov S., Sushkov A., Pavlov D., Tikhov S., Morozov O., and Tetelbaum D.* Multilayer metal-oxide memristive device with stabilized resistive switching // *Advanced materials technologies*. – 2020. – Vol. 5, No. 1. – P. 1900607.
15. *Brivio S., Spiga S., and Ielmini D.* HfO₂-based resistive switching memory devices for neuromorphic computing // *Neuromorphic Computing and Engineering*. – 2022. – Vol. 2, No. 4. – P. 042001.
16. *Saenko A.V., Tominov R.V., Jityaev I.L., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Polupanov N.V., and Smirnov V.A.* Transparent zinc oxide memristor structures: Magnetron sputtering of thin films, resistive switching investigation, and crossbar array fabrication // *Nanomaterials*. – 2024. – Vol. 14, No. 23. – P. 1901.
17. *Abunahla H., Mohammad B., Homouz D., and Okelly C.J.* Modeling valance change memristor device: Oxide thickness, material type, and temperature effects // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. – 2016. – Vol. 63, No. 12. – P. 2139-2148.
18. *Ouaja Rzig F., Mbarek K., Ghedira S., and Besbes K.* The basic I–V characteristics of memristor model: simulation and analysis // *Applied Physics A*. – 2017. – Vol. 123. – P. 1-8.
19. *Singh J., and Raj B.* Comparative analysis of memristor models and memories design // *Journal of Semiconductors*. – 2018. – Vol. 39, No. 7. – P. 074006.
20. *Yang J.J., Miao F., Pickett M.D., Ohlberg D.A., Stewart D.R., Lau C.N., and Williams R.S.* The mechanism of electroforming of metal oxide memristive switches // *Nanotechnology*. – 2009. – Vol. 20, No. 21. – P. 215201.
21. *Miao F., Strachan J.P., Yang J., Zhang M.X., Goldfarb I., Torrezan A.C., Eschbach P., Kelley R.D., Medeiros-Ribeiro G. and Williams R.S.* Anatomy of a nanoscale conduction channel reveals the mechanism of a high-performance memristor // *Advanced Materials*. – 2011. – Vol. 23, No. 47. – P. 5633-5640.
22. *Gale E.* TiO₂-based memristors and ReRAM: materials, mechanisms and models (a review) // *Semiconductor Science and Technology*. – 2014. – Vol. 29, No. 10. – P. 104004.
23. *Gul F.* Nano-scale single layer TiO₂-based artificial synaptic device // *Applied Nanoscience*. – 2020. – Vol. 10, No. 2. – P. 611-616.

24. Jityaev I., Avilov V., Avakyan A., Fedotov A., Prakash C., and Smirnov V. Memristive structures based on TiO₂ nanodots: Simulation, formation and resistive switching // 2023 7th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – IEEE, 2023. – P. 108-111.
25. Светличный А.М., Спиридонов О.Б., Житяев И.Л., Волков Е.Ю., и Демьяненко М.В. Моделирование распределения напряженности электрического поля в наноструктурах с катодом прямоугольного сечения на основе пленок графена на SiC // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 2 (163). – С. 225-236.
26. Bafrani H.A., Ebrahimi M., Shouraki S.B., & Moshfegh A.Z. A facile approach for reducing the working voltage of Au/TiO₂/Au nanostructured memristors by enhancing the local electric field // *Nanotechnology*. – 2017. – Vol. 29, No. 1. – P. 015205.
27. Li C., Xu T., Pan R., Bao S., Yin K., Shen J., Zhu Y., Yatong Zhu, Hou S., and Sun L. Electric field-dependent evolution dynamics of conductive filaments in 2d material-based planar memristors // *ACS nano*. – 2024. – Vol. 18, No. 46. – P. 32196-32204.
28. Ge N., Zhang M.X., Zhang L., Yang J.J., Li Z., and Williams R.S. Electrode-material dependent switching in TaOx memristors // *Semiconductor Science and Technology*. – 2014. – Vol. 29, No. 10. – P. 104003.
29. Khrapovitskaya Y.V., Maslova N. E., Grishchenko Y.V., Demin V.A., and Zhanavskina M.L. The effect of the memristor electrode material on its resistance to degradation under conditions of cyclic switching // *Technical Physics Letters*. – 2014. – Vol. 40. – P. 317-319.
30. Haidry A.A., Ebach-Stahl A., Saruhan B. Effect of Pt/TiO₂ interface on room temperature hydrogen sensing performance of memristor type Pt/TiO₂/Pt structure // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2017. – Vol. 253. – P. 1043-1054.

REFERENCES

1. Haleem A., Javaid M., and Khan I.H. Current status and applications of Artificial Intelligence (AI) in medical field: An overview, *Current Medicine Research and Practice*, 2019, Vol. 9, No. 6, pp. 231-237.
2. Javaid M., Haleem A., Singh R.P., and Suman R. Artificial intelligence applications for industry 4.0: A literature-based study, *Journal of Industrial Integration and Management*, 2022, Vol. 7, No. 01, pp. 83-111.
3. Holmes W., and Tuomi I. State of the art and practice in AI in education, *European journal of education*, 2022, Vol. 57, No. 4, pp. 542-570.
4. Seok H., Lee D., Son S., Choi H., Kim G., and Kim T. Beyond von Neumann architecture: brain-inspired artificial neuromorphic devices and integrated computing, *Advanced Electronic Materials*, 2024, Vol. 10, No. 8, pp. 2300839.
5. Kumar S., Wang X., Strachan J. P., Yang Y., and Lu W.D. Dynamical memristors for higher-complexity neuromorphic computing, *Nature Reviews Materials*, 2022, Vol. 7, No. 7, pp. 575-591.
6. Park S. O., Jeong H., Park J., Bae J., and Choi S. Experimental demonstration of highly reliable dynamic memristor for artificial neuron and neuromorphic computing, *Nature Communications*, 2022, Vol. 13, No. 1, pp. 2888.
7. Chua L. Resistance switching memories are memristors, *Handbook of memristor networks*, 2019, pp. 197-230.
8. Avilov V.I., Ageev O.A., Jityaev I.L., Kolomyitsev A.S., and Smirnov V.A. Investigation of memristor effect on the titanium nanowires fabricated by focused ion beam, *International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016*. SPIE, 2016, Vol. 10224, pp. 205-209.
9. Hong Q., Zhao L., and Wang X. Novel circuit designs of memristor synapse and neuron // *Neurocomputing*. – 2019. – Vol. 330. – P. 11-16.
10. Avilov V.I., Tominov R.V., Vakulov Z.E., Zhavoronkov L.G., and Smirnov V.A. Titanium oxide artificial synaptic device: Nanostructure modeling and synthesis, memristive cross-bar fabrication, and resistive switching investigation, *Nano Research*, 2023, Vol. 16, pp. 10222-10233.
11. Avilov V.I., Tominov R.V., Vakulov Z.E., Rodriguez D.J., Polupanov N.V., and Smirnov V.A. Nanoscale titanium oxide memristive structures for neuromorphic applications: atomic force anodization techniques, modeling, chemical composition, and resistive switching properties, *Nanomaterials*, 2025, Vol. 15 (1), pp. 75.
12. Yang C., Wang H., Cao Z., Chen X., Zhou G., Zhao H., Wu Zh., Zhao Y., and Sun B. Memristor-based bionic tactile devices: Opening the door for next-generation artificial intelligence, *Small*, 2024, Vol. 20, No. 19, pp. 2308918.
13. Du S., Song Y., Yuan J., Hao R., Wu L., Lei S., and Hu W. An artificial universal tactile nociceptor based on 2D polymer film memristor arrays with tunable resistance switching behaviors, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, Vol. 16, No. 26, pp. 33907-33916.
14. Mikhaylov A., Belov A., Korolev D., Antonov I., Kotina A., Gryaznov E., Sharapov A., Koryazhkina M., Kryukov R., Zubkov S., Sushkov A., Pavlov D., Tikhov S., Morozov O., and Tetelbaum D. Multilayer metal-oxide memristive device with stabilized resistive switching, *Advanced materials technologies*, 2020, Vol. 5, No. 1, pp. 1900607.

15. Brivio S., Spiga S., and Ielmini D. HfO₂-based resistive switching memory devices for neuromorphic computing, *Neuromorphic Computing and Engineering*, 2022, Vol. 2, No. 4, pp. 042001.
16. Saenko A.V., Tominov R.V., Jityaev I.L., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Polupanov N.V., and Smirnov V.A. Transparent zinc oxide memristor structures: Magnetron sputtering of thin films, resistive switching investigation, and crossbar array fabrication, *Nanomaterials*, 2024, Vol. 14, No. 23, pp. 1901.
17. Abunahla H., Mohammad B., Homouz D., and Okelly C.J. Modeling valance change memristor device: Oxide thickness, material type, and temperature effects, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2016, Vol. 63, No. 12, pp. 2139-2148.
18. Ouaja Rziga F., Mbarek K., Ghedira S., and Besbes K. The basic I–V characteristics of memristor model: simulation and analysis, *Applied Physics A*, 2017, Vol. 123, pp. 1-8.
19. Singh J., and Raj B. Comparative analysis of memristor models and memories design, *Journal of Semiconductors*, 2018, Vol. 39, No. 7, pp. 074006.
20. Yang J.J., Miao F., Pickett M.D., Ohlberg D.A., Stewart D.R., Lau C.N., and Williams R.S. The mechanism of electroforming of metal oxide memristive switches, *Nanotechnology*, 2009, Vol. 20, No. 21, pp. 215201.
21. Miao F., Strachan J.P., Yang J., Zhang M.X., Goldfarb I., Torrezan A.C., Eschbach P., Kelley R.D., Medeiros-Ribeiro G. and Williams R.S. Anatomy of a nanoscale conduction channel reveals the mechanism of a high-performance memristor, *Advanced Materials*, 2011, Vol. 23, No. 47, pp. 5633-5640.
22. Gale E. TiO₂-based memristors and ReRAM: materials, mechanisms and models (a review), *Semiconductor Science and Technology*, 2014, Vol. 29, No. 10, pp. 104004.
23. Gul F. Nano-scale single layer TiO₂-based artificial synaptic device, *Applied Nanoscience*, 2020, Vol. 10, No. 2, pp. 611-616.
24. Jityaev I., Avilov V., Avakyan A., Fedotov A., Prakash C., and Smirnov V. Memristive structures based on TiO₂ nanodots: Simulation, formation and resistive switching, *2023 7th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA)*. IEEE, 2023, pp. 108-111.
25. Svetlichnyy A.M., Spiridonov O.B., Zhityaev I.L., Volkov E.Yu., i Dem'yanenko M.V. Modelirovanie raspredeleniya napryazhennosti elektricheskogo polya v nanostrukturakh s katodom pryamo-ugol'nogo secheniya na osnove plenok grafena na SiC [Simulation of the electric field distribution in nanostructures with rectangular cross-section field emission cathode based on graphene film on SiC], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 2 (163), pp. 225-236.
26. Bafrani H.A., Ebrahimi M., Shouraki S.B., & Moshfegh A.Z. A facile approach for reducing the working voltage of Au/TiO₂/Au nanostructured memristors by enhancing the local electric field, *Nanotechnology*, 2017, Vol. 29, No. 1, pp. 015205.
27. Li C., Xu T., Pan R., Bao S., Yin K., Shen J., Zhu Y., Yatong Zhu, Hou S., and Sun L. Electric field-dependent evolution dynamics of conductive filaments in 2d material-based planar memristors, *ACS nano*, 2024, Vol. 18, No. 46, pp. 32196-32204.
28. Ge N., Zhang M.X., Zhang L., Yang J.J., Li Z., and Williams R.S. Electrode-material dependent switching in TaOx memristors, *Semiconductor Science and Technology*, 2014, Vol. 29, No. 10, pp. 104003.
29. Khrapovitskaya Y.V., Maslova N. E., Grishchenko Y.V., Demin V.A., and Zhanavskina M.L. The effect of the memristor electrode material on its resistance to degradation under conditions of cyclic switching, *Technical Physics Letters*, 2014, Vol. 40, pp. 317-319.
30. Haidry A.A., Ebach-Stahl A., Saruhan B. Effect of Pt/TiO₂ interface on room temperature hydrogen sensing performance of memristor type Pt/TiO₂/Pt structure, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, Vol. 253, pp. 1043-1054.

Житяев Игорь Леонидович – Южный федеральный университет; e-mail: izhityaev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра радиотехнической электроники и наноэлектроники; к.т.н.; доцент.

Картель Максим Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: mkartel@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; научно-исследовательская лаборатория "Нейроэлектроника и мемристивные наноматериалы"; лаборант-исследователь.

Житяева Юлия Юрьевна – Южный федеральный университет; e-mail: zhityaeva@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; научно-исследовательская лаборатория технологии функциональных наноматериалов; м.н.с.

Авакян Артём Андреевич – Южный федеральный университет; e-mail: artav@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра радиотехнической электроники и наноэлектроники; аспирант.

Смирнов Владимир Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: vasmirmov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра радиотехнической электроники и наноэлектроники; к.т.н.; доцент; зав. кафедрой.

Jityaev Igor Leonidovich – Southern Federal University; e-mail: izhityaev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Radio Engineering Electronics and Nanoelectronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kartel Maksim Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: mkartel@sfedu.ru; Taganrog, Russia; research Laboratory "Neuroelectronics and memristive nanomaterials"; research assistant.

Jityaeva Yulia Yurievna – Southern Federal University; e-mail: zhityaeva@sfedu.ru; Taganrog, Russia; research Laboratory of Functional Nanomaterials Technology; junior researcher.

Avakyan Artem Andreevich – Southern Federal University; e-mail: artav@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Radio Engineering Electronics and Nanoelectronics; postgraduate student.

Smirnov Vladimir Aleksandrovich – Southern Federal University; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Radio Engineering Electronics and Nanoelectronics; cand. of eng. sc.; associate professor; head of department.

УДК 004.81: 004.85, 339.97

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-40-51

З.В. Нагоев, О.З. Загазежева, К.Ч. Бржихатлов, И.А. Мамбетов**РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
СБОРА УРОЖАЯ**

В условиях необходимости обеспечения продовольственной безопасности актуальными становятся задачи оптимизации производственных процессов в аграрном секторе. Например, учитывая нехватку трудовых ресурсов в сельском хозяйстве, требуется разработка и внедрение робототехнических систем для автоматизации процессов ухода за растениями, сбора урожая и его переработки. В статье представлены результаты разработки автономного робота для сбора яблок, созданного на базе универсального антропоморфного робота, разработанного в Кабардино-Балкарском научном центре РАН. Робот оснащен двумя многозвенными манипуляторами, схожими с руками человека, что позволяет ему выполнять сложные задачи по сбору урожая. Для обеспечения интеллектуального управления всей системой используется мультиагентная нейрокognитивная архитектура, которая имитирует работу человеческого мозга и позволяет роботу адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды. Робот оснащен набором сенсоров, включая видеокамеры, ультразвуковые и инфракрасные дальномеры, лидар и энкодеры на приводах манипуляторов. Это позволяет ему точно определять местоположение яблок, оценивать их зрелость и планировать траекторию движения манипуляторов. Особое внимание уделено разработке захвата, который имитирует человеческую кисть и позволяет регулировать силу сжатия, что минимизирует риск повреждения плодов. Для управления роботом используется мультиагентная нейрокognитивная архитектура, которая обеспечивает автономное принятие решений на основе данных с сенсоров. Система способна строить карту местности, определять положение робота и планировать маршрут движения, а также распознавать яблоки и оценивать их состояние. В статье также рассмотрены проблемы, связанные с автоматизацией сбора урожая в сельском хозяйстве, включая нехватку трудовых ресурсов и потери урожая из-за неправильной эксплуатации техники. Авторы подчеркивают, что автоматизация и роботизация процессов уборки урожая имеют большой потенциал, особенно для культур, требующих индивидуального подхода, таких как фрукты и овощи. Представленный робот демонстрирует высокую эффективность в решении этих задач, что подтверждается результатами полевых испытаний. Разработанная система может быть адаптирована для работы с другими культурами, что делает ее универсальным решением для сельскохозяйственной отрасли.

Сельское хозяйство; робототехническая система; мультиагентная нейрокognитивная архитектура; экономическая эффективность; интеллектуальное управление; искусственный интеллект.

Z.V. Nagoev, O.Z. Zagazheva, K.Ch. Brzhihatlov, I.A. Mambetov**DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT ROBOTIC HARVESTING SYSTEM**

In the context of the need to ensure food security, the tasks of optimizing production processes in the agricultural sector are becoming relevant. For example, given the shortage of labor in agriculture, it is necessary to develop and implement robotic systems to automate the processes of plant care, harvesting and processing. The article presents the results of the development of an autonomous robot for picking apples, created on the basis of a universal anthropomorphic robot developed at the Kabardino-Balkarian