

# УПРАВЛЕНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ ИНФОКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.38

## МЕМРИСТОРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА (НУЖНЫ ЛИ НОВЫЕ УЧЕБНИКИ?)

Галочкин В.А.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: galochkin.vladimir@yandex.ru

Рассматриваются актуальные вопросы развития элементной базы электроники и схемотехники в области телекоммуникаций и телевидения. В связи со стремительным развитием нанотехнологий основой при создании перспективной элементной базы телекоммуникационных устройств стали новые материалы, новые устройства и приборы для исследований. Приведены примеры разработки и использования новых элементов (мемристоров, флэшристоров и других устройств) при применении новых принципов построения ячеек памяти, компьютеров с более высоким быстродействием, нейронных сетей нового типа. Рассмотрены модель и особенности функционирования мемристора как ячейки памяти и как логического элемента цифровой схемотехники. Показаны перспективы развития мемристорной электроники. Базовые знания о новых материалах, о новой элементной базе, по мнению автора, должны быть включены в программы по изучению современной электроники и схемотехники.

**Ключевые слова:** телекоммуникации, нанотехнологии, наноэлектроника, схемотехника, мемристоры

### Введение

Современная и перспективная элементная база телекоммуникационных устройств строится на основе новых научных знаний:

- о природе строения материалов;
- о физике твердого тела;
- о квантовой, молекулярной, функциональной, мемристорной, полимерной, диэлектрической, одноэлектронике и др. технологиях.

Эти новые знания привели, соответственно, к появлению нового оборудования и новых инструментов для исследований, новым технологическим решениям, новым методам конструирования и построения базовых устройств электроники [1; 2].

Цель статьи:

- рассмотреть особенности функционирования нового элемента: мемристора как ячейки памяти и как элемента логики цифровой схемотехники;
- показать на примере развития мемристорной электроники, что существующие дисциплины по электронике и схемотехнике для телекоммуникационных специальностей требуют дополнения новыми знаниями.

### Открытие мемристорной электроники

Представив взаимосвязь между током, напряжением и сопротивлением для электрической цепи в виде диаграммы (см. рисунок 1), профессор Леон Чуа из университета Беркли в Калифорнии предположил, что логически «напрашивается» существование еще одной связи между этими элементами – между зарядом  $Q$  и магнитным

потоком  $\Phi$  [3]. По аналогии с известными соотношениями, связывающими заряд, ток, напряжение и магнитный поток (показаны на рисунке 1), Л. Чуа «предположил» взаимосвязь между магнитным потоком и зарядом в виде  $d\Phi = MdQ$ , исходя из аналогии, что изменение по времени  $d\Phi$  – это напряжение, а изменение по времени  $dQ$  – это ток. Тогда из последнего соотношения следует зависимость вида

$$U = MI, \quad (1)$$

где параметр  $M$ , связывающий магнитный поток и заряд, получил условное название «мемристивность», или «мемристор» (см. рисунок 1).

При отсутствии тока величина  $M$  остается константой, зависящей от величины заряда (длительности протекания тока), что наделяет данный параметр свойствами памяти [4].

На чем же основано это свойство запоминания состояния мемристором? Прежде всего это связано с переходом наnanoструктурный уровень

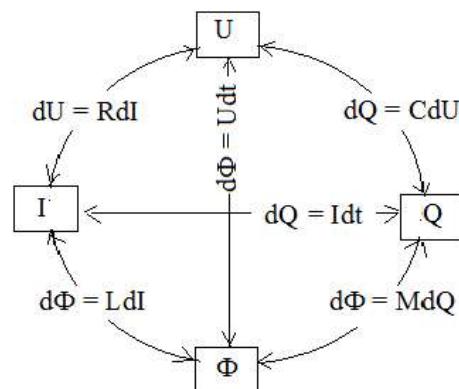


Рисунок 1. Электрические двухполюсники [6]

материалов. В качестве материалов для получения мемристоров чаще всего используют структуры «металл–диэлектрик–металл» (МДМ). Исследования наноразмерных структур на основе диоксида титана [5] показали, что эффект памяти возникает за счет перемещения зарядов (процессов окисления) в сверхтонком диэлектрическом слое при приложении электрического поля. Изменяя величину электрического поля, можно регулировать степень окисления материала, тем самым получая требуемое состояние материала.

В 2008 г. группа исследователей из компании HP во главе со Стэнли Уильямсом создала реальный мемристор [6]. Его свойства соответствовали модели, предложенной Л. Чуа. Мемристор представлял собой тонкий слой полупроводникового материала, размещенный между двумя металлическими контактами (см. рисунок 2). Легирующая примесь (положительные ионы) находится в области  $w$ . Предложена модель, объясняющая процессы в мемристоре, где полное сопротивление рассматриваемого устройства можно представить как сумму сопротивлений двух переменных резисторов, соединенных последовательно (см. рисунок 2).

Легированный участок цепи имеет низкое сопротивление  $R_{on}$ , другой участок – намного более высокое сопротивление  $R_{off}$ . Когда к металлическим контактам прикладывается напряжение, граница между двумя областями смещается.

В рассматриваемой модели зависимость между током и напряжением определяется выражением

$$u(t) = \left( R_{on} \frac{w(t)}{D} + R_{off} \left( 1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right) i(t). \quad (2)$$

При этом граница смещается по закону

$$\frac{dw(t)}{dt} = \mu_v \frac{R_{on}}{D} i(t), \quad (3)$$

где  $\mu_v$  – средняя подвижность ионов.

Интегрирование (3) дает формулу для  $w$ :

$$w(t) = \mu_v \frac{R_{on}}{D} q(t). \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2) и учитывая, что  $R_{on} \ll R_{off}$ , получаем выражение для мемристивности:

$$M(q) = R_{off} \left( 1 - \frac{\mu_v R_{on}}{D^2} \right) q(t). \quad (5)$$

Выражение (2) при этом приобретает вид (1).

Из анализа (5) следует, во-первых, как и предполагалось в модели Чуа, что сопротивление мемристора является функцией заряда  $q$ , то есть зависит от суммарного заряда, прошедшего через мемристор. Во-вторых, что мемристивность резко увеличивается с уменьшением  $D$ . Для любого

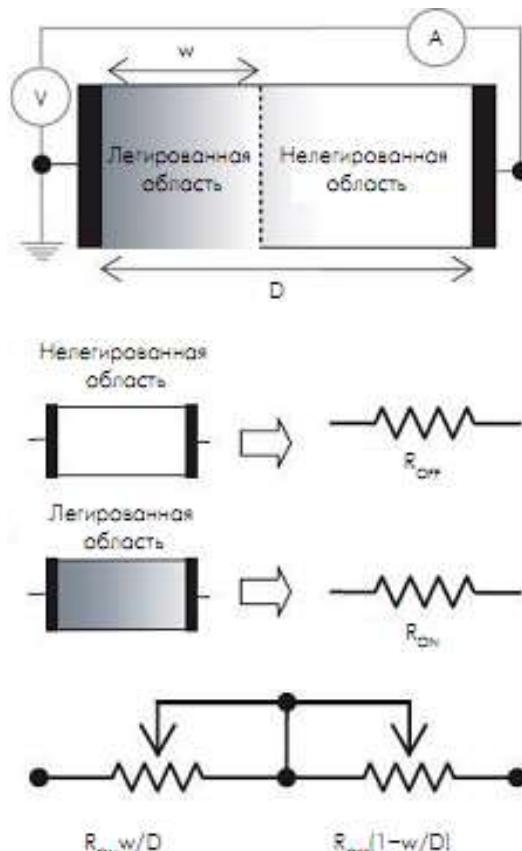


Рисунок 2. Структура и эквивалентная цепь мемристора [6]

материала в наномасштабах значение слагаемого, содержащего  $D$ , на порядки выше, чем в микромасштабах, т. е. переход на наноуровни является определяющим для получения эффекта памяти для мемристора.

Если к мемристору приложено переменное синусоидальное напряжение определенной частоты, его вольт-амперная характеристика принимает вид, напоминающий фигуру Лиссажу с центром в начале координат (см. рисунок 3). Следовательно, мемристор, в отличие от резистора, обладает гистерезисом. С увеличением частоты напряжения гистерезисная кривая вырождается в прямую линию (см. рисунок 3, а).

Если учесть эффекты нелинейности, то на вольт-амперной характеристике мемристора появляются достаточно резкие фронты, соответствующие переходу от состояния с низкой проводимостью к состоянию с высокой проводимостью и обратно (см. рисунок 3, б). Подобное поведение мемристора позволяет использовать его и как элемент памяти, и как логический элемент для цифровой электроники.

Принципиальное отличие мемристора от большинства типов современной полупроводниковой памяти и его главное преимущество перед ними заключаются в том, что он при переходе на

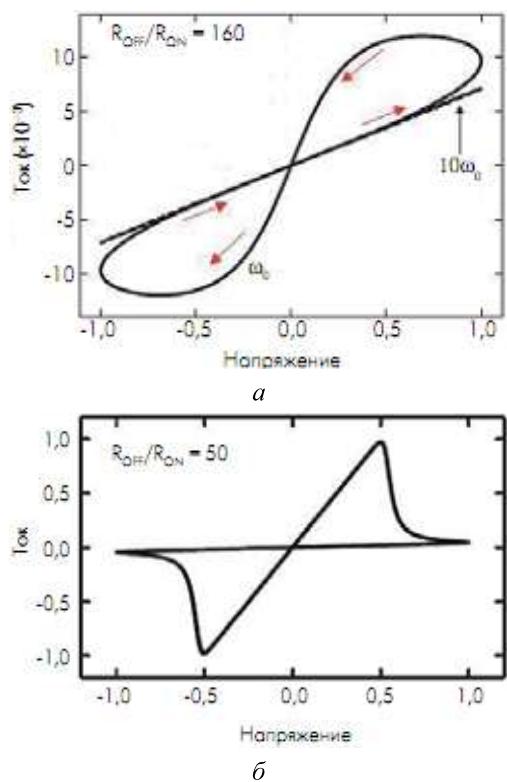


Рисунок 3. Вольт-амперные характеристики мемристора [6]: *а* – при приложении синусоидального напряжения; *б* – при учете эффектов нелинейности

микросхемы нанометровых масштабов полностью энергонезависим. Его состояние в «режиме хранения» не требует источника питания, причем это состояние может быть неограниченно долгим по времени. В настоящее время уже созданы прототипы устройств, которые реализуют такие свойства.

Оригинальная идея Л. Чуа не нашла практического применения «в чистом виде». Многолетним итоговым результатом работы лаборатории компании HP по исследованию эффектов мемристивности было открытие специфической разновидности резистивной памяти RRAM [7]. Эта память по своей сути является аналоговым запоминающим устройством без использования магнитного потока. В комментариях для прессы Л. Чуа назвал новаторскую работу лаборатории HP «сдвигом парадигмы» и не без удовлетворения констатировал: «Что ж, теперь придется вносить изменения во все учебники электротехники» [8].

Значительным достижением компании HP является создание принципиально нового элемента для построения электрических схем. Одним из ведущих разработчиков мемристоров и соавтором научной статьи о них в Nature стал наш соотечественник Д. Струков.

### Развитие мемристорной электроники

Обширные исследования посвящены мемристивным свойствам различных материалов при

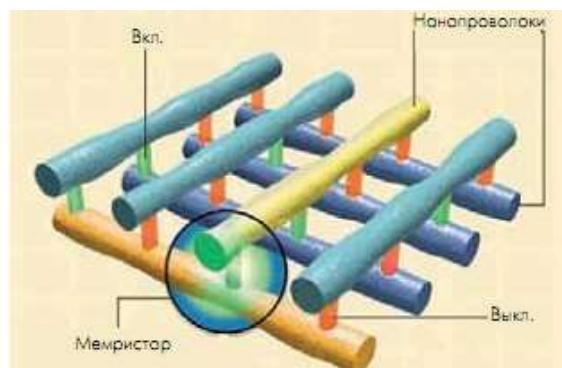


Рисунок 4. Кроссбар с мемристорами [6]

переходе к наноразмерам: полимерные мемристоры; органические (биологические) мемристоры, имитирующие свойства синапсов; слоистые мемристоры на основе гетероструктур; атомристоры, основанные на атомарно тонких материалах (пленках); сегнетоэлектрические мемристоры; мемристоры на углеродных нанотрубках; спиновые мемристоры и другие устройства, обладающие свойствами мемристивности [9]. Однако ограничения объема статьи не позволяют детальное рассмотрение указанных устройств в рамках данной работы. Рассмотрим наиболее важные, на наш взгляд, примеры применения мемристоров.

**Мемристоры в кроссбараах** [6]. Кроссбар – это устройство, содержащее набор взаимно пересекающихся нанопроводников, в зоне пересечения которых проложен материал, меняющий свою проводимость под действием электрического поля (см. рисунок 4).

В качестве прокладок были задействованы различные материалы, однако с появлением мемристоров именно последние стали применять для этой цели. Последующие исследования показали, что мемристоры очень удачно «вписались» в кроссбар-системы.

По мнению исследователей из компании HP, мемристоры наиболее эффективны, когда используется логика, основанная на операции импликации. Здесь необходимо отметить, что импликация совместно с операцией FALSE образует полный логический базис для выполнения двоичных операций в процессорах.

На основе кроссбаров с мемристорами можно построить полноценный процессор, поскольку они обеспечивают высокую плотность размещения логических вентилей и ячеек памяти.

**Мемристор от Тринити-колледжа.** Ученые из данного колледжа создали мемристор, который способен запоминать шесть состояний, и утверждают, что ничто не мешает увеличить количество состояний до десяти или более [10]. Новый мемристор не только проводит ток лишь в одном на-



Рисунок 5. Мемристоры Neuro-Bit [12]

правлении, но и хранит биты иначе. В обычном мемристоре для хранения двух разных уровней сопротивления нужны два разных уровня напряжения. В мемристоре от Тринити-колледжа с очередным повышением уровня (ступенькой) напряжения сохраняется соответствующее новое состояние. Эти мемристоры с множественными состояниями могут оказаться очень полезны в одной из областей ее исследовательских интересов – нетрадиционных логических системах, основанных на нейросетях.

**Память RRAM Crossbar.** Крупнейший китайский контрактный производитель полупроводников (четвертый по величине в мире) – компания Semiconductor Manufacturing International Corporation (SMIC). Она доложила, что прямо сейчас готова выпускать память RRAM в виде встраиваемых в микропроцессоры и однокристальные схемы блоков [11]. Принцип работы памяти RRAM Crossbar отличается от принципа работы памяти HP. Мемристор HP запоминает состояние благодаря насыщению обедненного слоя ячейки атомами кислорода. Ячейка памяти Crossbar работает на принципе обратимого создания в ячейке из аморфного кремния токопроводящих нитей из ионов серебра. Но внешне оба принципа одинаковы: в обоих случаях сопротивление ячейки изменяется и не теряет своих характеристик после снятия питания. Опытные микросхемы RRAM Crossbar были емкостью до 4 Мбит.

**Мемристоры Bio Inspired Technologies.** Принципиально новый пассивный элемент электроники, мемристор, появился в свободной продаже [12]. Его можно купить у компании Bio Inspired Technologies, продаёт мемристоры Neuro-Bit в 16-выводном DIP-корпусе. В одном корпусе находится восемь мемристоров, цена каждого составляет на данный момент \$ 30, то есть все устройство стоит \$ 240 (рисунок 5).

Компания также предоставляет PDF-документацию на свои мемристоры.

**Флэшристор.** Группа исследователей из университета Бингеля (Bingol University) и университета Билкент (Bilkent University), Турция, разработали новый электронный прибор, получивший название флэшристор, который унаследовал все лучшие черты как мемристоров,

так и ячеек флэш-памяти [13]. В отличие от существующих устройств, мемристорный эффект (изменение кристаллической структуры на уровне атомов) в новом устройстве реализован не на локальном уровне, а рассредоточен в более крупной области пространства материала. Структура нового устройства отличается от структуры ячейки флэш-памяти. При соблюдении требований к технологии производства каждый флашристиор сможет находиться в 10 различных состояниях.

## Перспективы мемристорной электроники

В свете изложенного мемристоры применимы:

- для хранения данных;
- для обработки информации, причем и ту и другую функцию может выполнять один и тот же блок памяти;
- в энергоэффективных вычислительных системах с динамической памятью и возможностью сохранения текущего состояния даже после выключения питания;
- в усовершенствованных интегральных микросхемах;
- для повышения производительности вычислительных систем со снижением тепловыделения и многие другие функции.

В 2009 г. Д. Першин, Л. Чуа и др. распространяли понятие мемристивных систем на емкостные и индуктивные элементы, свойства которых зависят от состояния и предыстории системы. В 2013 г. Л. Чуа опубликовал учебник, подчеркивающий широкий спектр сложных явлений и приложений, которые охватывают мемристоры, возможности их использования в качестве энергонезависимых аналоговых устройств и имитаторов классических явлений запоминания и обучения.

Выделим два «глобальных» направления в развитии мемристорной электроники.

**Разработки в области искусственного интеллекта.** При исследовании мемристорных структур Д. Струков обратил внимание на схожесть функционирования мемристоров и синапсов головного мозга. Компания HP разработала на базе мемристоров устройство – действующий аналог элемента мозга, выполняющий логические операции. Ведутся работы по созданию модели, выполняющей вычисления с функциями самообучения [8].

**Создание принципиально новых ЭВМ** с высокой производительностью и минимальным энергопотреблением [14]. В компьютере на базе мемристоров нет какого-то единого центра сбора и обработки информации. В нем параллельно

и независимо друг от друга работают множество модулей. В принципе не нужны отдельные аппаратные компоненты компьютера – процессоры, видеочипы, память и жесткие диски; машина будет архитектурно однородным устройством, где одновременно будут храниться все данные и проводиться все операции с ними. «Загрузка» компьютера также не потребуется – он будет включаться практически мгновенно с момента прерывания работы [8].

### **Заключение**

Стремительное развитие нанотехнологий ведет к тому, что основой для создания элементной базы телекоммуникационных устройств становятся принципиально новые материалы, устройства и приборы. Впервые со времен Фарадея удалось физически воспроизвести принципиально новый элемент электрических цепей, в связи с чем стало актуальным высказывание Л. Чуа о необходимости вносить изменения в учебники электротехники. Сказанное полностью относится к учебникам по телекоммуникационным дисциплинам, которые необходимо, по мнению автора, дополнить новыми знаниями.

### **Литература**

1. Галочкин В.А. Новая электроника и схемотехника для устройств телекоммуникаций и телевещания // Инфокоммуникационные технологии. 2017. Т. 15. № 4. С. 422–427.
2. Галочкин В.А. Наноэлектроника и наносхемотехника телекоммуникационных устройств. Самара: Изд. ПГУТИ, 2019. 346 с.
3. Chua L.O. Memristor – The missing circuit element // IEEE Transactions on Circuit Theory. 1971. Vol. CT-18. № 5. P. 507–519. DOI: 10.1109/TCT.1971.1083337.
4. Щука А.А. Наноэлектроника. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. 342 с.
5. Мемристор. Изготовление структуры и исследование ее свойств. URL: [https://mipt.ru/dpqe/forstudents/materials/f\\_26r1tt/memristor/Memristor\\_Making\\_and\\_research.pdf](https://mipt.ru/dpqe/forstudents/materials/f_26r1tt/memristor/Memristor_Making_and_research.pdf) (дата обращения: 05.07.19).
6. Елисеев Н. Мемристоры и кросбары. Нанотехнологии для процессоров. URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/149> (дата обращения: 05.07.2019).
7. Берд Киви. Пора ли переписывать учебники? URL: <https://3dnews.ru/906763> (дата обращения: 09.07.2019).
8. Нечай О. Мемристор: «недостающий элемент». URL: <https://e-libra.ru/read/437617-komp-yuterrapda-n91-29-01-2011-04-02-2011.html> (дата обращения: 09.07.2019).
9. Мемристор. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Memristor> (дата обращения: 16.07.2019).
10. Хеллеманс А. Мемристор с шестью состояниями и перспективы «странных» вычислений. URL: <https://bitnovosti.com/2015/04/14/six-state-memristor> (дата обращения: 09.07.2019).
11. Китайцы вывели «мемристор» в серийное производство. URL: <http://www.bagnet.org/news/tech/286201> (дата обращения: 09.07.2019).
12. Теперь мемристоры можно купить! URL: <http://digitrode.ru/articles/282-teper-memristory-mozhno-kupit.html> (дата обращения: 09.07.2019).
13. Флэшристоры – устройства, унаследовавшие лучшие черты мемристоров и флэшпамяти. URL: <https://www.dailytechinfo.org/electronics/7132fleshhistory-ustroystva-unasledovavshie-luchshie-cherty-memristorovi-flesh-pamyati.html> (дата обращения: 09.07.2019).
14. Компания HP планирует к концу десятилетия создать первый фотонно-электронный компьютер с мемристорами в качестве базовых элементов. URL: <https://www.dailytechinfo.org/infotech/5986-kompaniya-hp-planiruet-k-koncu-desyatil-tiya-sozdat-pervyy-fotonno-elektronnyy-kompyuter-s-memristo-rami-v-kachestve-bazovyh-elementov.html> (дата обращения: 09.07.2019).

*Получено 12.09.2019*

**Галочкин Владимир Андреевич**, к.т.н., с.н.с., доцент кафедры радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российской Федерации, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 927 209-21-87. E-mail: galochkin.vladimir@yandex.ru

### **MEMRISTOR ELECTRONICS (ARE NEW TEXTBOOKS NEEDED?)**

*Galochkin V.A.*

*Povelzhsky State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation  
E-mail: galochkin.vladimir@yandex.ru*

Some topical issues of developing the elemental base of electronics and circuitry in the field of telecommunications and television are considered. Due to the rapid development of nanotechnology, creating a promising elemental base of telecommunication devices is based on new materials, new devices and instruments for research. Examples of the development and use of new elements (memristors, flashristors and other devices) when applying the new principles for arranging memory cells, computers with higher speed and a new type of neural networks are provided. The model and features of the memristor functioning as a memory cell and as a logical element of digital circuitry are considered. The prospects for the development of memristor electronics are considered. In the author's opinion, the basic knowledge about new materials and a new element base should be included in programs for studying modern electronics and circuitry.

**Keywords:** *telecommunications, nanotechnology, nanoelectronics, circuitry, memristors*

**DOI:** 10.18469/ikt.2019.17.4.13

**Galochkin Vladimir Andreevich**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Associate Professor of the Electronic Systems Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 927 209-21-87. E-mail: galochkin.vladimir@yandex.ru

## References

1. Galochkin V.A. Novaja elektronika i schemotechnika dlja ustroistv telekommunikacii i televeshchanija [New electronics and circuitry for telecommunications and broadcasting devices]. *Infocommunicationne technologii* [Infocommunication Technologies], 2017, vol. 15, no. 4, pp. 422–427. (In Russian).
2. Galochkin V.A. *Nanoelectronica i nano schemotechnika telekommunicacionich ustroistv* [Nanoelectronics and Nanochemotechnics of Telecommunication Devices]. Samara: PGUTI Publ., 2019, 346 p. (In Russian).
3. Chua L.O. Memristor – The missing circuit element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 1971, vol. CT-18, no. 5, pp. 507–519. DOI: 10.1109/TCT.1971.1083337.
4. Shhuka A.A. *Nanoelectronica* [Nanoelectronics]. Moscow: Binom. Laboratoriya znanii Publ., 2012, 342 p. (In Russian).
5. *Memristor. Isgotovlenie strukturi i issledovanie ee svoistv* [Memristor Fabrication of the Structure and Study of its Properties]. Available at: [https://mipt.ru/dpqe/for\\_students/materials/f\\_26r1tt/memristor/Memristor.\\_Making\\_and\\_research.pdf](https://mipt.ru/dpqe/for_students/materials/f_26r1tt/memristor/Memristor._Making_and_research.pdf) (accessed: 05.07.2019).
6. Eliseev N. *Memristori i crossbari. Nanotechnologii dlja processorov* [Memristors and Crossbars. Nanotechnology for Processors]. Available at: <http://www.electronics.ru/journal/article/149> (accessed: 09.07.2019).
7. Civi Berd. *Pora li perepisivat uchebnici?* [Is it Time to Rewrite the Textbooks?]. Available at: <https://3dnews.ru/906763> (accessed: 05.07.2019).
8. Nechai O. *Memristor: Nedostajuchhy Element* [Memristor: «Missing Element»]. Available at: <https://old.computerra.ru/vision/591537> (accessed: 05.07.2019).
9. *Memristor* [Memristor]. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Memristor> (accessed: 05.07.2019).
10. Xellemans A. *Memristor s shestju sostojanijami i perspektivi «strannich» vichislenii* [A Six-State Memristor and Perspectives of «Weird» Computing]. Available at: <https://old.computerra.ru/vision/> (accessed: 09.07.2019).
11. *Citajici viveli memristor v seriinoe proisvodstvo* [The Chinese Brought «Memristor» into Mass Production]. Available at: <http://www.bagnet.org/news/tech/28620.1> (accessed: 09.07.2019).
12. *Teper memristori mozhno kupit!* [Now you Can Buy Memristors!] Available at: <http://digitrode.ru/articles/282-teper-memristory-mozhno-kupit.html> (accessed: 09.07.2019).

- 
13. *Flashristor – ustroystva, unasledovavshie luchshie cherty memristorov i flashpamjati* [Flash Ristor – Devices that Inherit the Best Features of Memristors and Flash Memory]. Available at: <https://www.dailytechinfo.org/electronics/7132fleshhistory-ustroystva-unasledovavshie-luchshie-cher ty-memristorov-i-flesh-pamyati.html> (accessed: 09.07.2019).
  14. *Kompaniya HP planiruet k koncu desyatiliya sozdat pervuy fotonno-elektronnyy kompyuter s memristorami v kachestve bazowych elementov* [By the End of the Decade, HP Plans to Create the First Photon-Electronic Computer with Memristors as Basic Elements]. Available at: <https://www.dailytechinfo.org/infotech/5986-kompaniya-hp-planiruet-k-koncu-desyatiliya-sozdat-pervyy-fotonno-elektronnyy-kompyuter-s-memristorami-v-kachestve-bazovyh-elementov.html> (accessed: 09.07.2019).

*Received 12.09.2019*

## **ПОЗДРАВЛЯЕМ!**

Решением правления Национального общества имитационного моделирования России  
(г. Санкт-Петербург) аспирантке кафедры «Прикладная информатика» ПГУТИ  
**Хаджиевой Светлане Владимировне** (научный руководитель д.т.н., профессор Димов Э.М.)  
присуждена **Молодежная премия имени Н.П. Бусленко**  
с вручением диплома лауреата III степени в номинации «За лучший молодежный доклад»  
на Девятой Всероссийской научно-практической конференции  
«Имитационное моделирование. Теория и практика»» («ИММОД-2019»),  
г. Екатеринбург, октябрь, 2019 г.