

УДК 004.383

## Перспективные технологии автоматизации производственных процессов при переходе к цифровой индустрии с использованием нейрокомпьютеров на базе мемристоров

Щаников С.А., Никитаев А.С., Борданов И.А.

В статье рассмотрена роль информационных технологий при решении задач, вызванных формированием в развитых странах цифровой экономики и индустрии. В настоящее время в связи с увеличением объема обрабатываемой информации имеется потребность в постоянном повышении быстродействия и пропускной способности существующих вычислительных средств. Для широкого круга задач это осуществимо лишь с применением нейрокомпьютеров. Важную роль в создании современных высокопроизводительных нейрокомпьютеров играет поиск новых материалов и технологий их аппаратной реализации. Для этих целей предлагается использование наноразмерных электронных элементов — мемристоров.

*Ключевые слова:* автоматизация производства, цифровая индустрия, нейрокомпьютеры, мемристоров, программируемые логические контроллеры.

### Введение

В июле 2017 года Президент России на заседании Совета по стратегическому развитию и приоритетным проектам обозначил вопрос формирования цифровой экономики и индустрии, как вопрос национальной безопасности и независимости страны. Утвержденная распоряжением Правительства РФ № 1632-р от 28 июля 2017 г., программа «Цифровая экономика Российской Федерации» содержит перечень из 9 сквозных цифровых технологий, подлежащих разработке и внедрению до 2030 года. 6 из них успешно реализуются только с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) и машинного обучения.

В связи с переходом к цифровой экономике и цифровой индустрии во всем мире происходит экспоненциальное увеличение числа источников информации, которую необходимо обрабатывать. Появляется потребность в повышении быстродействия и пропускной способности существующих вычислительных средств, на что разработчики и производители информационных технологий реагируют увеличением количества вычислителей, их большей степенью распараллеливания, применения облачных технологий, но не качественной сменой подхода к реализации самих вычислений.

С одной стороны это оправдано относительной доступностью массово производи-

мых процессоров, графических процессоров, серверов на их основе, программируемых логических интегральных схем и контроллеров. С другой стороны, по мнению ведущих экспертов, такой подход просуществует 5-8 лет, так как он требует непрерывно возрастающих финансовых и энергетических ресурсов. В настоящее время появилась потребность в принципиально новых подходах к организации вычислений, что осуществимо при реализации вычислительных процессов только на нейрокомпьютерах (НК).

В России актуальность проблемы усиливается тем, что миллионы долларов ежегодно тратятся на закупку импортного оборудования, в то время как отечественная микро и наноэлектроника требует развития. Такая ситуация делает нашу страну зависимой от стран экспортеров во всех наукоемких областях и угрожает информационной безопасности. Передовые прикладные (а не общего характера) зарубежные технологии носят коммерческий, стратегический или оборонный характер и в открытом доступе могут появиться только тогда, когда существенно устареют или с преднамеренными искажениями принципиальных положений.

### Обзор и анализ современных технологий

Автоматизация технологических процессов — это совокупность операций, необходимых для пуска, остановки процесса произ-

водства, а также поддержания или изменения в требуемом направлении физических величин без вмешательства человека. Данный подход к производству позволяет увеличить производительность труда, повысить безопасность и качество продукции, а также рационально использовать нужные ресурсы.

В современном мире автоматизация технологического процесса на производстве образует единую систему управления на предприятии, которая носит название автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП). Она включает в себя специально подготовленных людей и оборудование с разработанным программным обеспечением по автоматизации. Эта система контролирует весь процесс управления производством на предприятии.

Автоматизированная система управления технологическим процессом, как правило, имеет трехуровневую систему [1]:

- нижний уровень содержит всевозможные датчики, которые собирают информацию об объекте автоматизации. Данная информация передается на контроллеры.

- средний уровень образуют программируемые логические контроллеры. Их главная функция управлять объектом автоматизации с помощью специально разработанных алгоритмов используя показания различных датчиков и решения, принятые оператором объекта.

- верхний уровень составляет серверное оборудование и пульты управления. Пользователь, который работает на пульте управления называется оператор. Он может вносить изменения в протекание процесса производства. При этом на данном уровне возможно наблюдать за состоянием объекта автоматизации. Также на серверах создаются базы данных со всеми технологическими параметрами и событиями, случившимися во время процесса производства.

Рассмотрим средний уровень. Как говорилось выше главная часть данного уровня – это программируемые логические контроллеры (ПЛК), которые управляют всем оборудованием на предприятии. Их история нача-

лась, когда системы управления, построенные на обыкновенных реле, стали слишком огромными и неподдающимися быстрой диагностике при неисправностях. В это время и появились промышленные контроллеры, которые стали в десятки раз меньше релейных систем и значительно упростили автоматизацию промышленных предприятий. Принцип их работы состоит в сборе и обработке данных, и выдача управляющих воздействий на исполнительные механизмы посредством логических операций. Программирование данных контроллеров осуществляется как на классических алгоритмических языках, так и на языках, оговоренных стандартов МЭК 61131-3 [2,3], основу которого составляют следующие языки программирования:

- SFC – графический язык, алгоритм программы на котором описывается с помощью шага и перехода. Шаг представляет собой операции над переменными, а переход – логические условия. По своему представлению данный язык напоминает обыкновенные блок-схемы алгоритмов.

- LD – графический язык, в основе представления которого лежат релейно-контактные схемы.

- FBD – графический язык, в основе представления которого лежат функциональные схемы электронных устройств.

- ST – язык высокого уровня, который по своему синтаксису напоминает Паскаль.

- IL – язык низкого уровня, имеющий сходство с ассемблером.

В мире существует огромное разнообразие различных производителей контроллеров. Особо выделяется фирма Siemens. Наиболее ее развитая линейка - Simatic S7 содержит следующие семейства S7-200, S7-300, S7-400, S7-1200 и S7-1500. Особо можно выделить S7-1500. Данный контроллер основан на дальнейшем развитии предыдущих контроллеров. Он имеет высокую производительность и минимальное время реакции на внешние события. Модульная конструкция S7-1500 позволяет адаптировать создаваемую систему управления к различным условиям работы [4]. Для программирования

данных контроллеров инженерами Siemens было разработано собственное программное обеспечение - TIA Portal. Оно имеет следующие преимущества [5]:

- Оптимизированный интерфейс для быстрого поиска нужных функций.

- Единый подход к решению различных задач.

- Возможность использования различных библиотек.

- Программируемые логические контроллеры Mitsubishi также получили большое распространение. Они представлены следующими линейками [6]:

- Серия Альфа XL – создание малых и средних автоматизированных систем.

- Серия Melsec FX – создание малых, средних и выше средних автоматизированных систем с общим количеством входов/выходов от 10 до 354.

- Серия Melsec Q - создание сложных автоматизированных систем с общим количеством входов до 8192.

- Серия Melsec L - новая линия контроллеров Mitsubishi, разработанная специально для удовлетворения нужд среднего по масштабам производства. Высокая эффективность данного контроллера достигается за счет объединения всех стандартных функциональных возможностей в модуле центрального процессора [7].

Еще одним представителем зарубежных контроллеров являются программируемые логические контроллеры АВВ. Пятое поколение данных устройств используется для управления роботами. Для управления движениями роботов компания разработала специальные программные продукты TrueMove и QuickMove. Контроллером управляет собственная операционная система реального времени RobotWare [8].

Из отечественных производителей наиболее известны контроллеры ОВЕН. В них используется современная элементная база и закладываются широкие программные возможности. Контроллеры выпускаются четырех серий:

- ПЛК63/ПЛК73 – контроллеры с небольшим экраном для небольших систем автоматизации.

- ПЛК100 / ПЛК150 / ПЛК154 – контроллеры с дискретными входами/выходами, для организации автоматизации малых систем.

- ПЛК110[M02] / ПЛК110 / ПЛК160 - контроллеры с дискретными входами/выходами и аналоговыми входами/выходами, предназначенными для автоматизации систем средней сложности.

- ПЛК304 / ПЛК323 - промышленные коммуникационные контроллеры под управлением ОС Linux. Они отлично подходят для организации взаимодействия между оборудованием, оснащенным различными интерфейсами и протоколами связи [9].

Для программирования данных контроллеров используется среда разработки CoDeSys, созданная немецкой компанией 3S-Software [10].

Еще одним представителем отечественных производителей является компания Segnetics. На данный момент она представляет несколько различных линеек контроллеров. Базовая серия SMH2010 включает в состав панели визуализации, которые подходят для применения в жилищно-коммунальной отрасли. Производство промышленных контроллеров данной компании ориентировано на узкоспециальные задачи [11].

Описанные выше технологии уже устаревают. В современном мире с приходом четвертой промышленной революции особое внимание уделяется нейрокомпьютерным технологиям. Основы данных технологий представляют искусственные нейронные сети (ИНС). Они имеют способность обучаться управлению системами различной сложности. Это позволяет данным технологиям играть важную роль в развитии АСУТП.

ИНС – это модель параллельных и распределенных вычислений, имеющая следующие общие черты с живыми нейронными системами [12]:

- Обработывающий элемент – нейрон.

- Для обработки информации используется значительное число нейронов.
- Все нейроны в системе связаны между собой.
- Связи между нейронами могут изменять свой вес.
- Возможность параллельной обработки информации.

Рассмотрим подробнее нейрон. Он представляет собой вычислительную единицу, которая способна получить информацию, обработать ее простыми алгоритмами и передать дальше. Нейроны делятся на три типа: входной, скрытый и выходной. Связанные между собой они образуют слои с такими же названиями. У каждого нейрона существует два основных параметра: входные данные и выходные данные. Для входных нейронов эти параметры равны. Для остальных входные данные образуются суммарной информацией с предыдущего слоя, а выходные данные образуются с помощью применения функции активации к данной информации. Функция активации позволяет нормализовать входные данные [13].

Связь между нейронами называются синапсом. У них только один параметр – вес. С помощью данного параметра информацию можно изменять при переходе от одного нейрона к другому.

При создании ИНС веса инициализируются некоторыми значениями, поэтому при первом запуске процесса имитационного моделирования ИНС можно увидеть, что полученный результат будет далек от правильного. Поэтому для улучшения результата нейронные сети нуждаются в обучении.

Нейрокомпьютерные технологии проектирования, производства и управления пришли в первую очередь в военную отрасль промышленности, определяющую национальную безопасность России [14].

На основе ИНС создают экспертные системы, которые используя знания, полученные от специалистов определенных областей, решают разнообразные актуальные проблемы, в том числе те, для которых еще не разработаны методы решения [15].

Наибольшее внимание исследователей сейчас привлечено к системам, которые могут решать поставленные задачи в реальном времени. Лидером в использовании данных технологий является компания Gensym из США, разработавшая программный продукт G2. Он позволяет разрабатывать и сопровождать приложения реального времени, использующие базы знаний [16].

Немецкая компания Bosch Rexroth разработала диагностическую систему ODIN Predictive Maintenance. Используя методы машинного обучения, данная система оценивает на основе модели текущее состояние компонентов промышленного оборудования, используя информацию с различных датчиков. При этом выводы делаются уже по результатам начального обучения, в процессе которого устанавливается нормальное состояние оборудования и определяется его уровень надежности [17].

Проблему применения искусственного интеллекта на производстве начала также решать корпорация Renesas Electronics. Она предложила идею «искусственного интеллекта в конечных точках» и начала экспериментировать с ней на собственном полупроводниковом предприятии в Нака. Суть идеи в том, чтобы каждый отдельный механизм управлялся своим контроллером с искусственным интеллектом. Renesas Electronics планирует представить динамически реконфигурируемый процессор, который будет работать совместно с их фирменными микроконтроллерами в качестве ускорителя [18].

Ведущий производитель промышленных контроллеров Siemens решил поставленную проблему по-своему. Для управления плохо формализуемыми или неформализуемыми процессами он предлагает программный пакет NeuroSystem для своих контроллеров, которые уже используют многие предприятия. Данный пакет позволяет синтезировать ИНС для систем нелинейного управления со сложными математическими процедурами, которые не могут быть реализованы традиционными средствами и методами или тре-

буют для их реализации чрезмерных ресурсов [19].

В России же автоматизация производства с участием искусственного интеллекта отстает от передовых зарубежных производителей вычислительных средств. Чтобы сократить отставание, по поручению Президента разрабатывается программа «Цифровая экономика 2024». Отечественным предприятием в первую очередь не хватает своих собственных разработок в данной области, а зарубежные аналоги имеют высокую стоимость и не известные для потребителя возможности для несанкционированного вмешательства.

Основное достоинство интеллектуальных технических средств - это адаптируемость к новой ситуации, путем изменения своих параметров и характеристик, что способствует продлению срока службы промышленного оборудования, повышению эффективности его технического применения и обслуживания, а также повышению качества производимой продукции.

Разработкой в сфере НК в России активно занимается научно-технический центр «Модуль». Данная компания разрабатывает микропроцессоры семейства NeuroMatrix. Они представляют собой высокопроизводительные устройства RISC-архитектуры. Данные микропроцессоры поддерживают матричные и векторные операции над 64-разрядными векторами, в которые упакованы данные. Каждый вектор может состоять из нескольких элементов произвольной разрядности, но суммарная разрядность всех элементов вектора должна составлять 64 разряда [20].

Для промышленного применения компанией «Модуль» был разработан одноплатный компьютер семейства NeuroMatrix. В качестве центрального процессора используется микросхема отечественной разработки K1879XB1Я. Компьютер позволяет выполнять задачи декодирования транспортного и программного потока данных, декодирования видеосигнала, в том числе высокой четкости, по стандартам MPEG4-10/H.264/AVC HP/L4.1, MPEG2 MP/HL, SMPTE 421M/VC-1AP/L3, декодирование аудиосигнала по раз-

личным стандартам, общее управление системой и поддержку пользовательского интерфейса [21].

По официальной информации NeuroMatrix может применяться как базовый элемент для плат нейроускорителей для персональных ЭВМ, при создании НК большой производительности, а также для аппаратной поддержки операций над матрицами большой размерности и в задачах цифровой обработки сигналов [22].

Проект создания отечественного нейроморфного процессора предложен также коллективом ООО «МОТИВ Нейроморфные технологии». Алтай предназначен для аппаратного исполнения импульсных нейронных сетей, он не имеет отечественных аналогов и его характеристики сравнимы с лучшими мировыми образцами [23]. Проект Алтай создан по модели GALS, при которой нейроядра процессора являются синхронными схемами, каждое из которых функционирует в своем домене синхронизации, а все коммутативные блоки являются асинхронными.

По данным разработчиков, ключевыми преимуществами процессора наряду с преимуществами решения задач с применением ИНС, являются высокая эффективность по энергопотреблению, производительности и размерам.

По ряду технических показателей незначительным преимуществом обладают некоторые зарубежные разработки, однако необходимо отметить, что зарубежные производители не приводят сведения о двух важнейших, регламентируемых национальными и межгосударственными стандартами [24-26] показателях - точности (качестве) и надежности функционирования процессоров. Отсутствие сведений о названных показателях затрудняет дать оценку перспективности анализируемых зарубежных разработок для инженерного проектирования НК.

Дальнейший прогресс в области нейровычислений основывается на использовании более эффективных аппаратных средств, чем традиционные микропроцессоры или нейроморфные процессоры. Последние работы показали, что

мемристивные цифро-аналоговые интегральные схемы (ИС) могут значительно поднять уровень производительность НК, оставляя позади свои цифровые аналоги [27-29], что подтверждается результатами исследований и мнениями экспертов в данной области, таких как Харст Саймон и Томас Стерлинг [30,31].

Способность мемристора изменять свое сопротивление в зависимости от протекшего через него заряда позволяет использовать его как естественную физическую модельную замену синаптической связи. Массив искусственных нейронов соединенных между собой мемристорными связями представляет собой максимально приближенную к реальной биологической сети систему. Причина этого заключается в том, что синаптический контакт на основе мемристоров предоставляет естественную возможность описания веса связи дробным числом в отличие от предыдущих бистабильных искусственных синапсов на основе диодов или туннельных контактов. Кроме того, была показана возможность эмуляции на сети с мемристорами характерных для биологических нейронов явлений STDP, LTP и LTD [32-34].

На сегодняшний день создание нейроморфного чипа с полными независимыми связями между искусственными нейронами с возможностью реконфигурируемости является приоритетной задачей, позволяющей выйти на качественно новый уровень решения широкого класса прикладных задач цифровой индустрии при низких временных и энергетических затратах, так как использование современных суперкомпьютеров для этих целей неэффективно [29].

Многие научные коллективы в области микроэлектроники ведут разработки технологии создания мемристоров, а также возможности их интеграции в существующую КМОП-технологии [35-41]. Таким образом, обзор научно-технических источников и собственные исследования авторов [42-44] показали наибольшую перспективность создания НК на базе мемристоров. Технико-экономические преимущества НК на базе

мемристоров определяются сверхвысокой параллельностью структур в связи с переходом на нейросетевой логический базис, резким снижением энергопотребления в связи с переходом на представление информации в виде частоты последовательности узких импульсов, переходом к аналоговой реализации части алгоритмов с повышением быстродействия работы на несколько порядков.

Аналитический обзор научно-технических источников показал, что отставание России наиболее заметно в области технологии проектирования и производства нейроморфных чипов и НК и создании элементной базы для аппаратной реализации разрабатываемых нейросетевых алгоритмов, что еще раз показывает актуальность работ над созданием отечественных НК. Важно отметить, что лаборатории, создающие перспективные типы мемристоров, работают в ряде ведущих научных центров России [45-55]. Авторами [56-58] предложен общий подход к разработке методов определения, исследования и оптимизации показателей качества функционирования ИНС на базе мемристоров как физико-информационных объектов, реализованных аппаратно-программными обучаемыми средствами. Оптимальный анализ и синтез функциональных допусков на значения их параметров в процессе инженерного проектирования необходимо проводить путём имитационного моделирования как физических, так и информационных параметров элементов [59,60].

Опубликованные открытые зарубежные материалы изучаются в научном коллективе и используются в своих работах. Необходимо увеличение материально-технических ресурсов, привлекаемые для решения задач цифровой индустрии и создание НК, как основного средства реализации информационных технологий.

### Заключение

Таким образом, на сегодняшний день автоматизация систем управления технологическими процессами в промышленно развитых странах, переходит на новый качественный

уровень в соответствии с концепцией построения цифровой индустрии. Роль нейрокомпьютерных технологий в данной области непрерывно возрастает. В данном направлении ведутся широкомасштабные работы как зарубежными, так и отечественными научно-производственными организациями, и предприятиями [61].

Представленная работа соответствует направлению из Стратегии научно-технического развития Российской Федерации. Н1. Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта (Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-38-00592.

### Литература

1. Филимонова А.А., Боос Г. О. Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами. [Электронный ресурс] URL: <https://sibac.info/conf/innovation/xxviii/39638> (Дата обращения 5.12.2018)
2. ГОСТ IEC 61131-2-2012 Контроллеры программируемые. Часть 2. Требования к оборудованию и испытания. Официальное издание. - М.: Стандартинформ. 2015.
3. ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016 Контроллеры программируемые. Часть 3. Языки программирования. Официальное издание. - М.: Стандартинформ, 2016.
4. Siemens Simatic S7-1500. [Электронный ресурс] URL: <http://en-res.ru/plc/siemens-simatic-s7/s7-1500.html> (Дата обращения 5.12.2018)
5. ТИА Portal: Добро пожаловать на следующий уровень // ИСУП – 2011. – №2.
6. Теплов А. Обзор рынка промышленных контроллеров // ММ. Деньги и технологии. – 2009.
7. Программируемые логические контроллеры Mitsubishi. [Электронный ресурс] URL: <http://www.plcsystems.ru/catalog/Mitsubishi/controller.php> (Дата обращения 5.12.2018)
8. Контроллеры АBB. [Электронный ресурс] URL: <https://new.abb.com/products/robotics/ru/controllers> (Дата обращения 5.12.2018)
9. Программируемые логические контроллеры ОВЕН ПЛК [Электронный ресурс] URL: <http://electricalschool.info/automation/1704-programmiruemye-logicheskie-kontrollery.html> (Дата обращения 5.12.2018)
10. ОВЕН ПЛК — российский контроллер мирового уровня. [Электронный ресурс] URL: <http://controlengrussia.com/innovatsii/oven-plk-rossiiskii-kontroller-mirovogo-urovnya/> (Дата обращения 5.12.2018)
11. Контроллеры Segnetics для вентиляции и других инженерных систем зданий. [Электронный ресурс] URL: <http://www.segnetics.com/plc> (Дата обращения 5.12.2018)
12. Курашкин С. О. Анализ нейрокомпьютерных систем // Актуальные проблемы авиации и космонавтики - 2016. Том 1. С.686-688.
13. Кравчук Д. И., Кравчук В. И. Проблемы нейрокомпьютерных средств // Молодой ученый. — 2015. — №10.
14. Еремкин А. И., Романчук В. А. Применение нейрокомпьютерных технологий в военной промышленности. Электронный научно-практический журнал «Современные научные исследования и инновации» [Электронный ресурс] URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/06/54110> (Дата обращения 5.12.2018)
15. Жикеев А. А. Решение задач автоматизации управления сложными технологическими процессами путем применения методов искусственного интеллекта [Электронный ресурс] URL: [http://www.rusnauka.com/17\\_APSN\\_2013/Informatica/1\\_140538.doc.htm](http://www.rusnauka.com/17_APSN_2013/Informatica/1_140538.doc.htm) (Дата обращения 5.12.2018)
16. Самойлова Е. М., Игнатьев А. А. Интеграция искусственного интеллекта в автоматизированные системы управления и проектирования технологических процессов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010.
17. ODiN предскажет отказ на 99% [Электронный ресурс] URL: <https://konstruktor.net/podrobnее-hidr/odin-predskazhet-otkaz-na-99-1582.html> (Дата обращения 5.12.2018)
18. Искусственный интеллект приходит в производство// Экспресс-информация по зарубежной электронной технике – 2018. - №21.
19. Промышленное программное обеспечение SIMATIC. [Электронный ресурс] URL: [http://www.ste.ru/siemens/pdf/rus/12\\_Soft\\_2007\\_r.pdf](http://www.ste.ru/siemens/pdf/rus/12_Soft_2007_r.pdf) (Дата обращения 5.12.2018)
20. Виксне П. Семейство процессоров обработки сигналов NeuroMatrix. // Электроника - 2006
21. Модуль MB106.02. [Электронный ресурс] URL: <https://www.module.ru/upload/>

<images/1464957790MB106.02.pdf> (Дата обращения 5.12.2018)

22. Процессор 1879BM5Я [Электронный ресурс] URL: [https://www.module.ru/catalog/micro/processor\\_1879vm5ya/](https://www.module.ru/catalog/micro/processor_1879vm5ya/) (Дата обращения 13.03.2018)

23. Канглер В.М., Панченко К.Е. Нейроморфный чип «Алтай», ориентированный на применение в системах технического зрения, РТК и беспилотных транспортных средствах // Третий Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2016, 22-23 сентября 2016 г., г. Иннополис, Республика Татарстан, Россия): Труды семинара. – М.: Изд-во «Перо», 2016. – 184 с. С. 169-181.

24. ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012 Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования. Официальное издание. - М.: Стандартинформ, 2014.

25. ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012 Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 2. Требования к системам. Официальное издание. - М.: Стандартинформ, 2014.

26. ГОСТ Р МЭК 61508-4-2012 Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 4. Термины и определения. Официальное издание. - М.: Стандартинформ, 2014.

27. Галушкин А.И. Новые технологии микроэлектроники и разработки перспективных нейрокомпьютеров // Информационные технологии. 2016. №7. Т.22. С. 550-555.

28. Галушкин А.И. Пантюхин Д.В. СуперЭВМ и мемристоры // Информационные технологии. 2016. №4. Т.22. С. 304-312.

29. Галушкин А.И. Перспективы развития высокопроизводительной вычислительной техники с применением мемристоров (Пленарный доклад) // XII Всероссийская научная конференция «Нейрокомпьютеры и их применение». 2014. с.137.

30. Галушкин А.И. Мемристоры в развитии высокопроизводительной вычислительной техники // Информационные технологии. 2015. №2. С. 146-156.

31. Галушкин А.И. На пути к нейрокомпьютерам с использованием мемристоров // Приложение к журналу "Информационные технологии". 2014. №4. С.2-19.

32. Галушкин А.И. Стратегия развития современных супернейрокомпьютеров на пути к эксафлопным вычислениям. Приложение к журналу «Информационные технологии» № 3. 2012.

33. Thomas A. Memristor-based neural networks // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. Vol. 46. PP. 093001. doi: 10.1088/0022-3727/46/9/093001.

34. Snider G., Spike-timing-dependent learning in memristive nanodevices // IEEE Int. Symp. Nanoscale Architectures (NANOARCH 2008). Washington, DC. 2008. PP. 85-92.

35. Liu Q., Sun J., Lv H., Long S., Yin K., Wan N., Li Y. Real-time observation on dynamic growth/dissolution of conductive filaments in oxide-electrolyte-based ReRAM // Adv. Mater. 2012. PP. 1-6. doi: 10.1002/adma.201104104.

36. Akinaga H., Shima H. Resistive random access memory (ReRAM) based on metal oxides // Proceedings of the IEEE. 2010. Vol. 98. No. 12. PP. 2237-2251. doi: 10.1109/JPROC.2010.2070830.

37. Yang J. J., Pickett M. D., Li X., Ohlberg D. A., Stewart D. R., Williams R. S. Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevice // Nature nanotechnology. 2008. Vol. 3. PP. 429-433. doi:10.1038/nnano.2008.160.

38. Prodromakis T., Mihelakisy K., Toumazou C. Fabrication and electrical characteristics of memristors with TiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2+x</sub> active layers // Circuits and Systems (ISCAS), Proceedings of 2010 IEEE International Symposium. 2010. P. 1520-1522.

39. Gale E.M., Adamatzky A., de Lacy Costello B. Fabrication and modelling of titanium dioxide memristors // RSC Younger Members Symposium. 2012.

40. Choi B.J., Jeong D.S., Kim S.K. Resistive switching mechanism of TiO<sub>2</sub> thin films grown by atomic-layer deposition // Appl. Phys. 2005. N. 98. P. 033715(1-10). doi: 10.1063/1.2001146

41. Yoon K.J., Lee M.H., Kim G.H. Memristive tri-stable resistive switching at ruptured conducting filaments of a Pt/TiO<sub>2</sub>/Pt cell // Nanotechnology. 2012. Vol. 21. N. 18. P. 185202(1-8). doi: 10.1088/0957-4484/23/18/185202

42. Данилин С.Н., Щаников С.А. Данилин С.Н., Щаников С.А. Перспективная элементная база специализированных ЭВМ современных РЛС на основе мемристоров // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. №3 С. 13-19.

43. Данилин С.Н., Пантелеев С.В., Щаников С.А. Исследование точности функционирования искусственных нейронных сетей на базе мемристоров при дестабилизирующих воздействиях // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2017. №19. С. 42-49.

44. Данилин С.Н., Щаников С.А., Сакулин А.Е. Определение функциональных допусков искусственных нейронных сетей на основе наномемристоров // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. №3(61). С. 25-31. (DOI: 10.21667/1995-4565-2017-1-3-25-31)

45. Алехин А.П., Батуринов А.С., Григал И.П., Гудкова С.А., Маркеев А.М., Чуприк Мемристор

на основе смешанного оксида металлов // патент на изобретение 2472254 14.11.2011.

46. Ракитин В.В., Русаков С.Г. Мемристорный генератор на триггере шмитта с несколькими устойчивыми состояниями динамического равновесия // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2016. № 1. С. 79-85.

47. Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Рыльков В.В., Королев К.Г., Рыжкова Г.С. Мемристорные свойства тонкопленочных нанокмозитов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 6. С. 4-10.

48. Тихов С.В., Горшков О.Н., Антонов И.Н., Касаткин А.П., Коряжкина М.Н., Шарапов А.Н. способ определения электрофизических параметров конденсаторной структуры мемристора, характеризующих процесс формовки // патент на изобретение RUS 2585963 08.04.2015.

49. Бобылев А.Н., Удовиченко С.Ю. Создание электронного запоминающего устройства, подобного по свойствам синапсу мозга // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 4 (38). С. 68-71.

50. Петров А., Алексеева Л., Иванов А., Лучинин В., Романов А., Чиков Т., Набатамэ Т. На пути к нейроморфной мемристорной компьютерной платформе // Наноиндустрия. 2016. № 1 (63). С. 94-109.

51. Герасимова С.А., Михайлов А.Н., Белов А.И., Королев Д.С., Горшков О.Н., Казанцев В.Б. Имитация синаптической связи нейроноподобных генераторов с помощью мемристивного устройства // Журнал технической физики. 2017. № 8. Т. 87. С. 1248-1254.

52. Antonov I.N., Belov A.I., Mikhaylov A.N., Morozov O.A., Ovchinnikov P.E. Formation of Weighting Coefficients in an Artificial Neural Network Based on the Memristive Effect in Metal-Oxide-Metal Nanostructures // Journal of Communications Technology and Electronics. 2018. 63(8). PP. 950-957.

53. Демин В.А., Емельянов А.В., Лапкин Д.А., Ерохин В.В., Кашкаров П.К., Ковальчук М.В. Нейроморфные элементы и системы как основа для физической реализации технологий искусственного интеллекта // Кристаллография. 2016. Т. 61, № 6. С. 958-968.

**Поступила 28 октября 2018 г.**

54. Demin V.A. et al. Neuromorphic systems, synaptic plasticity and spiking neural networks based on memristive devices // First International Workshop "Nanoelectronic Memristive Devices for Quantum and Neuromorphic Computing" (MEM-Q). Book of abstracts. 2018. P. 5.

55. Talanov M., Zykov E.Y., Erokhin V., Magid E., Distefano S. The memristive artificial neuron high level architecture for biologically inspired robotic systems // 2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering, IC-MSC 2017. PP. 196-200.

56. Данилин С.Н., Щаников С.А., Ивентьев А.А. Применение имитационных моделей при инженерном проектировании нейрокомпьютеров // Нейрокомпьютеры и их применение XVI Всероссийская научная конференция: тезисы докладов. Москва, 2018. С. 138-140.

57. Галушкин А.И., Данилин С.Н., Щаников С.А. Нейросетевой контроль точности функционирования технических средств на основе мемристоров // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. №2. С. 44-51.

58. Danilin S.N., Shchanikov S.A., Sakulin A.E. Algorithm for Determining Optimum Operation Tolerances of Memristor-Based Artificial Neural Networks // 2017 IVth International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT). 2017. PP. 140-144.(DOI: 10.1109/ICEnT.2017.37)

59. Danilin S.N., Shchanikov S.A. Neural network algorithms for determining the values of signal parameters in radio-electronic hardware // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2017. PP. 1-4. (DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239445)

60. Danilin S.N., Shchanikov S.A., Sakulin A.E., Bordanov I.A. Determining the Fault Tolerance of Memristors-Based Neural Network Using Simulation and Design of Experiments // 2018 Vth International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT). 2018.

61. Данилин С.Н., Щаников С.А., Сакулин А.Е. Перспективы применения нейрокомпьютеров для создания цифровых двойников // Нейрокомпьютеры и их применение XVI Всероссийская научная конференция: тезисы докладов. Москва, 2018. С. 143-144.

The article discusses the role of information technology in solving problems caused by the formation in the developed countries of the digital economy and industry. At present, due to the increase in the amount of information processed, there is a need to continuously improve the speed and throughput of existing computing facilities. For a wide range of tasks this is only possible with the use of neurocomputers. An important role in the creation of modern high-performance neurocomputers is played by the search for new materials and technologies for their hardware implementation. For these purposes, it is proposed to use nanoscale electronic elements - memristors.

*Key words:* production automation, digital industry, neurocomputers, memristors, programmable logic controllers.

---

*Щаников Сергей Андреевич* — кандидат технических наук, декан факультета информационных технологий. Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

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

*Никитаев Антон Сергеевич* — студент (магистратура) кафедры информационных систем факультета информационных технологий. Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* toscha.n2010@yandex.ru.

*Борданов Илья Алексеевич* — студент кафедры информационных систем факультета информационных технологий. Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* bordanov2011@yandex.ru.

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