

Моделирование восстановления биологических и биотехнических систем с использованием аппаратной аналоговой и программной искусственных нейронных сетей

Ярослав А. Туровский	¹	yaroslav_turovsk@mail.ru
Евгений В. Богатиков	¹	evbogatikov@yandex.ru
Сергей Г. Тихомиров	²	tikhomirov_57@mail.ru
Артем А. Адаменко	²	adamenko.artem@gmail.com

¹ Воронежский государственный университет, Университетская площадь, 1, г. Воронеж, 394018, Россия

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Реферат. Разработана аппаратная аналоговая модель искусственной нейронной сети на основе специально обученной программной искусственной нейронной сети для моделирования процесса восстановления поврежденных биологических и биотехнических систем с использованием нейрочипов на основе эволюционного метода обучения. Проведена серия из 12 вычислительных экспериментов по восстановлению поврежденной аппаратной аналоговой искусственной нейронной сети с помощью программной искусственной нейронной сети. Для восстановления поврежденной сети используется эволюционный подход. В большинстве случаев удается восстановить поврежденную аппаратную аналоговую нейронную сеть до 100% точности. Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенного подхода в рамках моделирования восстановления поврежденных биологических и биотехнических систем с использованием нейрочипа на основе эволюционного метода с применением механизма "изоляции". Предложенный метод восстановления открывает перспективы для таких областей как: нейропротезирование, самообучающиеся и само адаптирующиеся системы; реверс-инжиниринг; восстановление поврежденных банков данных, восстановление изображений; принятие решений и управление и т. п.

Ключевые слова: нейрочип, эволюционный алгоритм, изоляты, искусственные нейронные сети, аппаратная аналоговая искусственная нейронная сеть, программная искусственная нейронная сеть

Modeling the restoration of biological and biotechnical systems using hardware analog and software artificial neural networks

Yaroslav A. Turovskii	¹	yaroslav_turovsk@mail.ru
Evgenii V. Bogatikov	¹	evbogatikov@yandex.ru
Sergei G. Tikhomirov	²	tikhomirov_57@mail.ru
Artem A. Adamenko	²	adamenko.artem@gmail.com

¹ Voronezh state university, University Square, 1 Voronezh, 394018, Russia

² Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Summary. A hardware analog model of an artificial neural network was developed, based on a specially trained software artificial neural network, for modeling the process of recovering damaged biological and biotechnical systems using neurochips based on the evolutionary method of training. A series of 12 computational experiments on the restoration of a damaged hardware analog artificial neural network with the help of a software artificial neural network was carried out. To restore a damaged network, an evolutionary approach is used. In most cases, it is possible to restore a damaged hardware analog neural network to 100% accuracy. The obtained results confirm the efficiency of the proposed approach in the framework of modeling the restoration of damaged biological and biotechnical systems using a neurochip on the basis of the evolutionary method using the "isolation" mechanism. The proposed recovery method opens up prospects for such areas as neuroprosthetics, self-learning and self-adapting systems; reverse-engineering; restoration of damaged data banks, image restoration; decision making and management, and so on.

Keywords: neurochip, evolutionary algorithm, isolates, artificial neural networks, hardware analog artificial neural network, software artificial neural network

Введение

На сегодняшний день одним из перспективных направлений исследований, которые проводятся с целью восстановления работоспособности поврежденных биологических и биотехнических систем, является создание нейрочипов (НЧ) [1–5]. В качестве биологической системы могут быть, например, отдельные участки или области нервной ткани [6], в качестве

биотехнических систем могут использоваться сложные системы, включающие биологические и технические элементы.

Примером биотехнических систем являются технологические машины и оборудование для биосинтетических процессов и биотехнологий: биореакторы для культивирования микроорганизмов, оборудование для биокаталитических процессов, оборудование для созревания пищевых

Для цитирования

Туровский Я.А., Богатиков Е.В., Тихомиров С.Г., Адаменко А.А. Моделирование восстановления биологических и биотехнических систем с использованием аппаратной аналоговой и программной искусственных нейронных сетей // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 2. С. 86–92. doi:10.20914/2310-1202-2018-2-86-92

For citation

Turovskij Y.A., Bogatkov E.V., Tikhomirov S.G., Adamenko A.A. Modeling the restoration of biological and biotechnical systems using hardware analog and software artificial neural networks. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2018, vol. 80, no. 2, pp. 86–92. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-2-86-92

сред и т. п. [7] Элементами такой системы являются различные биологические объекты – бактерии или дрожжи в системах микробиологического синтеза, биодатчики в системах контроля или поддержания параметров среды обитания, человек, управляющий сложными техническими устройствами и т. п. [8].

Нейрочипы, при их интеграции в биотехническую систему, для выполнения своих функций должны быть «подстроены» под нее путем проведения этапа предварительного обучения. Один из вариантов обучения НЧ базируется на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС). При этом реализованная тем или иным способом архитектура НЧ должна будет соответствовать функциям и структуре ИНС. В настоящее время существует множество алгоритмов обучения ИНС «с учителем», в том числе и для ИНС прямого распространения. Однако одним из главных недостатков этих алгоритмов является необходимость наличия обучающих выходных паттернов для соответствующих входных векторов обучающей выборки (ОВ). Такой подход к обучению ИНС не представляется возможным для случая, когда ИНС нужно использовать в качестве инструмента для моделирования автоматизированного обучения НЧ для восстановления поврежденной биологической или биотехнической системы, потому что неизвестны входные и выходные векторы. Наиболее подходящим подходом к обучению в таких случаях является эволюционный подход.

Материалы и методы

Реализация и моделирование повреждения аппаратной искусственной нейронной сети

Разработана и реализована аппаратная аналоговая искусственная нейронная сеть (ААИНС), в целях моделирования восстановления поврежденной биологической и биотехнической систем с использованием НЧ. В качестве НЧ выступает программная искусственная нейронная сеть (ПИНС), в качестве модели нервной ткани используется ААИНС с разомкнутыми весовыми коэффициентами (ВК) в целях моделирования повреждения биологических и биотехнических систем. Взаимодействие ПИНС и ААИНС, путем передачи сигналов позволяет провести процесс моделирования восстановления поврежденной биологических и биотехнических систем с использованием эволюционного подхода [9].

Перед реализацией ААИНС проводится этап создания ее ПИНС-модели, т. е. модели искусственной нейронной сети, реализованной на том или иной языке программирования. Обучение нейронной сети проводится в оригинальном программном пакете *ANNBuilder* [10–12], алгоритмом перебора ВК [10], т. к. в данном

оригинальном алгоритме есть возможность гибкого перебора ВК сети. Возможность оригинального алгоритма перебора ВК при обучении нейронной сети обусловлена тем, что при реализации ААИНС, накладываются ограничения на порядок значений ВК ПИНС-модели преимущественно в диапазоне [0; 1], в связи с использованием резисторов различных номиналов сопротивления, как аналогов ВК нейронной сети. Алгоритм перебора ВК позволяет обучать ИНС путем перебора всех ее ВК по заданным пользователем параметрам, в отличие от градиентных методов, один из которых также реализован в программном пакете *ANNBuilder* в алгоритме обратного распространения ошибки, где значения ВК нейросети изменяются независимо от пользователя способом и значения ВК ничем не ограничиваются. Алгоритм перебора ВК хорошо подходит для создания небольших моделей в задачах классификации, т. к. подвержен попаданию в локальные минимумы, но позволяет подстроить значения ВК нейросети в заданных пределах и с требуемой точностью классификации.

Другим ограничением, связанным с особенностями ААИНС, является то, что значения ВК в аппаратной реализации отличаются от значений изначальной модели на $\pm 5\%$, что требует тестирования модели, перед аппаратной реализацией, на ее устойчивость к изменениям ее ВК на заданный процент.

В качестве модели используется многослойный перцептрон, с одним скрытым слоем из пяти нейронов, двумя входами и двумя нейронами на выходе. Модель обучена на обучающей выборке из 500 элементов для задачи линейной классификации. На рисунке 1 приведена топология модели ААИНС.

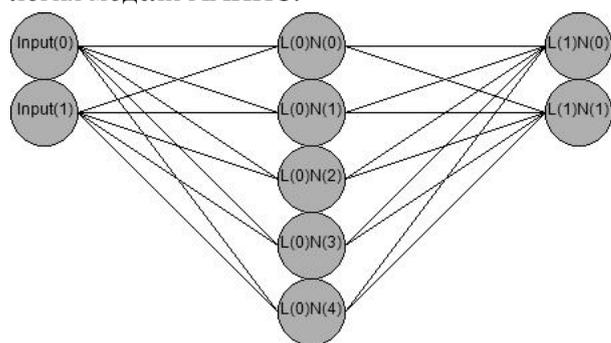


Рисунок 1. Топология модели ААИНС. L(–) – порядковый номер слоя сети; N(–) – порядковый номер нейрона в слое

Figure 1. Topology of the HAANN model. L(–) – the sequence number of the network layer; N(–) is the ordinal number of the neuron in the layer

После обучения ПИНС-модели проводится анализ конструирования ААИНС. Для каждого из нейронов высчитываются соответствующие сопротивления и резисторы нужных

номиналов, для имитации значений ВК ПИНС-модели, а также строятся электронные схемы каждого нейрона в ПО *Microcap* [13].

Все проходящие по связям *i*-го нейрона сигналы, попадают в сумматор данного нейрона, где происходит суммирование входящих в него сигналов. Связи ААИНС, являющиеся аналогами ВК ПИНС-модели, имеют резисторы с номиналами сопротивления, соответствующими значениям ВК модели. Суммарный сигнал передается в операционный усилитель LM224 [14], который является аналогом функции активации. На выходе из операционного усилителя, сигнал нормируется к рабочему для ПИНС-модели диапазону [0; 1]. На рисунке 2 приведен пример электронной схемы одного из нейронов, перед аппаратной реализацией.

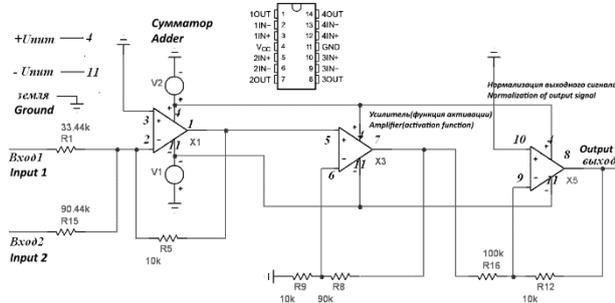


Рисунок 2. Электронная схема одного из нейронов ААИНС

Figure2. Electronic circuit of one of the HAANN neurons

В ПО *SprintLayout* [15] построены схемы печатных плат для нейронов скрытого слоя, нейронов выходного слоя и соединительной платы, которая соединяет входы и выходы сети с нейронами и сами нейроны между собой. На рисунке 3 приведена фотография ААИНС.

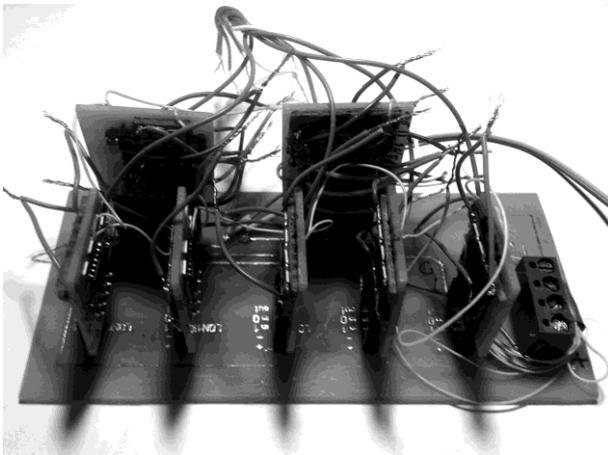


Рисунок 3. Аппаратная аналоговая реализация искусственной нейронной сети

Figure3. Hardware analog implementation of an artificial neural network

После реализации и тестирования ААИНС, проведен этап повреждения сети, имитирующий повреждение биологической и биотехнической систем. Повреждение проводится путем разъединения контактов ВК ААИНС, в результате чего, точность ее классификации падает. В таблице 1 приведены результаты повреждения ААИНС. Изначальная точность ААИНС равна 95–100%.

Таблица 1. Топологии повреждения ААИНС

Table 1. Topologies of damage to HAANN

№	Точность Accuracy (%)	Кол-во отключенных связей Count of disconnected weights
1	68,42	3
2	42,11	2
3	57,89	5
4	68,42	3
5	42,11	6
6	42,11	7
7	42,11	8
8	42,11	9
9	42,11	9
10	42,11	11
11	31,58	12
12	31,58	12

Перед этапом непосредственного восстановления функционирования поврежденной ААИНС, проводится этап конструирования генератора сигналов и аппаратной реализации коннекторов, которые будут передавать заданные сигналы с ААИНС на входы ПИНС и от выходов ПИНС на контакты ААИНС соответственно.

В качестве генератора сигналов и устройства считывания выходных значений ААИНС используется *ArduinoUno* [16], а также 2 12-битных ЦАП *MCP4921* [17] на каждый вход нейронной сети, управляемых через SPI [18] интерфейс *ArduinoUno*. Считывание выходных сигналов реализовано посредством встроенных АЦП *ArduinoUno*. На рисунке 4 приведена фотография генератора сигналов для ААИНС.

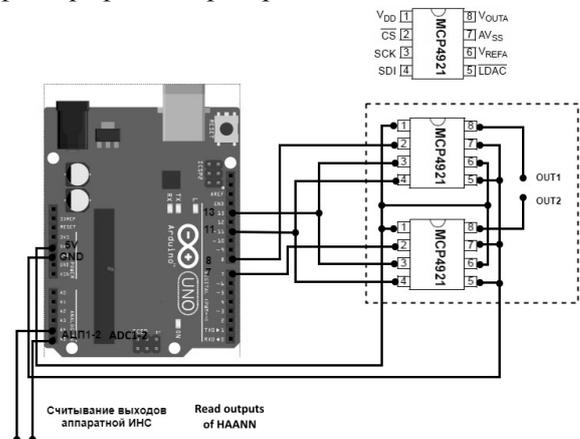


Рисунок 4. Генератор сигналов для ААИНС

Figure4. Signal generator for HAANN

В качестве коннектора к ААИНС также использовался *ArduinoUno*. Для передачи сигналов с ААИНС на входы ПИНС используются АЦП микрокомпьютера. Для передачи сигналов с выходов ПИНС на контакты ААИНС используются 6 12-битных ЦАПов *MCP4921*, управляемых через SPI интерфейс *ArduinoUno*. На рисунке 5 приведен коннектор для ААИНС.

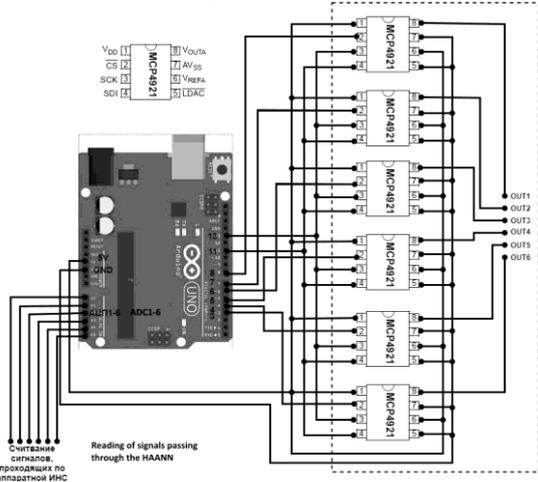


Рисунок 5. Коннектор для ААИНС

Figure 5. Connector for HAANN

Восстановление поврежденной аналоговой аппаратной нейронной сети

Для программного пакета *ANNBuilder* реализован модуль подстройки ПИНС под ААИНС, с использованием эволюционного подхода в целях восстановления последней. Т.е. сигналы, проходящие по коннектору, передаются и используются реализованным программным модулем, который в свою очередь имитирует подстройку нейрочипа под поврежденную биологическую и биотехническую систему на примере подстройки искусственных нейронных сетей с использованием эволюционного метода. На рисунке 6 приведен скриншот модуля, имитирующего подстройку нейрочипа на основе эволюционного подхода с использованием механизма «изолятов».

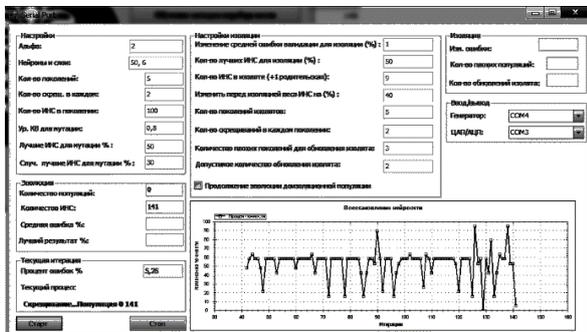


Рисунок 6. Скриншот модуля программного пакета *ANNBuilder*, имитирующего подстройку нейрочипа на основе эволюционного подхода с использованием механизма «изолятов».

Figure 6. Screenshot of the module *ANNBuilder*, which simulates the adjustment of the neurochip on the basis of the evolutionary approach using the mechanism of "isolates".

Восстановление проводится путем воздействия на ВК ААИНС сигналов, являющимися выходами ПИНС.

В ходе экспериментов отключается все больше и больше ВК ААИНС с целью уменьшения точности ее классификации. Затем, к ВК ААИНС в случайном порядке подключаются контакты для считывания промежуточных сигналов ААИНС как входов в ПИНС. Случайность подключения имитирует то, что мы не можем точно знать к каким местам биологических и биотехнических систем подключиться, а имеем возможность подключаться к определенной промежуточной, для проходящих процессов, области, получая промежуточные параметры ее активности данных систем. Также подключаются выходы ПИНС к случайным ВК ААИНС или к суммарному сигналу отдельных нейронов для воздействия на ее промежуточные сигналы с целью ее восстановления программной нейронной сетью. На рисунке 7 приведена общая схема, на которой ААИНС сети с генератором сигналов и коннектором. Ромбовидные контакты сплошного контура соединяют выход коннектора со связями ААИНС; круглые сплошного контура соединяют вход коннектора со связями ААИНС. Пунктирным контуром соединены контакты ААИНС с генератором; сплошным контуром соединены контакты ААИНС с коннектором

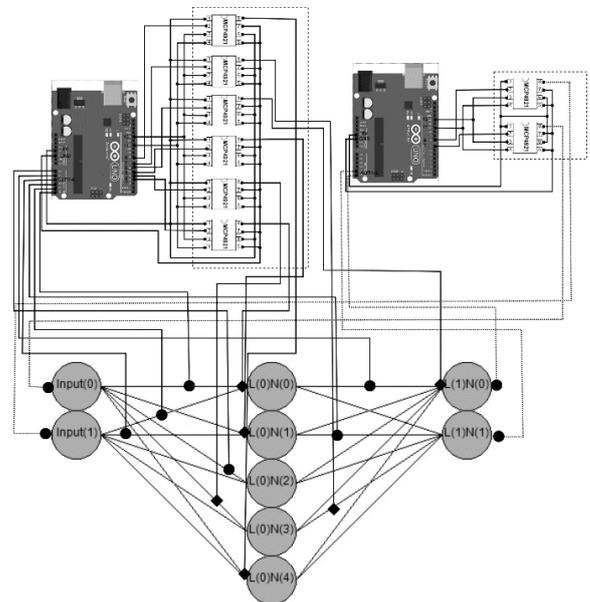


Рисунок 7. Общая схема ААИНС с генератором сигналов и коннектором.

Figure 7. General scheme of HAANN with signal generator and connector.

Для восстановления ААИНС используется эволюционный подход с механизмом “изоляции” [19–21] для подстройки ПИНС. Для эволюционного метода обучения заданы следующие параметры: количество скрытых слоев – 1; количество нейронов в скрытом слое – 50;

параметр α – 2(он характеризует угол наклона сигмоидальной функции активации нейронов [22]); количество поколений ИНС – 30; количество скрещиваний в каждом поколении – 2; количество ИНС в каждом поколении – 100; уровень коэффициента вариации (КВ) для мутации – 0,8; количество лучших ИНС для мутации – 50%; количество случайных ИНС из числа лучших ИНС для мутации – 30%. В нашем случае «мутация» ИНС – изменение i -х весовых коэффициентов, для которых коэффициент вариации по всей популяции ниже, чем заданный пользователем в заданном диапазоне. Порог изменения средней ошибки валидации эволюционного алгоритма для запуска «изоляции» – 1%; количество лучших ИНС для создания «изолят» – 50; количество ИНС в одном «изоляте» – 9 (+1 родительская ИНС); изменение ВК родительской ИНС при создании дочерних ИНС внутри «изолята» – на 40%; количество поколений обучения «изолят» – 10; количество скрещиваний в каждом поколении – 2; порог количества «неудачных» поколений для обновления «изолят» – 3; допустимое количество обновлений «изолят» – 2.

В качестве целевой функции используется обратная связь от ААИНС. В разработанном модуле на основе выходов ААИНС определяется наиболее вероятный класс и вычисляется ошибка на основе заранее заданных желаемых выходных значений для ААИНС, на которых была обучена ее изначальная ПИНС модель.

Результаты и обсуждение

Далее проведена серия из 12 вычислительных экспериментов по восстановлению ААИНС, в рамках моделирования восстановления поврежденных биологических и биотехнических систем посредством нейрочипа на основе эволюционного метода. В табл. 2 приведены результаты восстановления поврежденной ААИНС. Количество input контактов – количество весов, к которым подключены связи для передачи сигналов в ПИНС как вход; Количество output контактов – количество контактов, к которым подключены связи от ПИНС(выход) для воздействия на ААИНС.

Таблица 2.

Восстановление ААИНС с помощью ПИНС

Table2.

Recovery of HAANN by means of PANN

№	Точность Accuracy(%)	Количество input контактов Count of input contacts	Количество output контактов Count of output contacts
1	100	2	3
2	100	2	2
3	100	2	4
4	100	2	5
5	100	2	6
6	100	2	6
7	100	2	6
8	100	2	6
9	100	2	6
10	100	2	6
11	94,74	2	6
12	78,94	2	3

В таблице 3 приведены результаты восстановления поврежденной ААИНС с шагом в 5 поколений. По горизонтали – поколения с шагом в 5 единиц, по вертикали – номер эксперимента.

Первое число – лучшая точность в поколении, второе число – средняя точность для всего поколения. Все значения указаны в процентах. ‘-’ – эксперимент не проводился.

Таблица 3.

Результаты восстановления поврежденной ААИНС с шагом в 5 поколений

Table3.

Results of restoration of damaged HAANN in 5-generation increments

№	5	10	15	20	25	30	35
1	100; 95,47	–	–	–	–	–	–
2	100; 100	–	–	–	–	–	–
3	100; 95,79	–	–	–	–	–	–
4	100; 90,53	–	–	–	–	–	–
5	94,74; 66,74	100; 74,53	100; 84,16	100; 90,74	100; 92,58	100; 93,89	–
6	100; 66,32	100; 71,53	100; 80,05	100; 90,95	100; 92,84	100; 93,42	100; 93,84
7	94,74; 68,11	100; 82	100; 93,68	100; 94,26	100; 94,42	100; 94,63	–
8	94,74; 67,63	94,74; 76,58	100; 89	–	–	–	–
9	100; 75,11	100; 85,05	100; 92,89	–	–	–	–
10	94,74; 64,11	94,74; 71,16	94,74; 81,42	94,74; 91,74	100; 93,58	100; 94,84	–
11	94,74; 65,26	94,74; 71,89	94,74; 78,26	94,74; 87,74	94,74; 92,11	–	–
12	78,94; 67,47	78,94; 73,89	78,94; 75,21	–	–	–	–

Из таблицы 3 видно, что в большинстве случаев удалось восстановить точность классификации ААИНС до 100%. Средние значения точности классификации отражают среднюю точность всего поколения на указанной эпохе эволюции ПИНС. Лучшая точность отражает показатель точности лучшей ПИНС в поколении на указанной эпохе эволюции. Лишь при отключении 60% связей ААИНС (12/20), не удалось восстановить точность классификации до 100%, а только до 80–95% с 32%. Вышеописанные результаты подтверждают работоспособность предложенного подхода к восстановлению поврежденных биологических и биотехнических систем с использованием НЧ на основе эволюционного подхода.

Заключение

Реализована ААИНС, а также модуль имитирующий функционирование нейрочипа на основе эволюционного подхода и проведена

ЛИТЕРАТУРА

1. Neurochip // ScienceDaily. 2010. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2010/08/100810094619.htm>.
2. Chunxiao H. NeuroChip: A Microfluidic Electrophysiological Device for Genetic and Chemical Biology Screening of *Caenorhabditis elegans* Adult and Larvae // PLOS ONE. 2013. URL: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0064297>
3. Brainchip // Nature. 2004. URL: <http://www.nature.com/news/2004/041011/full/news041011-9.html>
4. Neurochip // Ohio State University, Wexner Medical Center. URL: <https://wexnermedical.osu.edu/blog/new-tech-helps-paralyzed-man-move-hand-with-mind>
5. Monia B. Tissue models: A living system on a chip // Nature: International Journal of science. 2011. № 471. P. 661–665
6. Туровский Я.А., Кургалин С.Д., Адаменко А.А. Автоматизирование обучения нейрочипов // Актуальные направления научных исследований века: теория и практика. 2015. № 5. Ч. 2(16–2). С.191–196.
7. Алексеев Г.В., Ангуфьев В.Т., Корниенко Ю.И. Технологические машины и оборудование биотехнологий: учебник. СПб.: ГИОРД, 2015. 608 с.
8. Биотехнические системы // Академик
9. Туровский Я.А., Кургалин С.Д., Адаменко А.А. Моделирование обучения нейрочипов, внедренных в нервную ткань // Цифровая обработка сигналов. 2016. С. 13–14
10. Туровский Я.А., Кургалин С.Д., Адаменко А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015619800 ANNBuilder 1.4.9. Воронеж, 2015.
11. Туровский Я.А., Кургалин С.Д., Адаменко А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614262 ANNBuilder 1.8.8. Воронеж, 2015.
12. Туровский Я.А., Кургалин С.Д., Адаменко А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619398 ANNBuilder 2.1.0. Воронеж, 2016.
13. Micro-Cap // SpectrumSoftware. URL: <http://www.spectrum-soft.com/demo.shtml>
14. LM224 // NXP Semiconductors. URL: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/17872/PHILIPS/LM224.html>

серия вычислительных экспериментов по повреждению и восстановлению ААИНС в рамках моделирования восстановления поврежденных биологических и биотехнических систем. В большинстве случаев удалось восстановить точность поврежденной ААИНС до 100%, что доказывает работоспособность предложенного метода для восстановления поврежденных биологических и биотехнических систем и утраченных ею функций в результате повреждения с использованием НЧ на основе эволюционного подхода.

Предложенный метод восстановления открывает перспективы для таких областей как: нейропротезирование, самообучающиеся и самоадаптирующиеся системы; реверс-инжиниринг; восстановление поврежденных банков данных, восстановление изображений; принятие решений и управление и т. п.

15. SprintLayout // ABACOM. URL: <https://www.electronic-software-shop.com/sprint-layout-60.html?language=de>
16. ArduinoUno // Arduino. URL: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
17. MCP4921 // Microchip. URL: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP4921>
18. SPI интерфейс // SerialPeripheralInterface. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface
19. Кургалин С.Д., Туровский Я.А., Борзунов С.В., Адаменко А.А. Теоретические аспекты оптимизации эволюционного обучения нейрочипов с использованием "изолятов" // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 11. С. 888–889.
20. Туровский Я.А., Адаменко А.А. Сравнительный анализ эволюционного метода с использованием «изолятов» и метода имитации отжига при обучении искусственных нейронных сетей // Программная инженерия. 2018. Т.9. № 4. С. 185–190
21. Туровский Я.А., Адаменко А.А. Сравнительный анализ результатов Обучения искусственных нейронных сетей в задачах обработки сигналов на основе эволюционного алгоритма с применением и без применения «изоляции» // DSPA-2018 20-я международная конференция Цифровая обработка сигналов и ее применение. 2018.
22. Альфа // Портал искусственного интеллекта. URL: <http://www.aiportal.ru/articles/neural-networks/activation-function.html>

REFERENCES

- 1 Neurochip ScienceDaily. 2010. Available at: <https://www.sciencedaily.com/releases/2010/08/100810094619.htm>.
- 2 Chunxiao H. NeuroChip: A Microfluidic Electrophysiological Device for Genetic and Chemical Biology Screening of *Caenorhabditis elegans* Adult and Larvae. PLOS ONE. 2013. Available at: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0064297>
- 3 Brainchip. Nature. 2004. Available at: <http://www.nature.com/news/2004/041011/full/news041011-9.html>
- 4 Neurochip. Ohio State University, Wexner Medical Center. Available at: <https://wexnermedical.osu.edu/blog/new-tech-helps-paralyzed-man-move-hand-with-mind>

5 Monia B. Tissue models: A living system on a chip. Nature: International Journal of science. 2011. № 471. pp. 661–665

6 Turovsky Y.A., Kurgalin S.D., Adamenko A.A. Automation of training of neurotics. *Aktualnye issledvaniya veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the century: theory and practice] 2015. no. 5. part 2 (16-2). pp. 191-196. (in Russian)

7 Alekseev G.V., Antufev V.T., Kornienko Yu.I. Tekhnologicheskie mashiny i oborudovanie [Technological machines and equipment for biotechnology] Saint-Petersburg, GIORД, 2015. 608 p. (in Russian)

8 . Biotechnical systems. *Akademik* [Academician] (in Russian)

9 Turovsky Y.A., Kurgalin S.D., Adamenko A.A. Modeling of the training of neurochips embedded in a neural tissue. *Tsifrovaya obrabotka signala* [Digital signal processing] 2016. pp. 13-14 (in Russian)

10 Turovsky Y.A., Kurgalin S.D., Adamenko A.A. Svidetel'stvo o gosregistratsii pogrammy dlya EVM [Certificate of state registration of the computer program № 2015619800 ANNBuilder 1.4.9] Voronezh, 2015. (in Russian)

11 Turovsky Y.A., Kurgalin S.D., Adamenko A.A. Svidetel'stvo o gosregistratsii pogrammy dlya EVM [Certificate of state registration of the computer program No. 2016614262 ANNBuilder 1.8.8] Voronezh, 2015. (in Russian)

12 Turovsky Y.A., Kurgalin S.D., Adamenko A.A. Svidetel'stvo o gosregistratsii pogrammy dlya EVM [Certificate of state registration of the computer program No. 2016619398 ANNBuilder 2.1.0] Voronezh, 2016. (in Russian)

13 Micro-Cap. SpectrumSoftware. Available at: <http://www.spectrum-soft.com/demo.shtm>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ярослав А. Туровский к.м.н., доцент, кафедра цифровых технологий, Воронежский государственный университет, Университетская площадь, 1, г. Воронеж, 394018, Россия, Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН, Профсоюзная ул., 65, Москва, 117342, Россия, yaroslav_turovsk@mail.ru

Евгений В. Богатиков к.ф.-м.н., доцент, кафедра физики полупроводников и микроэлектроники, Воронежский государственный университет, Университетская площадь, 1, г. Воронеж, 394018, Россия, evbogatikov@yandex.ru

Сергей Г. Тихомиров д.т.н., профессор, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, tikhomirov_57@mail.ru

Артем А. Адаменко аспирант, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, adamenko.artem@gmail.com

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 01.03.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 02.04.2018

14 LM224. NXP Semiconductors. URL: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/17872/PHILIPS/LM224.html>

15 SprintLayout. ABACOM. Available at: <https://www.electronic-software-shop.com/sprint-layout-60.html?language=de>

16 ArduinoUno. Arduino. Available at: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>

17 MCP4921. Microchip. Available at: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP4921>

18 SPI interface. SerialPeripheralInterface. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface

19 Kurgalin S.D., Turovsky Y.A., Borzunov S.V., Adamenko A.A. Theoretical Aspects of Optimizing Evolutionary Learning of Neurochips Using "Isolates". *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies]. 2016. pp. 22. no. 11. pp. 888-889. (in Russian)

20 Turovsky Y.A., Adamenko A.A. Comparative analysis of the evolutionary method with the use of "isolates" and the simulation method for annealing in the training of artificial neural networks. *Programmaya inzheneriya* [Software engineering] 2018. vol. 9. no. 4. pp. 185-190 (in Russian)

21 Turovsky Y.A., Adamenko A.A. Comparative analysis of the results of the training of artificial neural networks in signal processing problems on the basis of an evolutionary algorithm with and without the use of "isolation". *DSPA 2018* [20th International Conference on Digital Signal Processing and Differential Equalization its Application] 2018. (in Russian)

22 Alpha. *Portal iskustvennogo intellekta* [Portal of artificial intelligence] Available at: <http://www.ai> (in Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Yaroslav A. Turovskii Cand. Sci. (Med.), associate professor, department of digital technologies, Voronezh state university, University Square, 1 Voronezh, 394018, Russia, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya street, Moscow 117997, Russia, yaroslav_turovsk@mail.ru

Evgenii V. Bogatikov Cand. Sci. (Phys.-Math.), associate professor, department of semiconductor physics and microelectronics, Voronezh state university, University Square, 1 Voronezh, 394018, Russia, evbogatikov@yandex.ru

Sergei G. Tikhomirov Dr. Sci. (Engin.), professor, department of information and control systems, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, tikhomirov_57@mail.ru

Artem A. Adamenko graduate student, department of information and control systems, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, adamenko.artem@gmail.com

CONTRIBUTION

review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 3.1.2018

ACCEPTED 4.2.2018