

УДК 004.89:519.71

А.Ю. Заковоротный

Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

## РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ И АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПАМЯТИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ КОРРЕКЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе ассоциативной памяти предложена архитектура и алгоритмы функционирования двунаправленной многослойной дискретной нейросетевой ассоциативной памяти с управляющими нейронами, которая способна восстанавливать по входной информации, подаваемой на любой из двух ее входных слоев нейронов, цепочки ассоциаций и корректировать результаты с помощью управляющих нейронов.

**Ключевые слова:** ассоциативная память, многослойная нейросетевая ассоциативная память с управляющими нейронами, цепочки ассоциаций.

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ литературы.

Для решения задач нахождения ассоциативных образов в настоящее время существует множество разнообразных методов и алгоритмов [1 – 6], в связи с этим в теории искусственного интеллекта предпринимаются попытки создания универсальных подходов, позволяющих решать широкие классы задач поиска и запоминания ассоциативной информации. Один из таких подходов связан с использованием искусственных нейронных сетей – двунаправленная ассоциативная память (ДАП), которая состоит из двух слоев нейронов (рис. 1), связанных парами двунаправленных взвешенных связей [7 – 12]. Изображения (или пермерные либо  $m$ -мерные входные вектора) могут подаваться соответственно на входы  $X$ - или  $Y$ -элементов. При этом не предполагается подача изображений на оба слоя элементов одновременно.

Сеть способна запоминать пары ассоциированных друг с другом образов

$$S^P = (s_1^P, \dots, s_n^P), \quad T^P = (t_1^P, \dots, t_m^P)$$

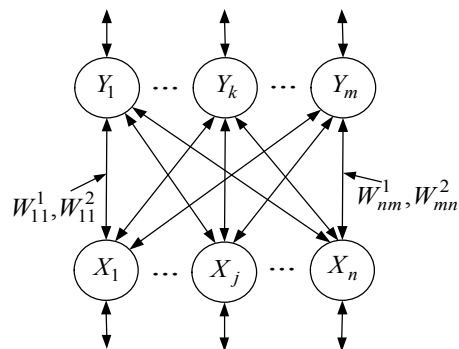


Рис. 1. Двунаправленная ассоциативная память

из некоторых заданных множеств образов

$$S = \{S^1, \dots, S^P, \dots, S^L\}, \quad T = \{T^1, \dots, T^P, \dots, T^L\},$$

где  $L$  – число ассоциированных пар.

Работа ДАП в режиме определения ассоциативных изображений является итерационной. Процесс изменения выходных сигналов нейронов каждого слоя ДАП осуществляется синхронно, при этом сигналы посылаются из слоя в слой последовательно, а не од-

новременно в обоих направлениях. При биполярных входных векторах функции активации  $f_p(U_{вх,p})$  для элементов X- и Y-слоя задаются выражением

$$U_{вых,p}(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{вх,p}(t) > \theta_p, \\ U_{вых,p}(t), & \text{если } U_{вх,p}(t) = \theta_p, \\ -1, & \text{если } U_{вх,p}(t) < \theta_p, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\theta_p$  – порог p-го элемента ДАП,  $p = 1, \dots, n, n+1, \dots, n+m$ .

Из выражения (1) следует, что если входной сигнал элемента точно равен пороговому значению, то функция активации оставляет на выходе нейрона предшествующее значение выходного сигнала. В связи с этим начальная активация нейронов обычно производится нулевыми входными сигналами. Функционирование сети может начинаться с задания изображения (входных сигналов) для любого из слоев ДАП. ДАП может запоминать пары ассоциативных изображений, а при подаче представителя пары на соответствующий вход – выдавать ассоциативное изображение. Однако ДАП не может запоминать цепочки ассоциаций и корректировать результаты в процесс своего функционирования с помощью управляющих нейронов [13 – 14].

**Цель статьи.** Разработка архитектуры и алгоритмов функционирования нейросетевой двунаправленной многослойной ассоциативной памяти, которая, с одной стороны, обладает возможностью запоминания и восстановления цепочек ассоциативных изображений, а с другой стороны, возможность изменять цепочки ассоциаций с помощью управляющих нейронов.

### Разработка архитектуры нейросетевой ассоциативной памяти

Далее, индексы переменных, если это не указано отдельно, протекают следующие значения:

$$\text{Верхний индекс } i = \overline{1, N}; \quad r, d = \overline{1, N}; \quad V = \overline{1, L};$$

$$\text{Нижний индекс } i = \overline{1, n}; \quad q_j = \overline{1, g_j}; \quad h_j = \overline{1, p_j}.$$

Задача решается благодаря тому, что архитектура классической ДАП перестраивается путем замены одного из сенсорных слоев нейронов на N слоев (рис. 2), которые последовательно связаны друг с другом парами двунаправленных взвешенных связей и добавлением N управляющих слоев нейронов  $R^i$  ( $i = \overline{1, N}$ ) [15]. При этом каждая пара соседних слоев нейронов фактически является двунаправленной ассоциативной памятью.

Память состоит из сенсорного слоя нейронов  $X_i$  и N слоев Z-элементов  $Z^1(Z_1^1, \dots, Z_{g_1}^1)$ ,  $Z^2(Z_1^2, \dots, Z_{g_2}^2)$ , ...,  $Z^N(Z_1^N, \dots, Z_{g_N}^N)$  с управляющими слоями нейронов  $R^i$ .

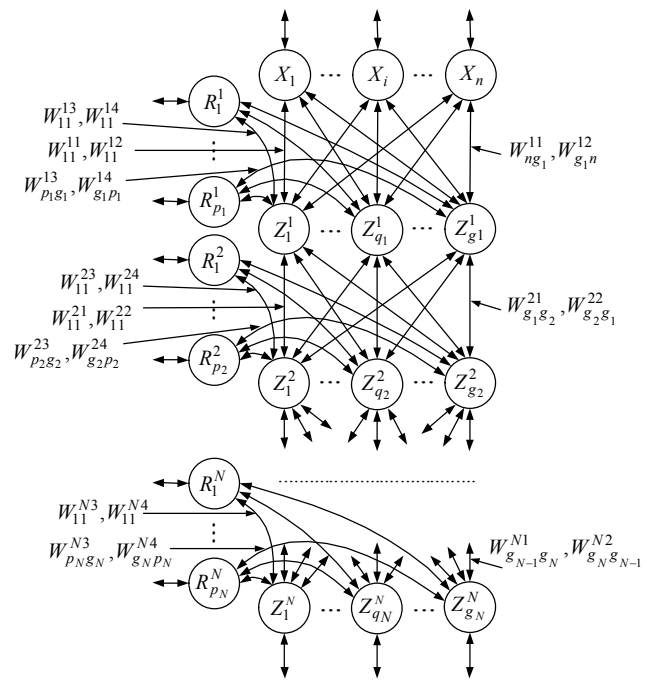


Рис. 2. Архитектура нейросетевой ассоциативной памяти с управляющими нейронами

Каждый нейрон входного слоя  $X_i$  связан с каждым нейроном  $Z^1$ -слоя парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами  $W_{i q_i}^{11}$ ,  $W_{q_i i}^{12}$ , каждый нейрон  $Z^1$ -слоя связан с каждым нейроном  $Z^2$ -слоя парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами  $W_{q_1 q_2}^{21}$ ,  $W_{q_2 q_1}^{22}$  и с каждым нейроном  $R_{h_1}^1$  из управляющего  $R^1$ -слоя парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами  $W_{h_1 q_1}^{13}$ ,  $W_{q_1 h_1}^{14}$ . По аналогии каждый  $Z^k$ -слой сети ( $k = \overline{3, N}$ ) связан с предыдущим слоем  $Z^{k-1}$  парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами  $W_{q_{k-1} q_k}^{k1}$ ,  $W_{q_k q_{k-1}}^{k2}$  и с нейронами  $R_{h_{k-1}}^{k-1}$  из управляющего  $R^{k-1}$ -слоя парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами  $W_{h_{k-1} q_{k-1}}^{(k-1)3}$ ,  $W_{q_{k-1} h_{k-1}}^{(k-1)4}$ . Каждый  $Z^k$ -слой ( $k = \overline{2, N-1}$ ) связан со следующим  $Z^{(k+1)}$ -слоем парами двунаправленных взвешенных связей  $W_{q_k q_{k+1}}^{(k+1)1}$ ,  $W_{q_{k+1} q_k}^{(k+1)2}$ . Каждый нейрон выходного слоя  $Z_{q_N}^N$  связан с каждым нейроном  $Z_{q_{N-1}}^{N-1}$ -слоя парами двунаправленных взвешенных связей  $W_{q_{N-1} q_N}^{N1}$ ,  $W_{q_N q_{N-1}}^{N2}$  и с нейронами  $R_{h_N}^N$  из управляющего  $R^N$ -слоя парами двунаправленных взвешенных

связей с весовыми коэффициентами  $W_{h_N q_N}^{N3}, W_{q_N h_N}^{N4}$ .

Разработанная сеть функционирует в соответствии с двумя алгоритмами: обучения и распознавания. Алгоритм обучения сводится к определению обучающего набора изображений и определения матриц весов связей между слоями нейронов:  $X_i, Z^1, Z^2, \dots, Z^N$ . Поскольку любые два Z-слоя нейронов  $Z^1$  и  $Z^2, Z^2$  и  $Z^3, \dots, Z^{N-1}$  и  $Z^N$ , имеют архитектуру двунаправленной ассоциативной памяти, то их функционирование аналогично классическому алгоритму функционирования ДАП [12 – 13]. Последовательное применение классического алгоритма ДАП к слоям нейронов  $Z^1$  и  $Z^2, Z^2$  и  $Z^3, \dots, Z^{N-1}$  и  $Z^N$  позволяет получать всю цепочку ассоциативных изображений  $S^V, S^{V1}, S^{V2}, \dots, S^{VN}$ , где  $S^V$  – входное изображение,  $S^{Vd}$  – изображения на выходах нейронов, соответственно слоев  $X, Z^1, Z^2, \dots, Z^N$  нейронов. Предложенная многослойная ассоциативная память является двунаправленной. Поэтому, если на входы  $Z^N$  нейронов подать изображение  $S^{VN}$ , то будет получена цепочка ассоциативных изображений  $S^{V(N-1)}, S^{V(N-2)}, \dots, S^{V1}, S^V$ . Процессы функционирования предложенной нейронной сети в этом случае аналогичны процессам функционирования сети при подаче изображения  $S^V$  на входы слоя X-нейронов. При этом добавление в структуру новой многослойной нейросетевой памяти N слоев управляющих нейронов дает возможность построения ассоциаций с учетом дополнительной информации. Это становится возможным благодаря тому, что управляющие нейроны связаны с соответствующими слоями нейронной сети и при появлении информации на входах слоев, могут её корректировать с учетом информации на входах управляющих нейронов.

### Разработка алгоритма функционирования нейронной сети

В алгоритме функционирования ассоциативной памяти с управляющими нейронами приняты следующие обозначения:

$n$  – число нейронов в сенсорном слое нейронов;  
 $g_1, g_2, \dots, g_N$  – число элементов соответственно в слоях  $Z^1, Z^2, \dots, Z^N$  нейронной сети,  $g_1 = g_2 = \dots = g_N$ ;

$S^V, S^{V1}, S^{V2}, \dots, S^{VN}$  – цепочка ассоциативных изображений;

$SR^{V1}, SR^{V2}, \dots, SR^{VN}$  – множества управляющих векторов;

$SR^{Vk}$  – множество управляющих нейронов для k-слоя Z-нейронов ( $k = \overline{1, N}$ );

$L$  – число цепочек ассоциативных изображений, которые запоминаются;

$V$  – номер цепочки ассоциативных изображений;

$t_0^1, t_1^1, t_2^1, \dots$  – последовательные моменты времени при получении ассоциативных изображений;  $t_k^1 = t_0^1 + \Delta t$  или в общем виде  $t_k^1 = t_{(k-1)}^1 + \Delta t$ ;

$\Delta t$  – время, необходимое для получения выходного сигнала нейронов с помощью функции активации;

$f_V$  – функция активации V-го элемента.

Алгоритм работы многослойной ассоциативной памяти при подаче изображения на первый сенсорный вход, предусматривает выполнение шагов, аналогичных шагам при функционировании классической ДАП.

**Шаг 1.** Иницируются веса связей  $W_{iq_1}^{11}, W_{q_1 i}^{12}$ .

Задается начальное время:  $t = t_0^1$ . Иницируются нулевыми входными сигналами все нейроны сети:

$$U_{вх.X_i}(0) = 0; U_{вых.X_i}(0) = f_i(U_{вх.X_i}(0)) = 0;$$

$$U_{вх.Z_{q_r}^r}(0) = 0; U_{вых.Z_{q_r}^r}(0) = f_{q_r}(U_{вх.Z_{q_r}^r}(0)) = 0;$$

$$U_{вх.R_{h_r}^r}(0) = 0; U_{вых.R_{h_r}^r}(0) = f_{h_r}(U_{вх.R_{h_r}^r}(0)) = 0.$$

**Шаг 2.** Для изображения  $S^V = (S_1^V, \dots, S_n^V)$  из произвольной цепочки обучающих изображений  $S^V, S^{V1}, S^{V2}, \dots, S^{VN}$ , выполняются шаги 3 – 7.

**Шаг 3.** Задаются входные сигналы нейронов X-слоя и управляющего  $R^1$ -слоя сети:

$$U_{вх.X_i}(t_0^1) = S_i^V; U_{вх.R_{h_1}^1}(t_0^1) = SR_{h_1}^V.$$

В интервале времени  $[t_0, t_1^1 = t_0^1 + \Delta t]$  вычисляются выходные сигналы нейронов X- и  $R^1$ -слоя:

$$U_{вых.X_i}(t_1^1) = f_i(U_{вх.X_i}(t_0^1));$$

$$U_{вых.R_{h_1}^1}(t_1^1) = f_{h_1}(U_{вх.R_{h_1}^1}(t_0^1)).$$

**Шаг 4.** Пока не установятся выходные сигналы всех X- и  $Z^1$ -нейронов, выполняются шаги 5 – 7.

**Шаг 5.** Адаптируется активность элементов  $Z^1$ -слоя. Вычисляются входные и выходные сигналы  $Z^1$ -элементов:

$$U_{вых.Z_{q_1}^1}(t_2^1) = f_{q_1}(U_{вх.Z_{q_1}^1}(t_1^1)); U_{вх.Z_{q_1}^1}(t_1^1) =$$

$$= \sum_{i=1}^n W_{iq_1}^{11} U_{вх.X_i}(t_1^1) + \sum_{h_1=1}^{P_1} W_{h_1 q_1}^{13} U_{вых.R_{h_1}^1}(t_1^1),$$

Выходные сигналы  $Z^1$ -нейронов посылаются на входы элементов X- и  $R^1$ -слоев.

**Шаг 6.** Адаптируется активность элементов  $X$ - и  $R^1$ -слоев. Вычисляются входные и выходные сигналы нейронов  $X$ - и  $R^1$ -слоев:

$$U_{\text{вх.}X_i}(t_2^1) = \sum_{q_1=1}^{g_1} W_{q_1 i}^{12} U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_2^1),$$

$$U_{\text{вых.}X_i}(t_3^1) = f_i(U_{\text{вх.}X_i}(t_2^1));$$

$$U_{\text{вх.}R_{h_1}^1}(t_2^1) = \sum_{q_1=1}^{g_1} W_{q_1 h_1}^{14} U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_2^1);$$

$$U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_3^1) = f_i(U_{\text{вх.}R_{h_1}^1}(t_2^1)).$$

Выходные сигналы нейронов  $X$ - и  $R^1$ -слоев посылаются на входы элементов  $Z^1$ -слоя:

$$U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_4^1) = f_{q_1}(U_{\text{вх.}Z_{q_1}^1}(t_3^1)); U_{\text{вх.}Z_{q_1}^1}(t_3^1) = \sum_{i=1}^n W_{i q_1}^{11} U_{\text{вых.}X_i}(t_3^1) + \sum_{h_1=1}^{p_1} W_{h_1 q_1}^{13} U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_3^1).$$

**Шаг 7.** Проверяется тест на сходимость. Сравняются выходные сигналы нейронов  $X$ -слоя  $U_{\text{вых.}X_i}(t_3^1)$  и  $U_{\text{вых.}X_i}(t_1^1)$ , выходные сигналы управляющих нейронов  $R^1$ -слоя  $U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_3^1)$  и  $U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_1^1)$ , а также выходные сигналы нейронов  $Z^1$ -слоя  $U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_2^1)$  и  $U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_4^1)$ , которые получены на текущей и предыдущей итерациях. Если не выполнено хотя бы одно равенство

$$U_{\text{вых.}X_i}(t_3^1) = U_{\text{вых.}X_i}(t_1^1);$$

$$U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_3^1) = U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_1^1);$$

$$U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_2^1) = U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_4^1),$$

то переход к шагу 5 алгоритма, иначе – на выходе  $Z^1$ -слоя получено изображение  $S_1^{V1}$ , которое является входным изображением для  $Z^2$ -слоя ассоциативной памяти и осуществляется переход к шагу 8.

Для получения последующих изображений выполняются шаги 8 – 15 алгоритма, когда на каждом из  $Z^k$ -слоев ( $k = \overline{1, N}$ ) нейронов получается одно изображение из цепочки ассоциаций.

**Шаг 8.** Иницируются веса связей  $W_{q_k q_{(k+1)}}^{k1}$ ,

$W_{q_{(k+1)} q_k}^{k2}$ , задается начальное время определения

изображения на выходе  $Z^k$ -слоя нейронов ( $k > 1$ ):  $t_0^k$ .

**Шаг 9.** Для изображения  $S_k^V = (S_{k1}^V, \dots, S_{kn}^V)$ , полученного на слое  $Z^k$ -нейронов, выполняются шаги 10 – 14.

**Шаг 10.** В интервале времени  $[t_0^k, t_1^{(1+k)}]$  вычисляются выходные сигналы нейронов  $Z^k$ - и  $R^k$ -слоя элементов:

$$U_{\text{вых.}Z_{q_k}^k}(t_1^{(1+k)}) = U_{\text{вх.}Z_{q_k}^k}(t_r^k);$$

$$U_{\text{вых.}R_{h_k}^k}(t_1^{(1+k)}) = U_{\text{вх.}R_{h_k}^k}(t_r^k).$$

где  $t_r^k$  ( $r \in \{4, 6, 8, \dots\}$ ) – момент времени получения выходного сигнала на слое  $Z^k$ -элементов на предыдущей итерации.

**Шаг 11.** Пока не установятся выходные сигналы всех  $Z^k$ - и  $Z^{(k+1)}$ -нейронов, выполняются шаги 12 – 14.

**Шаг 12.** Адаптируется активность элементов  $Z^{(k+1)}$ -слоя. Вычисляются входные и выходные сигналы  $Z^{(k+1)}$ -элементов:

$$U_{\text{вх.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_1^{(1+k)}) = \sum_{q_k=1}^{g_k} W_{q_k q_{(k+1)}}^{k1} U_{\text{вых.}Z_{q_k}^k}(t_1^{(1+k)}) + \sum_{h_k=1}^{p_k} W_{h_k q_{(k+1)}}^{k3} U_{\text{вых.}R_{h_k}^k}(t_1^{(1+k)}),$$

$$U_{\text{вых.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)}) = f_{q_{(k+1)}}(U_{\text{вх.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_1^{(1+k)})).$$

Выходные сигналы  $Z^{(k+1)}$ -нейронов посылаются на входы элементов  $Z^k$ - и  $R^{(k+1)}$ -слоев.

**Шаг 13.** Адаптируется активность элементов  $Z^k$ - и  $R^{(k+1)}$ -слоев. Вычисляются входные и выходные сигналы нейронов  $Z^k$  и  $R^{(k+1)}$ -слоев.

$$U_{\text{вх.}Z_{q_k}^k}(t_2^{(1+k)}) = \sum_{q_{(k+1)}=1}^{g_{(k+1)}} W_{q_{(k+1)} q_k}^{k2} U_{\text{вых.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)}),$$

$$U_{\text{вых.}Z_{q_k}^k}(t_3^{(1+k)}) = f_i(U_{\text{вх.}Z_{q_k}^k}(t_2^{(1+k)}));$$

$$U_{\text{вх.}R_{h_k}^k}(t_2^{(1+k)}) = \sum_{q_{(k+1)}=1}^{g_{(k+1)}} W_{q_{(k+1)} h_k}^{k4} U_{\text{вых.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)});$$

$$U_{\text{вых.}R_{h_k}^k}(t_3^{(1+k)}) = f_i(U_{\text{вх.}R_{h_k}^k}(t_2^{(1+k)})).$$

Выходные сигналы нейронов  $Z^k$ - и  $R^k$ -слоев посылаются на входы элементов  $Z^{(k+1)}$ -слоя:

$$U_{\text{вх.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_3^{(1+k)}) = \sum_{q_k=1}^{g_k} W_{q_k q_{(k+1)}}^{k1} U_{\text{вых.}Z_{q_k}^k}(t_3^{(1+k)}) + \sum_{h_k=1}^{p_k} W_{h_k q_{(k+1)}}^{k3} U_{\text{вых.}R_{h_k}^k}(t_3^{(1+k)}),$$

$$U_{\text{вых.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_4^{(1+k)}) = f_{q_{(k+1)}}(U_{\text{вх.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_3^{(1+k)})).$$

**Шаг 14.** Проверяется тест на сходимость. Сравняются выходные сигналы нейронов  $Z^k$ -

слоя  $U_{\text{ВЫХ}.Z_{qk}^k}(t_3^{(1+k)})$  и  $U_{\text{ВЫХ}.Z_{qk}^k}(t_1^{(1+k)})$ , ВЫХОДНЫЕ сигналы управляющих нейронов  $R^k$ -слоя  $U_{\text{ВЫХ}.R_{hk}^k}(t_3^{(1+k)})$  и  $U_{\text{ВЫХ}.R_{hk}^k}(t_1^{(1+k)})$ , а также выходные сигналы нейронов  $Z^{(k+1)}$ -слоя  $U_{\text{ВЫХ}.Z_{q(k+1)}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)})$  и  $U_{\text{ВЫХ}.Z_{q(k+1)}^{(k+1)}}(t_4^{(1+k)})$ , которые получены на текущей и предыдущей итерациях. Если не выполнено хоть одно равенство:

$$U_{\text{ВЫХ}.Z_{qk}^k}(t_3^{(1+k)}) = U_{\text{ВЫХ}.Z_{qk}^k}(t_1^{(1+k)});$$

$$U_{\text{ВЫХ}.R_{hk}^k}(t_3^{(1+k)}) = U_{\text{ВЫХ}.R_{hk}^k}(t_1^{(1+k)});$$

$$U_{\text{ВЫХ}.Z_{q(k+1)}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)}) = U_{\text{ВЫХ}.Z_{q(k+1)}^{(k+1)}}(t_4^{(1+k)}),$$

то переход к шагу 12 алгоритма, если  $k+1 < N$ , то  $k = k+1$  и переход к шагу 8, иначе – к шагу 15 алгоритма.

**Шаг 15.** Останов.

## Выводы

Таким образом, впервые на основе двунаправленной ассоциативной памяти предложена архитектура и алгоритмы функционирования новой двунаправленной многослойной дискретной нейронной сети, которая способна восстанавливать по входной информации подаваемой на любой из двух ее входов цепочки ассоциативных изображений и изменять цепочки ассоциаций с учетом дополнительной информации, подаваемой на управляющие нейроны. На архитектуру и алгоритмы функционирования нейросетевой памяти получен патент Украины на изобретение [15].

## Список литературы

1. Нейронні мережі в системах автоматизації / В.І. Архангельський, І.М. Богаєнко, Г.Г. Грабовський, М.О. Рюмишин. – К.: Техніка, 1999. – 364 с.
2. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан. – М.: Вильямс, 2001. – 288 с.

3. Дмитриенко В.Д. Основы теории нейронных сетей / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Корсунов. – Белгород: БИИММАП, 2001. – 159 с.

4. Комашинский В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 94 с.

5. Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применение / Е.В. Бодянский, О.Г. Руденко. – Харьков: ТЕЛТЕХ, 2004. – 372 с.

6. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры и их применение на рубеже тысячелетий в Китае: в 2 т. / А.И. Галушкин. Т. 1. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 367 с.

7. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с.

8. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.

9. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

10. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: Учебное пособие / Г.Э. Яхьяева. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 316 с.

11. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории / А.И. Галушкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 496 с.

12. Рутковский Лешек. Методы и технологии искусственного интеллекта / Лешек Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 520 с.

13. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Харьков: Изд. центр НТМТ, 2013. – 248 с.

14. Многослойная нейросетевая память, хранящая цепочки ассоциаций / В.Д. Дмитриенко, Р.П. Мигуценко, А.Ю. Заковоротный, В.А. Бречко // Вестник НТУ "ХПИ". – Х.: НТУ "ХПИ". – № 33 (1142). – 2015. – С. 57-67.

15. Дмитриенко В.Д. Пристрій багатосарової двонаправленої асоціативної пам'яті з керуючими нейронами / В.Д. Дмитриенко, О.Ю. Заковоротний, І.П. Хавіна, В.О. Бречко // Патент на винахід 108712 Україна, МПК G06G 7/60. Заявник та володар патенту НТУ "ХПИ". – № а 2014 04330; Заявлено 22.04.2014; Опубліковано 25.05.2015; Бюл. № 10.

Поступила в редколлегию 10.02.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. А.А. Серков, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина.

## РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ ТА АЛГОРИТМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ ПАМ'ЯТІ З МОЖЛИВІСТЮ КОРЕКЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ

А.Ю. Заковоротний

На основі асоціативної пам'яті запропонована архітектура і алгоритм функціонування двонаправленої багатосарової дискретної нейромережової асоціативної пам'яті з керуючими нейронами, яка здатна відновлювати по вхідній інформації, що подається на будь-який з двох її вхідних шарів нейронів, ланцюжки асоціацій та коригувати результати за допомогою керуючих нейронів.

**Ключові слова:** асоціативна пам'ять, багатосарова нейромережова асоціативна пам'ять з керуючими нейронами, ланцюжки асоціацій.

## DEVELOPMENT ARCHITECTURE AND FUNCTIONING ALGORITHM OF NEURAL NETWORK MEMORY WITH CORRECTION RESULTS

A.Y. Zakovorotnyi

On the basis of associative memory proposed architecture and algorithms of discrete multilayer bidirectional associative memory neural networks with control neurons, which is capable of reducing the input of the information supplied on any of its two input layers of neurons, the chain of associations and adjust the results with the control neurons.

**Keywords:** associative memory, multilayer neural associative memory with control neurons, the chain of associations.