

**С.Ш. БАЛАСАНЯН, В.С. БАЛАСАНЯН, Э.М. ГЕВОРГЯН**  
**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СОПРЯЖЕНИЯ НЕЙРОНОВ В**  
**ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**  
*(Капан)*

Разработана имитационная модель сопряжения нейронов в нейросети строго-иерархической конфигурации, позволяющая свести имитацию сопряжения нейронов смежных слоев, т.е. формирование входного сигнала каждого слоя на основании выходного сигнала предыдущего слоя, к стандартной операции умножения матриц. Показано, что предложенная модель допускает распараллеливание процесса имитации передачи сигналов от нейронов каждого слоя к нейронам последующего слоя, что предоставляет возможность значительно ускорить процесс имитации при использовании многопроцессорных компьютеров.

Применение предложенной модели сопряжения позволяет при проведении компьютерных экспериментов ввести необходимые изменения в матрицы сопряжения смежных слоев в соответствии с конкурирующими вариантами структур исследуемой нейросети в процессе экспериментов, без изменения базовой имитационной программы.

**Ключевые слова:** нейрон, слой, контакт, имитация, эксперимент, сопряжение, структура, канал.

**Введение.** Одной из основных проблем, возникающих при программной реализации сложных искусственных многослойных нейронных сетей, является разработка процедуры имитации сопряжения нейронов смежных слоев, позволяющей обеспечить удобство и простоту проведения компьютерных экспериментов и уменьшить при этом объем перепрограммирования [1, 2].

Суть этой проблемы заключается в том, что при рассмотрении на компьютерной модели конкурирующих вариантов структуры исследуемой нейросети возникает необходимость модификации исходной (базовой) имитационной программы, что обусловлено изменением структуры связей между нейронами смежных слоев.

В настоящей работе предлагается компьютерная модель сопряжения нейронов смежных слоев в нейросети строго-иерархической конфигурации, позволяющая успешно решить указанную выше проблему.

Предлагаемая модель базируется на математической модели сопряжения элементов в строго-иерархической стратифицированной системе [3, 4], рассматривающей взаимодействие между элементами в рамках механизма обмена сигналами [5], который опирается на следующие предположения,

вытекающие из наблюдений над формализованными реальными сложными нейросетями:

1. Взаимное влияние нейронов внутри сети, а также взаимодействие между ней и внешней средой реализуется только посредством обмена сигналами.

2. Входной сигнал  $x^\mu(t) \in X^\mu$  ( $X^\mu$  - множество входных сигналов слоя  $S^\mu$ ), поступающий к слою  $S^\mu$  в момент времени  $t$ , можно рассматривать как упорядоченную совокупность сигналов  $x_i^\mu(t)$ ,  $i \in I^\mu = \{1, 2, \dots, p_\mu\}$ , одновременно поступающих на входы его элементов (нейронов)  $S_i^\mu$ ,  $i \in I^\mu$ :

$$x^\mu(t) = (x_1^\mu(t), x_2^\mu(t), \dots, x_{p_\mu}^\mu(t)).$$

В свою очередь, входной сигнал  $x_i^\mu(t)$ , поступающий к нейрону  $S_i^\mu$  в момент времени  $t$ , можно представить в виде упорядоченной совокупности элементарных сигналов  $x_{in}^\mu(t)$ ,  $n \in N_i^\mu = \{1, 2, \dots, n_i^\mu\}$ , одновременно поступающих на его вход:

$$x_i^\mu(t) = (x_{i,1}^\mu(t), x_{i,2}^\mu(t), \dots, x_{i,n_i}^\mu(t)).$$

Аналогично, выходной сигнал  $y^\mu(t) \in Y^\mu$  ( $Y^\mu$  - множество выходных сигналов слоя  $S^\mu$ ), выдаваемый слоем  $S^\mu$  в момент времени  $t$ , можно рассматривать как упорядоченную совокупность сигналов  $y_i^\mu(t)$ ,  $i \in I^\mu$ , одновременно выдаваемых нейроном слоя  $S^\mu$ , а выходной сигнал  $y_i^\mu(t)$  нейрона  $S_i^\mu$  - как упорядоченную совокупность элементарных сигналов  $y_{il}^\mu(t)$ ,  $l \in L_i^\mu = \{1, 2, \dots, l_i^\mu\}$ , одновременно выдаваемых нейроном  $S_i^\mu$ .

Предположения 1 и 2 основываются на том, что взаимодействие нейронов в процессе функционирования реальной нейросети рассматривается как результат совокупности воздействий (сигналов) каждого нейрона на другие нейроны. Сигнал представляет собой воздействие, представленное набором характеристик.

3. Элементарные сигналы передаются в нейросети независимо друг от друга по элементарным каналам связи, причем каждый элементарный канал, подключенный к выходу нейрона  $S_i^\mu$ , способен передавать только элементарные сигналы, принадлежащие одному из множеств  $Y_{in}^\mu$ ,  $n \in N_i^\mu$ .

Предположение 3 сформулировано на основе того, что для функционирования реальной нейросети существенно лишь наличие на входе каждого нейрона в данный момент времени соответствующего набора характеристик, описывающих сигнал. Данное предположение допускает следующую интерпретацию.

Вход каждого нейрона нейросети представляет собой упорядоченную совокупность элементарных входов или входных контактов. Множество входных контактов нейрона  $S_i^\mu$  обозначено  $K_i^\mu$ . Каждый входной контакт  $k_{in}^\mu \in K_i^\mu$  предназначен для приема только элементарных сигналов  $x_{in}^\mu \in X_i^\mu$ . Аналогично, выход каждого нейрона нейросети представляет собой упорядоченную совокупность выходных контактов. Каждый выходной контакт  $c_{il}^\mu \in C_i^\mu$  ( $C_i^\mu$  - множество выходных контактов нейрона  $S_i^\mu$ ) нейрона  $S_i^\mu$  предназначен только для выдачи элементарных сигналов  $y_{il}^\mu \in Y_{il}^\mu$ .

Вход каждого слоя  $S^\mu$  представляет собой упорядоченную совокупность  $K^\mu$  входных контактов всех нейронов  $S_i^\mu$ ,  $i \in I^\mu$  данного слоя:

$$K^\mu = \bigcup_{i \in I^\mu} K_i^\mu.$$

Соответственно, выход слоя  $S^\mu$  представляет собой упорядоченную совокупность  $C^\mu$  выходных контактов всех нейронов  $S_i^\mu$ ,  $i \in I^\mu$ :

$$C^\mu = \bigcup_{i \in I^\mu} C_i^\mu.$$

Элементарные сигналы, выдаваемые данным выходным контактом слоя  $S^{\mu-1}$ , передаются некоторому входному контакту слоя  $S^\mu$  лишь в том случае, если эти контакты соединены между собой элементарным каналом связи.

4. К каждому входному контакту нейрона или слоя подключается не более одного элементарного канала связи; к каждому выходному контакту слоя  $S^{\mu-1}$  может быть подключено конечное число элементарных каналов при условии, что к входу одного и того же нейрона слоя  $S^\mu$  подключается лишь один из этих каналов. Следовательно, число элементарных каналов, подключенных к любому выходному контакту слоя  $S^{\mu-1}$ , не может превышать числа элементов страты  $S^\mu$ , а число выходных контактов слоя  $S^{\mu-1}$  не может быть больше числа входных контактов страты  $S^\mu$ .

Данное предположение сформулировано с целью исключения неоднозначности входного сигнала за счет возможного появления на его входе в дан-

ный момент времени нескольких (несовпадающих) сигналов, поступающих из разных источников.

5. Нейроны слоя  $S^\mu$  могут принять только сигналы, выдаваемые элементами слоя  $S^{\mu-1}$ .

Предположение 5 вытекает из строго-иерархической конфигурации многих сложных реальных нейронных сетей.

Предположения 4 и 5 следует рассматривать как ограничение на структуру сети элементарных каналов связи в нейросети.

6. Сигналы передаются по элементарным каналам связи мгновенно и без искажений.

Данное предположение допускает рассмотрение реального канала связи как совокупность самостоятельных элементов нейросети, функционирование которой сводится к соответствующим задержкам и искажениям сигналов, и фиктивного (идеализированного) канала, передающего сигналы мгновенно и без искажений.

Необходимо отметить, что аналогичные предположения лежат в основе математической модели сопряжения элементов в сложной системе, разработанной Н.П. Бусленко [5], широкое практическое применение которой свидетельствует о ее адекватности исследуемым системам.

Математическая модель сопряжения любых двух нейронов  $S_i^\mu \in S^\mu$  и  $S_j^{\mu-1} \in S^{\mu-1}$  представляет собой пару множеств  $K_i^\mu$ ,  $C_j^{\mu-1}$  и однозначный оператор  $R_{ij}^\mu$ , реализующий отображение  $c_{jl}^{\mu-1} = R_{ij}^\mu(k_{in}^\mu), l \in L_j^{\mu-1}, n \in N_i^\mu$ .

Оператор сопряжения  $R_{ij}^\mu$  ставит в соответствие данному входному контакту  $k_{in}^\mu \in K_i^\mu$  нейрона  $S_i^\mu$  слоя  $S^\mu$  единственный выходной контакт  $c_{jl}^{\mu-1} \in C_j^{\mu-1}$  нейрона  $S_j^{\mu-1}$  слоя  $S^{\mu-1}$ , связанный с ним элементарным каналом связи. Следовательно, в область определения оператора  $R_{ij}^\mu$  входят лишь те входные контакты нейрона  $S_i^\mu$ , которые связаны с выходными контактами нейрона  $S_j^{\mu-1}$  элементарными каналами связи.

Оператор  $R_{ij}^\mu$  задается в виде бинарной матрицы  $A_{ij}^\mu$  размера  $(l_j^{\mu-1} \times n_i^\mu)$ , столбцы и строки которой соответствуют входным и выходным контактам элементов  $S_i^\mu$  и  $S_j^{\mu-1}$ .

Структура связей между каждым элементом  $S_i^\mu$  и стратой  $S^{\mu-1}$  описывается оператором сопряжения  $R_i^\mu$ :

$$c_{jl}^{\mu-1} = R_i^\mu(k_{in}^\mu), j \in I^{\mu-1}, l \in L_j^{\mu-1}, n \in N_i^\mu,$$

реализующим отображение (инъекцию)  $K_i^\mu \rightarrow C^{\mu-1}$ , ставящим в соответствие каждому входному контакту  $k_{in}^\mu \in K_i^\mu$  нейрона  $S_i^\mu$  страты  $S^\mu$  единственный выходной контакт  $c_{jl}^{\mu-1} \in C^{\mu-1}$  слоя  $S^{\mu-1}$  соединенный с контактом  $k_{in}^\mu$  элементарным каналом связи.

В отличие от оператора  $R_{ij}^\mu$ , реализующего функцию  $K_i^\mu \rightarrow C_j^{\mu-1}$ , оператор  $R_i^\mu$  всюду определен на множестве контактов элемента  $S_i^\mu$ . Область значений оператора  $R_i^\mu$  представляет собой совокупность всех тех выходных контактов слоя  $S^{\mu-1}$ , которые соединены с входными контактами нейрона  $S_i^\mu$ .

Оператор  $R_i^\mu$  задается бинарной матрицей  $A_i^\mu = \left| A_{i1}^\mu, A_{i2}^\mu, \dots, A_{ip^\mu}^\mu \right|^T$  размера  $\left( \sum_{j \in I^{\mu-1}} l_j^{\mu-1} \times n_i^\mu \right)$ .

Для описания структуры связей между смежными слоями  $S^\mu$  и  $S^{\mu-1}$  введен оператор сопряжения  $R^\mu$ :

$$c_{jl}^{\mu-1} = R^\mu(k_{in}^\mu), i \in I^\mu, j \in I^{\mu-1}, l \in L_j^{\mu-1}, n \in N_i^\mu,$$

реализующим отображение (сюръекцию)  $K^\mu \rightarrow C^{\mu-1}$ . В силу предположения 5, область значений оператора  $R^\mu$  совпадает с множеством выходных контактов  $C^{\mu-1}$  слоя  $S^{\mu-1}$ . Оператор  $R^\mu$  задается матрицей  $A^\mu = \left| A_1^\mu, A_2^\mu, \dots, A_{p^\mu}^\mu \right|$  размера

$$\left( \sum_{j \in I^{\mu-1}} l_j^{\mu-1} \times \sum_{i \in I^\mu} n_i^\mu \right).$$

Необходимо отметить, что, несмотря на громоздкость матрицы  $A^\mu$ , она обладает тем преимуществом по сравнению с более компактной таблицей сопряжения [3,4], что позволяет применять методы теории матриц и теории графов при изучении структуры сопряжения нейронов в нейросети, а также существенно упрощает процедуру имитации сопряжения смежных слоев.

**Контактная модель сопряжения нейронов в нейросети.** Формально сопряжение любых смежных слоев  $S^{\mu-1}$  и  $S^\mu$ , т.е. формирование входного сигнала  $x^\mu(t)$  слоя  $S^\mu$  на основе выходного сигнала  $y^{\mu-1}(t)$  слоя  $S^{\mu-1}$  с использованием модели сопряжения  $\langle K^\mu, C^\mu, R^\mu \rangle$ , можно описать с помощью фиктивного слоя  $\hat{S}^\mu$  следующим образом.

Согласно принятым предположениям 2 и 5, входной сигнал любого слоя формируется исключительно из выходных элементарных сигналов слоя  $S^{\mu-1}$ . Следовательно, в силу предположения 6, каждому выходному сигналу  $y^{\mu-1}(t) \in Y^{\mu-1}$  слоя  $S^{\mu-1}$  можно поставить в соответствие единственный, вполне определенный входной сигнал  $x^\mu(t) \in X^\mu$  слоя  $S^\mu$ , и наоборот. Тогда, с формальной точки зрения, можно считать, что между любыми смежными слоями  $S^{\mu-1}$  и  $S^\mu$  расположен некоторый фиктивный слой  $\hat{S}^\mu$ , преобразующий выходные сигналы слоя  $S^{\mu-1}$  в соответствующие им входные сигналы слоя  $S^\mu$  в соответствии с матрицей  $A^\mu$ .

Введение фиктивных слоев  $\hat{S}^\mu$ ,  $\mu \in I = \{1, 2, \dots, k\}$  позволяет из рассмотренных моделей сопряжения нейронов и слоев в нейросети перейти к эквивалентной, более удобной в теоретическом и прикладном отношении контактной модели сопряжения, которая предполагает передачу и прием сигналов слоев непосредственно через их контакты, без элементарных каналов связи.

В рамках механизма обмена сигналами каждый фиктивный слой  $\hat{S}^\mu$  описывается множествами входных контактов  $\hat{K}^\mu = C^{\mu-1}$  и выходных контактов  $\hat{C}^\mu = K^\mu$ .

Функционирование каждого фиктивного слоя  $\hat{S}^\mu$ , как временной статической системы без памяти [6], детерминировано и описывается оператором  $V^\mu$ :

$$x^\mu(t) = V^\mu(y^{\mu-1}(t)),$$

реализующим однозначное отображение  $Y^{\mu-1} \rightarrow X^\mu$ .

С целью выяснения сути оператора  $V^\mu$  и выявления его аналитического вида рассмотрим следующий пример.

Пусть структура связей между нейронами слоев  $S^\mu$  и  $S^{\mu-1}$  имеет конфигурацию, изображенную на рис. 1.

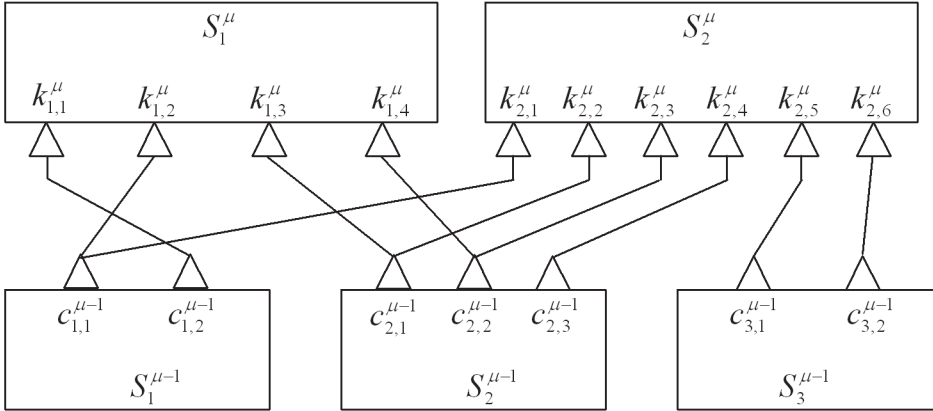


Рис. 1. Структура связей между нейронами слоев  $S^{\mu-1}$  и  $S^\mu$

Путем введения фиктивного слоя  $\hat{S}^\mu$  рассмотренную структуру представим в виде, показанном на рис. 2.

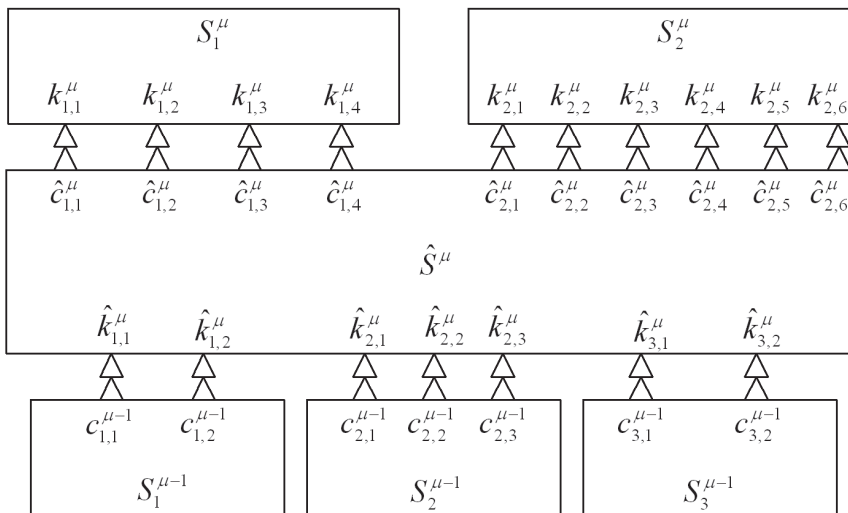


Рис. 2. Сопряжение слоев  $S^{\mu-1}$  и  $S^\mu$  с помощью фиктивного слоя  $\hat{S}^\mu$

		$x_{1,4}^\mu = y_{2,2}^{\mu-1}$									
$S^{\mu-1} \backslash S^\mu$	$k_{1,1}^\mu$	$k_{1,2}^\mu$	$k_{1,3}^\mu$	$k_{1,4}^\mu$	$k_{2,1}^\mu$	$k_{2,2}^\mu$	$k_{2,3}^\mu$	$k_{2,4}^\mu$	$k_{2,5}^\mu$	$k_{2,6}^\mu$	
$c_{1,1}^{\mu-1}$		1		1	1						
$c_{1,2}^{\mu-1}$	1			1							
$c_{2,1}^{\mu-1}$			1		1						
$c_{2,2}^{\mu-1}$				1		1					
$c_{2,3}^{\mu-1}$							1				
$c_{3,1}^{\mu-1}$									1		
$c_{3,2}^{\mu-1}$										1	

Рис. 3. Матрица  $A^\mu$  сопряжения страт  $S^{\mu-1}$  и  $S^\mu$

В силу предположения 3, каждый входной контакт  $k_{in}^\mu \in K^\mu$  может принимать только входной элементарный сигнал  $x_{in}^\mu(t) \in X_{in}^\mu$  слоя  $S^\mu$ , а каждый выходной контакт  $c_{jl}^{\mu-1} \in C^{\mu-1}$  может выдавать только выходной элементарный сигнал  $y_{jl}^{\mu-1}(t) \in Y_{jl}^{\mu-1}$  слоя  $S^{\mu-1}$ . Следовательно, данный входной элементарный сигнал  $x_{in}^\mu(t)$  представляет собой некоторый выходной элементарный сигнал  $y_{jl}^{\mu-1}(t)$ , если контакт  $k_{in}^\mu$  соединен с контактом  $c_{jl}^{\mu-1}$  элементарным каналом, т.е. на пересечении соответствующего столбца и строки матрицы  $A^\mu$  стоит единица. С учетом этого с помощью матрицы  $A^\mu$  для рассмотренной структуры сопряжения получим ( $t$  опущено)

$$\begin{aligned} x_{1,1}^\mu &= y_{1,2}^{\mu-1}; x_{1,2}^\mu = y_{1,1}^{\mu-1}; x_{1,3}^\mu = y_{2,1}^{\mu-1}; x_{1,4}^\mu = y_{2,2}^{\mu-1}; x_{2,1}^\mu = y_{1,1}^{\mu-1}; \\ x_{2,2}^\mu &= y_{2,1}^{\mu-1}; x_{2,3}^\mu = y_{2,2}^{\mu-1}; x_{2,4}^\mu = y_{2,3}^{\mu-1}; x_{2,5}^\mu = y_{3,1}^{\mu-1}; x_{2,6}^\mu = y_{3,2}^{\mu-1}. \end{aligned}$$

Нетрудно показать, что входной сигнал  $x^\mu(t)$  слоя  $S^\mu$  представляет собой результат операции умножения выходного сигнала (вектор-строки)  $y^{\mu-1}(t)$  слоя  $S^{\mu-1}$  на матрицу  $A^\mu$ :

$$\begin{aligned} (x_{1,1}^\mu, x_{1,2}^\mu, x_{1,3}^\mu, x_{1,4}^\mu, x_{2,1}^\mu, x_{2,2}^\mu, x_{2,3}^\mu, x_{2,4}^\mu, x_{2,5}^\mu, x_{2,6}^\mu) &= (y_{1,1}^{\mu-1}, y_{1,2}^{\mu-1}, y_{2,1}^{\mu-1}, y_{2,2}^{\mu-1}, y_{2,3}^{\mu-1}, y_{3,1}^{\mu-1}, y_{3,2}^{\mu-1}) \cdot A^\mu = \\ &= (y_{1,2}^{\mu-1}, y_{1,1}^{\mu-1}, y_{2,1}^{\mu-1}, y_{2,2}^{\mu-1}, y_{2,1}^{\mu-1}, y_{2,2}^{\mu-1}, y_{2,3}^{\mu-1}, y_{3,1}^{\mu-1}, y_{3,2}^{\mu-1}). \end{aligned}$$

Действительно, в результате умножения вектор-строки  $y^{\mu-1}$  на матрицу  $A^\mu$  получается вектор-строка  $x^\mu$ , каждый элемент  $x_{in}^\mu$  которой равен сумме произведений выходных элементарных сигналов  $y_{jl}^{\mu-1}$  слоя  $S^{\mu-1}$  на соответствующие элементы столбца  $(i,n)$  матрицы  $A^\mu$ :

В силу предположения 4, каждый столбец  $A^\mu$  содержит только один единичный элемент, расположенный на пересечении данного столбца  $(i,n)$  и той строки  $(j,l)$ , соответствующий контакт  $c_{jl}^{\mu-1}$  которой соединен с контактом  $k_{in}^\mu$  элементарным каналом связи. Следовательно, каждый элемент  $x_{in}^\mu$  вектор-строки  $x^\mu$  равен тому элементу  $y_{jl}^{\mu-1}$  вектор-строки  $y^{\mu-1}$ , который при вычислении  $x_{in}^\mu$  умножается на единичный элемент столбца  $(i,n)$  (остальные элементы вектор-строки  $y^{\mu-1}$  умножаются на нуль).

Таким образом, установлено, что оператор  $V^\mu$ , ставящий в соответствие каждому выходному сигналу  $y^{\mu-1}(t) \in Y^{\mu-1}$  слоя  $S^{\mu-1}$  входной сигнал  $x^\mu(t) \in X^\mu$  слоя  $S^\mu$ , реализует операцию умножения вектор-строки  $y^{\mu-1}(t)$  на матрицу  $A^\mu$ :

$$\begin{aligned} x^\mu(t) &= y^{\mu-1}(t) \cdot A^\mu = (y_1^{\mu-1}(t), y_2^{\mu-1}(t), \dots, y_{p_{\mu-1}}^{\mu-1}(t)) \cdot A^\mu = \\ &= (y_{1,l_1}^{\mu-1}(t), \dots, y_{1,l_1}^{\mu-1}(t), y_{2,l_2}^{\mu-1}(t), \dots, y_{2,l_2}^{\mu-1}(t), \dots, y_{p_{\mu-1},1}^{\mu-1}(t), \dots, y_{p_{\mu-1},l_{p_{\mu-1}}}^{\mu-1}(t)) \cdot A^\mu \end{aligned} \quad (1)$$

При этом, в силу принятых предположений о структуре сети каналов связи в нейросети, вектор-строка  $y^{\mu-1}(t)$  и матрица  $A^\mu$  всегда согласуются по форме  $[(y^{\mu-1}(t) \text{ имеет размер } (1 \times \sum_{j \in I^{\mu-1}} l_j^{\mu-1}))]$ , а матрица  $A^\mu - (\sum_{j \in I^{\mu-1}} l_j^{\mu-1}) \times (\sum_{i \in I^\mu} n_i^\mu)]$ .

Одно из привлекательных с практической точки зрения свойств фиктивных слоев  $\hat{S}^\mu$  заключается в том, что каждый оператор  $V^\mu$  можно представить в виде совокупности независимых друг от друга операторов  $V_i^\mu$ ,  $i \in I^\mu$ , каждый из которых реализует отображение  $x_i^\mu(t) = V_i^\mu(y^{\mu-1}(t))$ .

Для определения вида каждого оператора  $V_i^\mu$  представим матрицу  $A^\mu$  через блоки  $A_i^\mu$ ,  $i \in I^\mu$  и подставим в (1):

$$x^\mu(t) = y^{\mu-1}(t) \cdot [A_1^\mu, A_2^\mu, \dots, A_{p_\mu}^\mu] = [y^{\mu-1}(t) \cdot A_1^\mu ; y^{\mu-1}(t) \cdot A_2^\mu ; \dots ; y^{\mu-1}(t) \cdot A_{p_\mu}^\mu] \quad (2)$$

С другой стороны, в силу предположения 2, имеем

$$x^\mu(t) = (x_1^\mu(t), x_2^\mu(t), \dots, x_{p_\mu}^\mu(t)). \quad (3)$$

При сопоставлении соотношений (2) и (3) становится очевидным, что каждый оператор  $V_i^\mu$  реализует операцию умножения выходного сигнала (вектор-строки)  $y_i^{\mu-1}(t)$  слоя  $S^{\mu-1}$  на соответствующую матрицу  $A_i^\mu$ :

$$x_i^\mu(t) = y_i^{\mu-1}(t) \cdot A_i^\mu.$$

То обстоятельство, что каждый оператор  $V^\mu$  допускает декомпозицию на независимые друг от друга операторы  $V_i^\mu$ ,  $i \in I^\mu$ , предоставляет возможность распараллеливать процесс имитации передачи сигналов от любого слоя  $S^{\mu-1}$  к слою  $S^\mu$ .

Таким образом, процедура имитации сопряжения нейронов любых смежных слоев  $S^\mu$  и  $S^{\mu-1}$  в СИСС сводится к реализации стандартной операции умножения матриц, допускающей распараллеливание процесса имитации сопряжения нейронов в нейросети.

**Заключение.** Разработана имитационная модель сопряжения нейронов в нейросети строго-иерархической конфигурации, позволяющая свести процедуру имитации сопряжения нейронов ее смежных слоев, т.е. формирование входных сигналов нейронов  $\mu$ -го слоя на основе выходных сигналов нейронов  $(\mu-1)$ -го слоя, к реализации стандартной операции умножения матриц, допускающей распараллеливание процесса имитации сопряжения. Применение разработанной модели дает возможность при проведении компьютерных экспериментов с моделями нейросетей ввести необходимые изменения в матрицы сопряжения смежных слоев в соответствии с конкурирующими вариантами структуры исследуемой нейросети в ходе экспериментов, без изменения базовой имитационной программы, а также существенно ускорить моделирование при использовании многопроцессорных компьютеров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Цуриков А.Н.** Моделирование и обучение искусственных нейронных сетей.- Ростов: Изд-во Ростов. ун-та ПС, 2019.-112с.
2. **Гафаров Ф.М., Галимянов А.Ф.** Искусственные нейронные сети и их приложения: Учебное пособие.- Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 121 с.
3. **Баласанян С.Ш.** Метод стратифицированной формализации сложных технологических систем со многими состояниями // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 1. –С. 6–18.

4. **Баласанян С.Ш.** Стратифицированное моделирование сложных технологических систем. – Саарбрукен, Германия: LAP Lambert Academic Publishing, 2016.–385с.
5. **Сирота А.** Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем.-М.: Техносфера, 2006.-280с.
6. **Месарович М., Такахара И.** Общая теория систем: математические основы.-М.: Мир, 1978.-311с.

**Ս.Շ. ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ, Վ.Ս. ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ, Հ.Մ. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ**

**ԱՐՇԵՍՏԱԿԱՆ ՆԵՅՐՈՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑՈՒՄ ՆԵՅՐՈՆՆԵՐԻ ԼԾՈՐԴՄԱՆ  
ՆՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ՄՈԴԵԼ**

Մշակվել է խիստ հիերարխիական կառուցվածքով նեյրոնային ցանցերում նեյրոնների լծորդման նմանակային մոդել, որը թույլ է տալիս հարակից շերտերի նեյրոնների լծորդման նմանակումն իրականացնել մատրիցների բազմապատկման ստանդարտ գործողության միջոցով: Առաջարկվող լծորդման մոդելի կիրառումը թույլ է տալիս քումփյուրթերային գիտափորձերի ընթացքում հետազոտվող նեյրոցանցի մրցակցող կառուցվածքների տարբերակներին համապատասխան փոփոխություններ կատարել հարակից շերտերի լծորդման մատրիցներում՝ առանց փոփոխելու սկզբնական նմանակային ծրագիրը:

**Առանցքային բառեր.** նեյրոն, շերտ, շփում, նմանակում, փորձ, լծորդում, կառուցվածք, կապուղի:

**S.SH. BALASANYAN, V.S. BALASANYAN, H.M. GEVORGYAN**

**A SIMULATED MODEL OF NEURON CONJUGATION IN AN  
ARTIFICIAL NEURON NETWORK**

A simulation model of neuron conjugation in a neural network of a strictly hierarchical configuration has been developed, which makes it possible to reduce the imitation of the conjugation of neurons in adjacent layers, i.e. shaping the input signal of each layer based on the output signal of the previous layer to a standard matrix multiplication operation. It is shown that the proposed model allows parallelization of the process of simulating the transmission of signals from neurons of each layer to neurons of the next layer, which makes it possible, when using multiprocessor computers, to significantly accelerate the simulation process.

**Keywords:** neuron, layer, contact, simulation, experiment, conjugation, structure, channel.