

Математическое моделирование и анализ погрешностей измерительных преобразователей биомедицинских сигналов [Электронный ресурс] / А. А. Федотов, С. А. Акулов // ФИЗМАТЛИТ. – 2013. – 282 с. – Режим доступа: [www.ssau.ru/files/resources/sotrudniki/fizmatlit.pdf](http://www.ssau.ru/files/resources/sotrudniki/fizmatlit.pdf). 15. Антонюк О. Вимірювання параметрів імтансу живих тканин з відомими схемами заміщення [Текст] / О. Антонюк, М. Довгань, Є. Походило // Вимірювальна техніка та метрологія. 2014. – № 75. – С. 69–72. 16. Ярута В. А. Измерение электрических параметров живых тканей на основе их моделирования в виде эквивалентной схемы [Текст] / В. А. Ярута // Вестн. Нац. техн.ун-та «ХПИ». 2002. – № 18. – С. 133–142.

І. Цмоць<sup>1</sup>, О. Скорохода<sup>1</sup>, І. Ігнатєв<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний університет “Львівська політехніка”,

<sup>2</sup> Тернопільський національний економічний університет

## СИНТЕЗ КОМПОНЕНТІВ АПАРАТНИХ ПАРАЛЕЛЬНИХ НЕЙРОМЕРЕЖ ВЕРТИКАЛЬНО-ГРУПОВОГО ТИПУ

© Цмоць І., Скорохода О., Ігнатєв І., 2015

Розроблено паралельний метод вертикально-групового опрацювання даних у нейромережах, який порівняно з відомими підвищує швидкодію, збільшуючи розряди каналів надходження множників і кількості часткових добутоків, які формуються у результаті їхнього аналізу. Вибрано принципи побудови, розроблено модель та структуру формального нейрона вертикально-групового типу з мультиплексуванням шин вагових коефіцієнтів і даних, яка забезпечує узгодження інтенсивності надходження даних із обчислювальною здатністю нейроелемента зміною розрядності каналів надходження і кількості розрядів множників у групі, які одночасно аналізуються для формування часткових добутоків. Розглянуто основні етапи та методику синтезу паралельного нейроелемента вертикально-групового типу з високою ефективністю використання обладнання.

Ключові слова: нейроелемент, паралельний метод вертикально-групового опрацювання даних, модель формального нейрона, реальний час, ефективність використання обладнання.

An method of parallel vertical-group data processing in neural networks has been developed, which in comparison with known enhances performance by increasing the bit-width of input channels and the number of partial products, which are formed as a result of their analysis. Principles have been selected, the model and structure of formal neuron with vertical-group multiplexing of tire have been developed, which provides coordination of data flow intensity with computing ability of neuro element by changing bit-width of channel and number of digits in a group of factors that simultaneously analyzed for the formation of partial products. The main stages and methods of synthesis of parallel vertical neuro element of group type with high efficiency of equipment use have been reviewed.

Key words: neuro element, parallel method of vertically-group data processing, formal neuron model, real time, effectiveness of equipment use.

### Постановка проблеми

Створення високоефективних нейромережових засобів реального часу потребує широкого використання сучасної елементної бази, розроблення нових моделей нейрона, методів і алгоритмів, орієнтованих на реалізацію у вигляді надвеликих інтегральних схем (НВІС).

Режим реального часу та НВІС-реалізація нейромереж з високою ефективністю використання обладнання забезпечується розпаралелюванням і конвеєризацією процесів обчислення, апаратним відображенням структури нейромережових алгоритмів у архітектуру, яка адаптована до інтенсивності надходження потоків даних. Орієнтація структур нейроелементів і нейромереж на НВІС-реалізацію вимагає зменшення кількості виводів інтерфейсу, міжнейронних зв'язків і апаратних затрат. Забезпечити ці вимоги можна за допомогою використання паралельних методів і структур нейроелементів і нейромереж, які адаптуються до інтенсивності надходження даних.

Для синтезу нейроелементів і нейромереж реального часу з високою ефективністю використання обладнання необхідно розробити нові моделі, паралельні методи опрацювання даних і НВІС-структури нейронів, які забезпечують узгодження інтенсивності надходження даних з їхньою обчислювальною здатністю. Розробляти такі нейроелементи та нейромережі найдоцільніше на основі інтегрального підходу, який охоплює сучасну елементну базу, моделі та НВІС-структури нейроелементів, архітектури нейромереж, паралельні методи обчислень і враховує вимоги конкретних застосувань.

Тому актуальною проблемою є розроблення НВІС-компонентів апаратних нейромереж реального часу, які можуть адаптовуватися до інтенсивності надходження даних.

### Аналіз публікацій

Основними компонентами апаратних нейромереж є штучні нейроелементи. Існують різні моделі штучного нейрона. Вибір моделі штучного нейрона залежить від вимог конкретних застосувань. У [1, 2] розглянуто відомі моделі штучного нейрона і визначено їхні недоліки та переваги. Найпростіша модель штучного нейрона – модель Маккаллоха–Піттса [3] – забезпечує підсумовування  $N$  зважених входів і здійснює нелінійне перетворення. Нейрони цього виду відрізняються між собою видом функції активації, значеннями порогу та ваговими коефіцієнтами. Значення виходу нейрона може бути як дискретним, так і неперервним у певній області (наприклад, між 0 та 1).

Майже одночасно з моделлю Маккаллоха–Піттса було запропоновано модель нейрона ADALINE [4] у вигляді адаптивного лінійного фільтра. Ця модель складається з двох частин: лінійного підсилювача з можливістю налаштування та дворівневого квантувача.

У загальному випадку вагові коефіцієнти нейронів можуть набувати від'ємних значень (гальмівні входи), нульового або додатних значень (збуджувальні входи). Вихід нейроелементів прямо пропорційний до значень збуджувальних входів та обернено пропорційний до гальмівних входів. У моделі Фукушіми [5] всі вагові коефіцієнти та входні сигнали набувають тільки невід'ємних значень.

Розглянуті моделі штучного нейрона є статичними і не здатними до моделювання динамічних процесів. Найпопулярнішою динамічною моделлю нейрона є нейрон Гопфілда [6]. Основними складовими цього нейрона є суматор зважених входів нейрона, інтегратор і нелінійний елемент із сигмоїдною функцією активації. Модель нейрона Гроссберга [7] є узагальненням моделі нейрона Гопфілда.

Більшість відомих моделей штучного нейрона є аналогами або модифікаціями розглянутих вище чотирьох моделей нейрона. Аналіз відомих моделей нейронів [1–7] показав, що вони не орієнтовані на НВІС-реалізацію, оскільки не ґрунтуються на елементарних арифметичних операціях і вимагають значної кількості виводів. Тому для апаратної реалізації нейромереж актуальною задачею є розроблення моделей формального нейрона, які орієнтовані на НВІС-реалізацію та просто адаптуються до вимог конкретного застосування.

Проаналізовано моделі та НВІС-структури формального нейрона паралельно-вертикального типу [8–10], які відрізняються між собою способом надходження та опрацювання вхідних даних та вагових коефіцієнтів – з використанням мультиплексування шин, із суміщенням процесів надходження та опрацювання даних та з табличним формуванням макрочасткових результатів. Недоліком цих моделей та НВІС-структур формального нейрона є відсутність можливості змінювати розрядність каналів надходження та опрацювання даних.

З аналізу публікацій [1-14] випливає, що синтез високоефективних компонентів апаратних нейромереж опрацювання даних у реальному часі вимагає розроблення нового методу опрацювання даних та НВІС-структур нейроелементів, які можуть адаптовуватися до інтенсивності надходження даних.

### Формування цілі статті

**Метою роботи** є розроблення паралельного методу вертикально-групового опрацювання даних у нейромережах, моделі та структури паралельного нейроелемента вертикально-групового типу з можливістю зміни розрядності каналів надходження і кількості розрядів множника у групі, що одночасно аналізуються для формування часткових добутків.

### Основна частина

**Паралельний метод вертикально-групового опрацювання даних у нейромережах.** Основними компонентами, на базі яких синтезуються апаратні нейромережі, є нейроелементи. При паралельно-вертикальному опрацюванні даних у нейроелементі входні дані  $X_j$  та вагові коефіцієнти  $W_j$  ( $j=1, \dots, N$ , де  $N$  – кількість входів даних і вагових коефіцієнтів) подаються у порозрядному вигляді згідно з формулою:

$$W_j = \sum_{i=1}^n 2^{-i} W_{ji}, \quad X_j = \sum_{i=1}^n 2^{-i} X_{ji}, \quad (1)$$

де  $W_{ji}, X_{ji}$  – значення  $i$ -х розрядів множників  $W_j$  і  $X_j$ ,  $n$  – розрядність множників.

У загальному випадку нейроелемент здійснює перетворення відповідно до формули:

$$y = f\left(\sum_{j=1}^N W_j X_j\right), \quad (2)$$

де  $y$  – вихідний сигнал нейроелемента,  $f$  – функція активації.

З формули (2) випливає, що опрацювання даних у нейроелементах зводиться до виконання таких етапів:

- обчислення скалярного добутку  $Z = \sum_{j=1}^N W_j X_j$ ;
- обчислення функції активації  $f$ .

Обчислення скалярного добутку в нейроелементі з використанням паралельно-вертикального опрацювання даних записується так:

$$Z = \sum_{j=1}^N W_j X_j = \sum_{i=1}^n 2^{-i} \sum_{j=1}^N W_{ji} X_{ji} = \sum_{i=1}^n 2^{-i} \sum_{j=1}^N P_{ji} = \sum_{i=1}^n 2^{-i} P_{Mi}, \quad (3)$$

де  $P_{ji}$  –  $ji$ -й частковий добуток,  $P_{Mi}$  –  $i$ -й макрочастковий добуток, який формується додаванням  $N$  часткових добутоків  $P_{ji}$ , тобто  $P_{Mi} = \sum_{j=1}^N P_{ji}$ .

З формули (3) випливає, що паралельно-вертикальне обчислення скалярного добутку виконується за  $n$  тактів, в кожному  $i$ -му такті виконуються такі операції:

- формування для кожного  $i$ -го розрядного зрізу  $X_{ji}$   $i$ -х часткових добутоків  $P_{ji}$ ;
- обчислення  $i$ -го макрочасткового добутку  $P_{Mi}$  підсумовуванням  $i$ -х часткових добутоків  $P_{ji}$ ;
- підсумовування макрочасткових добутоків  $P_{Mi}$  відповідно до виразу  $Z_h = 2^{-h} Z_{h-1} + P_{Mi}$ , де  $Z_0=0$ .

Основним шляхом підвищення швидкодії обчислення скалярного добутку є зменшення кількості тактів роботи, яке можна забезпечити за допомогою вертикально-групового опрацювання даних. При такому опрацюванні даних у нейроелементах входні дані  $X_j$  та вагові коефіцієнти  $W_j$  надходять групами із  $k$  розрядів. Для реалізації такого опрацювання входні дані  $X_j$  та вагові коефіцієнти  $W_j$  записуються так:

$$W_j = \sum_{h=1}^m 2^{-(h-1)k} W_{jh1} W_{jh2} \mathbf{K} W_{jhg}, \quad X_j = \sum_{h=1}^m 2^{-(h-1)k} X_{jh1} X_{jh2} \mathbf{K} X_{jhg}, \quad (4)$$

де  $m = \left\lceil \frac{n}{k} \right\rceil$ ,  $\lceil \cdot \rceil$  – знак заокруглення до більшого цілого числа.

Паралельний метод вертикально-групового обчислення скалярного добутку в нейроелементі ґрунтується на формулі:

$$\begin{aligned} Z &= \sum_{j=1}^N W_j X_j = \sum_{h=1}^m 2^{-(h-1)k} \sum_{j=1}^N (W_j X_{jh1} + 2^{-1} W_j X_{jh2} + \mathbf{K} + 2^{-(k-1)} W_j X_{jhk}) = \\ &= \sum_{i=1}^n 2^{-(h-1)} \sum_{j=1}^N P_{jh} = \sum_{h=1}^m 2^{-(h-1)} P_{Mh} \end{aligned} \quad (5)$$

де  $P_{jh}$  –  $jh$ -й груповий частковий добуток,  $P_{Mh}$  –  $h$ -й груповий макрочастковий добуток, який формується додаванням  $N$  групових часткових добутків  $P_{jh}$ , тобто  $P_{Mh} = \sum_{j=1}^N P_{jh}$ .

З формули (5) випливає, що паралельне вертикально-групове обчислення скалярного добутку виконується за  $m$  тактів, у кожному  $h$ -у такті виконуються такі операції:

- формування для кожної  $j$ -ї пари операндів  $k$  часткових добутків відповідно до формули  $P_{jhr} = W_j X_{jhr}$ , де  $r=1, \dots, k$ ;
- обчислення для  $j$ -ї пари операндів групового часткового добутку  $P_{jh}$  відповідно до формули  $P_{jh} = \sum_{r=1}^k 2^{-(r-1)} W_j X_{jhr}$ ;
- обчислення  $h$ -о макрочасткового добутку  $P_{Mh}$  шляхом підсумовування  $h$ -х часткових добутків  $P_{jh}$  відповідно до формули  $P_{Mh} = \sum_{j=1}^N P_{jh}$ ;
- підсумовування макрочасткових добутків  $P_{Mh}$  відповідно до виразу  $Z_h = 2^{-h} Z_{h-1} + P_{Mh}$ , де  $Z_0=0$ .

Аналіз формул (3) і (5) показує, що основою опрацювання даних у нейроелементі є операція групового підсумовування:

$$Z = \sum_{j=1}^M C_j, \quad (6)$$

де  $M$  – кількість часткових результатів;  $C_j$  –  $j$ -й частковий результат.

Нехай доданки  $C_j$  є двійковими  $n$ -розрядними додатними числами, меншими за одиницю, які записуються так:

$$C_j = \sum_{i=1}^n 2^{-i} C_{ji}. \quad (7)$$

Підставивши значення (7) до формули (6), отримаємо:

$$C = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^n 2^{-i} C_{ji}. \quad (8)$$

Формула (8) відображає горизонтальну модель обчислення оператора групового підсумовування. Замінивши у формулі (8) порядок підсумовування, переходимо до вертикальної моделі обчислення оператора групового підсумовування, яка записується так:

$$C = \sum_{i=1}^n 2^{-i} \sum_{j=1}^{M_i} C_{ji}, \quad (9)$$

де  $M_i$  – кількість доданків у  $i$ -му розрядному зрізі.

У цій моделі групового підсумовування процес підсумовування зводиться до перетворення багаторядного коду на однорядний.

**Принципи побудови та варіанти реалізації паралельного нейроелемента вертикально-групового типу.** Розробляти НВІС-структуру паралельного нейроелемента вертикально-групового типу для синтезу нейромереж реального часу з високою ефективністю використання обладнання пропонується на основі інтегрованого підходу, який ґрунтується на можливостях сучасної елементної бази, охоплює методи, алгоритми і НВІС-структури, враховує вимоги конкретних застосувань і інтенсивності надходження даних.

Для найповнішого використання переваг сучасної НВІС-технології в основу побудови паралельного нейроелемента вертикально-групового типу запропоновано покласти такі принципи [4]:

- використання базису елементарних арифметичних операцій;
- узгодженості інтенсивності надходження даних з обчислювальною здатністю нейроелемента;
- конвеєризації та просторового паралелізму;
- реалізації алгоритмів обчислення скалярного добутку як єдиної макрооперації;
- регулярності, модульності та широкого використання стандартних елементів;
- локалізації та зменшення кількості зв'язків між елементами пристрою;
- адекватного апаратного відображення узгодженого потокового графу алгоритму реалізації нейроелемента.

Структурна організація паралельного нейроелемента визначається за множиною ознак, основними з яких є:

- режими роботи;
- методи обчислення;
- спосіб організації зв'язків між елементами.

За режимами роботи нейроелементи можна поділити на синхронні та асинхронні. В останньому випадку такі нейроелементи називають одноктактними, оскільки опрацьовують вхідні дані без проміжних запам'ятовувань. Швидкодія одноктактного нейроелемента визначається часом спрацювання елементів, що лежать на найдовшому шляху проходження даних. Одноктактні нейроелементи є послідовними з погляду реалізації ярусів потокового графу алгоритму. У одноктактних нейроелементах процесорні елементи (ПЕ), які реалізують функціональні оператори, починаючи з верхнього ярусу, поступово виключаються з процесу обчислення і не використовуються до завершення обчислення. Це є причиною обмеженої швидкодії і неефективного використання обладнання при обробці потоків даних. Обчислювальну здатність одноктактних нейроелементів визначають так:

$$D_{оп} = \frac{m_o n_o}{\sum_{j=1}^h \max L t_{ПЕ_j}}, \quad (10)$$

де  $L$  – кількість послідовно з'єднаних ПЕ;  $m_o$  – кількість каналів опрацювання даних;  $n_o$  – розрядність каналів опрацювання даних;  $t_{ПЕ_j}$  – час реалізації ПЕ найскладніших функціональних операторів  $\Phi_j$ .

Для опрацювання інтенсивних потоків даних доцільно використовувати синхронні паралельні нейроелементи вертикально-групового типу, опрацювання в яких здійснюється за конвеєрним принципом. Конвеєрні нейроелементи розбиваються на сходинки буферними регістрами. Для забезпечення високої швидкодії та ефективності використання обладнання ПЕ сходинки конвеєрних нейроелементів повинні реалізовувати якомога простіші функціональні оператори з приблизно рівним часом виконання. У конвеєрі при подачі тактових імпульсів здійснюються обчислення функціональних операторів і запис результатів у буферні регістри. Обчислювальну здатність конвеєрних нейроелементів визначають так:

$$D_{OP} = \frac{m_o n_o}{t_{P_2} + t_{PE}}, \quad (11)$$

де  $t_{P_2}$  – час запису в реєстр;  $t_{PE}$  – час спрацювання ПЕ.

*Варіанти реалізації нейроелемента* при паралельному вертикально-груповому опрацюванні даних залежать від:

1. *Способу надходження даних:*
  - паралельно-групове надходження вхідних даних  $X_{jh}$  і вагових коефіцієнтів  $W_{jh}$ ;
  - почергове паралельно-групове надходження вхідних даних  $X_{jh}$  і вагових коефіцієнтів  $W_{jh}$ ;
  - суміщення процесу паралельно-групового надходження вхідних даних  $X_{jh}$  і табличного формування і підсумовування макрочасткових добутоків  $P_{Mi}$ .
2. *Формування для кожного групового зрізу часткових добутоків  $W_j X_{jkh}$ :*
  - із прямим формуванням;
  - на основі попередніх обчислень.
3. *Обчислення групового часткового добутку  $P_{jh}$ :*
  - послідовне;
  - паралельне;
  - послідовно-паралельне;
  - табличне
4. *Обчислення макрочасткового добутку  $P_{Mh}$ :*
  - послідовне;
  - паралельне;
  - послідовно-паралельне;
  - табличне.
5. *Обчислення функції активації  $f$ :*
  - послідовне;
  - паралельне;
  - табличне та таблично-алгоритмічне.

Підвищити швидкодію паралельного вертикально-групового опрацювання даних у нейроеlementі можна так [5]:

- зменшенням часу формування часткових добутоків  $W_j X_{jkh}$ ;
- збільшенням розрядності  $g$  груп надходження та опрацювання вхідних даних  $X_j$  та вагових коефіцієнтів  $W_j$ ;
- зменшенням часу обчислення групового часткового добутку  $P_{jh}$ ;
- зменшенням часу обчислення макрочасткового добутку  $P_{Mh}$ ;
- зменшенням часу підсумовування макрочасткових добутоків  $P_{Mh}$ .

**Модель формального нейрона вертикально-групового типу з мультиплексуванням шин вагових коефіцієнтів і даних.** Модель формального нейрона вертикально-групового типу з мультиплексуванням шин вагових коефіцієнтів і даних аналітично записується так:

$$y = f_{(p-g)}(f_a(f_z(f_{P_{Mh}}(f_{P_{jh}}(f_{P_{jhr}}(f_{(g-p)}(w_{jkh})x_{jhr})))))), \quad (12)$$

де  $y$  – вихід результату;  $f_{(p-g)Y} : R^n \rightarrow R^g$  – функціонал паралельно-групового перетворення результату  $Y$ ;  $f_a(Z)$  – функція активації;  $f_z$  – обчислення суми макрочасткових результатів відповідно до формули  $Z_h = 2^{-h} Z_{i-1} + P_{Mi}$ ,  $Z_0 = 0$ ;  $f_{P_{Mi}}$  – обчислення  $h$ -го макрочасткового добутку  $P_{Mh}$  шляхом підсумовування  $h$ -х часткових добутоків  $P_{jh}$  відповідно до формули  $P_{Mh} = \sum_{j=1}^N P_{jh}$ ;  $f_{P_{jh}}$  – обчислення для  $j$ -ї пари операндів групового часткового добутку  $P_{jh}$  відповідно до формули

$P_{jh} = \sum_{r=1}^k 2^{-(r-1)} W_j X_{jhr}$ ;  $f_{Pjhr}$  – формування для кожної  $j$ -ї пари операндів  $k$  часткових добутків відповідно до формули  $P_{jhr} = W_j X_{jhr}$ , де  $r=1, \dots, k$ ;  $f_{(g-p)} W_{jhk} : R^g \rightarrow R^n$  – оператор групового паралельного перетворення вагових коефіцієнтів  $W_j$ .

Структуру моделі формального нейрона паралельно-вертикального типу з мультиплексуванням шин вагових коефіцієнтів і даних, яка реалізує вираз (12), подано на рис. 1.

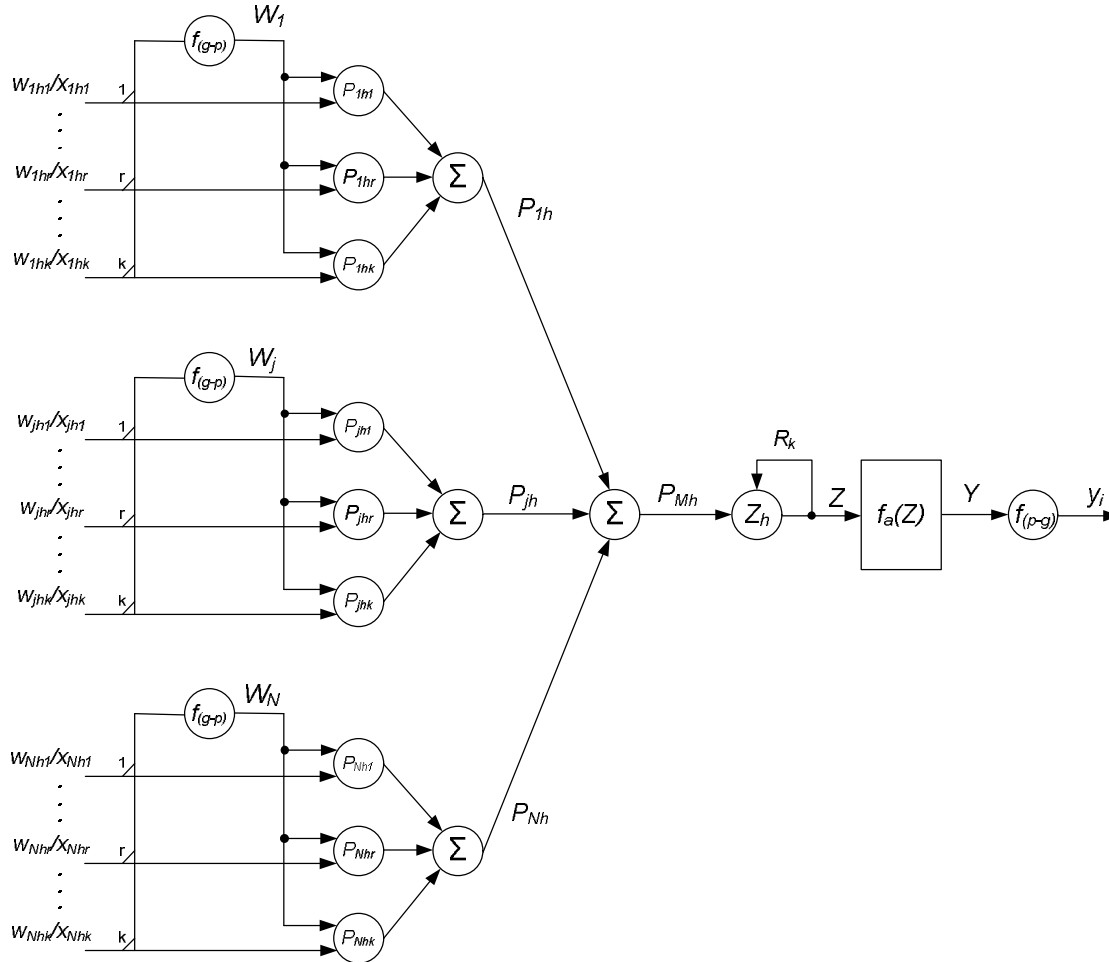


Рис. 1. Модель формального нейрона вертикально-групового типу з мультиплексуванням шин вагових коефіцієнтів і даних

Основними компонентами цієї моделі є: групо-паралельні перетворювачі  $f_{(g-p)_j}$ , формувачі часткових добутків  $P_{jhr}$ ,  $K$ -входові та  $N$ -входовий суматори, підсумовувач макрочасткових результатів  $Z_h = 2^{-k} Z_{h-1} + P_{Mh}$ , обчислювач функції активації  $f_a(Z)$  і паралельно-груповий перетворювач  $f_{(p-s)}$ . Для зменшення розрядності підсумовувача макрочасткових результатів надходження вагових коефіцієнтів, вхідних даних і формування часткових добутків  $P_{jhr}$  доцільно здійснювати, починаючи з молодших розрядів. Особливістю цієї моделі є надходження вагових коефіцієнтів і даних групами з  $k$  розрядів та формування для кожної  $j$ -ї пари операндів  $k$  часткових добутків  $P_{jhr}$ . Така особливість забезпечує зменшення в  $k$ -разів кількості тактів роботи. Одним із критеріїв вибору кількості розрядів у групі є узгодження інтенсивності надходження даних із обчислювальною здатністю нейроелемента.

**Задача та етапи синтезу паралельного нейроелемента вертикально-групового типу.** Задача синтезу паралельного нейроелемента вертикально-групового типу зводиться до формування

множин вимог  $\mathbf{R}=\{R_1, R_2, \dots, R_k\}$ , характеристик  $\mathbf{H}=\{H_1, H_2, \dots, H_m\}$  і обмежень  $\mathbf{B}=\{B_1, B_2, \dots, B_k\}$  та знаходження такого вектора  $\mathbf{H}^*=[H_1^*, H_2^*, \dots, H_m^*]$ ,  $H_i^*=f_i(R, H, B)$ ,  $i=1, \dots, m$ , який забезпечить максимальне значення ефективності використання обладнання  $E=\max f(R, H^*, B)$ .

Множина вимог  $\mathbf{R}$  складається з:  $R_1$  – кількості каналів надходження даних  $m_d$ ;  $R_2$  – розрядності каналів надходження даних  $n_d$ ;  $R_3$  – частоти надходження даних  $F_d$ ;  $R_4$  – швидкодії елементної бази, яка визначається часом затримки вентиля  $t_e$ ;  $R_5$  – кількості вхідних даних  $X_j$  і вагових коефіцієнтів  $W_j$ ;  $R_6$  – розрядності вхідного слова  $n$ . Множину характеристик  $\mathbf{H}$  становлять:  $H_1$  – загальна кількість зв'язків  $Z$ ;  $H_2$  – просторова зв'язкова віддаль  $\Delta j$ ;  $H_3$  – конвеєрний такт  $t_k$ ;  $H_4$  – витрати обладнання  $W$ ;  $H_5$  – кількість видів функціональних вузлів  $s$ ;  $H_6$  – кількість каналів введення  $m_{ee}$ ;  $H_7$  – розрядність каналів введення  $n_{ee}$ ;  $H_8$  – кількість виводів інтерфейсу зв'язку  $Y$ . Обмеження  $\mathbf{B}$ , які необхідно враховувати при синтезі паралельного нейроелемента вертикально-групового типу, є такими:  $B_1$  – точність обчислення, яка визначається розрядністю результату  $n_p$ ;  $B_2$  – час обчислення  $T_{обч}$  повинен бути  $T_{обч} \leq T_{обм}$ , де  $T_{обч} = \frac{t_k N n}{m_{ee} n_{ee}}$ ;  $T_{обм}$  – час обміну, який визначається так:  $T_{обм} = \frac{N n}{F_d m_d n_d}$ .

Для вибору варіанта паралельного нейроелемента вертикально-групового типу використовується критерій ефективності використання обладнання  $E$ , який враховує кількість виводів інтерфейсу, однорідність структури, кількість і локальність зв'язків, зв'язує продуктивність з витратами обладнання та дає оцінку елементам (вентиліам) компонента за продуктивністю [9,13]. Кількісну величину ефективності використання обладнання для такого компонента визначають так:

$$E = \frac{m_k n_k}{t_k N n (k_1 \sum_{i=1}^s W_{\phi V_i} d_i + k_2 Q + k_3 Y)}, \quad (12)$$

де  $W_{\phi V_i}$  – витрати обладнання у вентилях на реалізацію  $i$ -го функціонального вузла;  $d_i$  – кількість функціональних вузлів  $i$ -го типу;  $k_1$  – коефіцієнт врахування однорідності  $k_1=f(s)$ ;  $k_2$  – коефіцієнт врахування регулярності зв'язків  $k_2=f(\Delta j)$ ;  $k_3$  – коефіцієнт врахування кількості виводів інтерфейсу зв'язку  $k_3=f(Y)$ .

Конвеєрний такт  $t_k$  визначається за формулою  $t_k = \sum_j^l \max t_e$ , де  $l$  – кількість послідовно з'єднаних вентилів у найповільнішій сходинці конвеєра, а  $\Delta j$  – як різниця просторових індексів.

Синтез паралельного нейроелемента вертикально-групового типу складається із таких етапів: вибору та розроблення методів і алгоритмів обчислення скалярного добутку та функції активації, визначення основних параметрів та переходу від алгоритму до структури.

Під час вибору та розроблення методів і алгоритмів реалізації скалярного добутку та функції активації враховуються вимоги  $\mathbf{R}$  і характеристик  $\mathbf{H}$ , але визначальним є забезпечення обмежень  $\mathbf{B}$ . Для оцінювання розроблених алгоритмів використовуються інформаційні, операційні та точнісні характеристики. До інформаційних характеристик належать кількість констант, вхідних, вихідних і проміжних даних, кількість каналів та їхня розрядність, кількість і види операцій. Операційні характеристики дають змогу оцінити час реалізації та обчислювальну здатність. До точнісних характеристик алгоритму належать розрядність операційних пристроїв, способи округлення. У паралельних нейромережах реального часу одним із найважливіших параметрів є забезпечення балансу часу при проходженні даних через усі компоненти системи.

При синтезі паралельного нейроелемента вертикально-групового типу необхідно забезпечити обчислення скалярного добутку та функції активації в реальному часі при мінімальних апаратних затратах. Перехід від алгоритму розв'язання задачі в реальному часі до структури паралельного нейроелемента вертикально-групового типу формально зводиться до мінімізації апаратних затрат із забезпеченням режиму реального часу.



Для синтезу формального паралельного нейрона вертикально-групового типу з мультиплексуванням шин вагових коефіцієнтів і даних розроблено структуру, яку подано на рис. 2, де  $x_{11}/w_{11}, \dots, x_{Nk}/w_{Nk} - Nk$  мультиплексованих однорозрядних інформаційних входів;  $TI_1, TI_2$  – перший та другий тактові входи; ПУ – вхід початкової установки; БФЧД<sub>*j*</sub> – *j*-й блок формування часткових добутоків; Рг $x_{jh}$ , Рг $P_{jh}$ , Рг $P_{Mh}$  та Рг $Z_h$  – регістри відповідно: множника, *h*-го групового часткового добутку ( $h=1, \dots, m, m = \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor$ , *n* – розрядність множника  $W_j$ , *k* – кількість розрядів у групі), *h*-го макрочасткового добутку та *h*-ї суми макрочасткових результатів; Пер.*g-p* та Пер.*p-g* – групово-паралельний та паралельно-груповий перетворювачі; ФЧД – формувач часткових добутоків; См – суматор; ТФА – таблична функція активації.

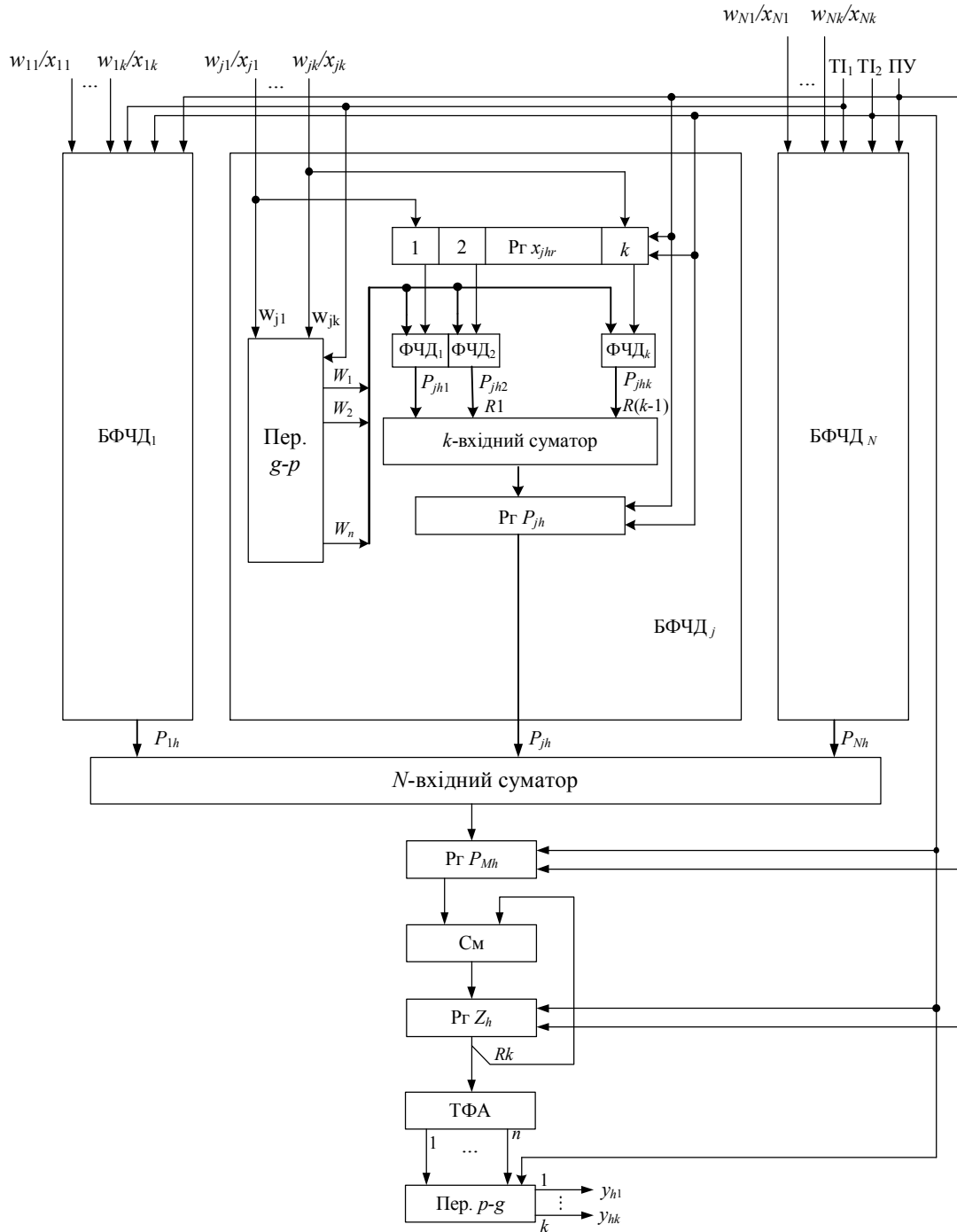


Рис. 2. Структура формального паралельного нейрона вертикально-групового типу з мультиплексуванням шин вагових коефіцієнтів і даних

Перед початком роботи імпульсом початкової установки, який надходить із входу ПУ, регістри  $RgX_{jh}$ ,  $RgP_{jh}$ ,  $RgP_{Mh}$  та  $RgZ_h$  у всіх блоках БФЧД встановлюються в нуль. Функціонування формального паралельного нейрона вертикально-групового типу з мультиплексуванням шин вагових коефіцієнтів і даних можна розбити на два етапи, кожний з яких виконується за  $m$  тактів.

На першому етапі в кожному  $h$ -му такті, починаючи з молодших розрядів, на  $j$ -й інформаційний вхід надходять  $k$  розрядів множника  $W_j$ . У перетворювачі Пер. $g-p$  виконується накопичення та паралельне перетворення множеного  $W_j$ .

На другому етапі у кожному  $h$ -у такті роботи в блоці БФЧД $_j$  для  $h$ -ї групи розрядів множника  $X_{jh1}X_{jh2}...X_{jhh}$  на виходах ФЧД $_1, ..., \text{ФЧД}_k$  формується  $k$  часткових добутоків у відповідно до формули  $P_{jhr} = W_j X_{jhr}$ . Сформовані часткові добутоків надходять на вхід  $k$ -входового суматора, причому  $r$ -й ( $r=1, ..., k$ ) частковий добуток  $W_j X_{jhr}$  зсунутий відносно  $(r-1)$ -о часткового добутку  $W_j X_{jh(r-1)}$  на один розряд праворуч. Додаванням часткових добутоків на виході  $k$ -входового суматора отримуємо груповий частковий добуток  $P_{jh}$  відповідно до формули:

$$P_{jh} = \sum_{r=1}^k 2^{-(r-1)} W_j X_{jhr} . \quad (13)$$

Сформований груповий частковий добуток  $P_{jh}$  записується у регістр  $RgP_{jh}$ . Групові часткові добутоків  $P_{jh}$  з виходів регістрів  $RgP_{jh}$  надходять на входи  $m$ -входового суматора, де вони додаються. На виході  $m$ -входового суматора отримуємо  $h$ -й макрочастковий добуток  $P_{Mh}$  відповідно до формули:

$$P_{Mh} = \sum_{j=1}^N P_{jh} \quad (14)$$

Макрочастковий добуток  $P_{Mh}$  з виходів  $m$ -входового суматора записується в регістр  $RgP_{Mh}$ . На суматорі  $См$  підсумовують макрочасткові добутоків  $P_{Mh}$  відповідно до виразу:

$$Z_h = 2^{-h} Z_{h-1} + P_{Mh} , \text{ де } Z_0=0. \quad (15)$$

Накопичена сума  $Z$  з виходу суматора  $СМ$  тактовим імпульсом з входу записується в регістр результату  $RgZ_h$ . В нейроелементі обчислення функції активації  $f_a(Z)$  здійснюється табличним шляхом. Отриманий результат у надходить в паралельно-груповий перетворювач Пер. $g-p$ , який здійснює паралельно-групове перетворення.

Обчислення результату у в цьому нейроелементі виконується за час:

$$t_{HE} = (2m+3)t_{TI} = (2m+3)(t_{P2} + t_{mCm}) ,$$

де  $n$  – розрядність множників;  $k \geq 3$ ;  $k$  – кількість розрядів множників, які одночасно аналізуються для отримання групового часткового добутку  $P_{jh}$ ;  $t_{TI}$  – тривалість такту;  $t_{P2}$  – час запису в регістр;  $t_{mCm}$  – час додавання  $m$  чисел.

## Висновки

1. Розроблено паралельний метод вертикально-групового опрацювання даних у нейромережах, який порівняно з відомими забезпечує підвищення швидкодії збільшенням розрядів каналів надходження множників і кількості часткових добутоків, які формуються в результаті їх аналізу.

2. Для вибору структур нейроелементів нейросистем реального часу доцільно використовувати критерій ефективності використання обладнання, який враховує кількість виводів інтерфейсу, однорідність структури, кількість і локальність зв'язків, зв'язує продуктивність з витратами обладнання та оцінює елементи пристрою за продуктивністю.

3. Визначено, що інтенсивність надходження даних із обчислювальною здатністю нейроелемента у нейросистемах реального часу може узгоджуватися зміною тривалості конвеєрного такту, кількості і розрядності каналів надходження даних.

4. Запропоновано розроблення НВІС-структур паралельного нейроелемента вертикально-групового типу для синтезу нейромереж реального часу з високою ефективністю використання

обладнання здійснювати на основі інтегрованого підходу, який ґрунтується на можливостях сучасної елементної бази, охоплює методи, алгоритми і НВІС-структури, враховує вимоги конкретних застосувань і інтенсивності надходження даних.

5. Розроблено модель та структуру формального паралельного нейрона вертикально-групового типу з мультиплексуванням шин вагових коефіцієнтів і даних, яка забезпечує узгодження інтенсивності надходження даних із обчислювальною здатністю нейроелемента шляхом зміни розрядності каналів надходження і кількості розрядів множників у групі, які одночасно аналізуються для формування часткових добутків.

6. Основними етапами синтезу паралельного нейроелемента вертикально-групового типу є: вибір та розроблення методів і алгоритмів обчислення скалярного добутку та функції активації; визначення основних параметрів апаратних засобів; перехід від алгоритму до узгодженої паралельної структури.

7. Показано, що перехід від алгоритму функціонування нейрона в реальному часі до структури паралельного нейроелемента вертикально-групового типу формально зводиться до мінімізації апаратних затрат при забезпеченні режиму реального часу.

1. Haykin S. *Neural networks and learning machines. Third Edition.* / S. Haykin. – New York: Prentice Hall, 2009. – 936 p. 2. Руденко О. Г., Бодяньський Є. В. *Штучні нейронні мережі* / О. Г. Руденко, Є. В. Бодяньський. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404 с. 3. McCulloch W. S. *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity* / W. S. McCulloch, W. Pitts // *The Bulletin of Mathematical Biophysics*. – Vol. 5, Issue 4. – pp. 115–133. 4. ADALINE (Adaptive linear) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.cs.utsa.edu/~bylander/cs4793/learnsc32.pdf>. 5. Fukushima K. *Cognitron: A self-organizing multilayered neural network* / K. Fukushima // *Biological cybernetics*. – 1975. – Vol. 20, Issue 3-4. – pp. 121–136. 6. Hopfield, J. J. *Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities* / J. J. Hopfield // *Proceedings of the national academy of sciences*. – 1982. – Vol. 79, Issue 8. – pp. 2554–2558. 7. Cao J. *Boundedness and stability for Cohen–Grossberg neural network with time-varying delays* / J. Cao, J. Liang // *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. – 2004. – Vol. 296, Issue 2. – pp. 665–685. 8. Грибачев В. П. *Элементная база аппаратных реализаций нейронных сетей* // *Компоненты и технологии*. – 2006. – № 8. 9. *Нейроподібні методи, алгоритми та структури обробки сигналів і зображень у реальному часі: монографія* / Ю. М. Рашкевич, Р. О. Ткаченко, І. Г. Цмоць, Д. Д. Пелешко. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 256 с. 10. Палагин А. В., Опанасенко В. Н. *Реконфигурируемые вычислительные системы* / А. В. Палагин, В. Н. Опанасенко. – К.: Просвіта, 2006. – 280 с. 11. Цмоць І. Г. *Модель та НВІС-структури формального нейрона паралельно-вертикального типу з використанням мультиплексування шин* / І. Г. Цмоць, О. В. Скорохода, Б. І. Балич // *Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова* – Львів. – 2013. – Вип. 67. – С. 160–166. 12. Цмоць І. Г. *Моделі та НВІС-структури формального нейрона паралельно-вертикального типу з суміщенням процесів надходження та опрацювання даних* / І. Г. Цмоць, О. В. Скорохода, В. Б. Красовський // *Збірник Наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова* – Львів. – 2013. – Вип. 70. – С. 137–145. 13. Цмоць І. Г. *Модель та НВІС-структура формального нейрона паралельно-вертикального типу з табличним формуванням макрочасткових результатів* / І. Г. Цмоць, О. В. Скорохода, Б. І. Балич // *Збірник Наукових праць “Моделювання та інформаційні технології” Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова* – Львів, 2014. – Вип. 73. – С. 133–138. 14. Патент №101922 Україна, G06F 7/38. *Пристрій для обчислення скалярного добутку* / І. Г. Цмоць, О. В. Скорохода, В. М. Теслюк. – Бюл. № 9, 2013.