

УДК 681.3 : 004.93

В.П. КОЖЕМ'ЯКО, Т.Б. МАРТИНЮК, А.А. ЯРОВИЙ, І.В. МОРОЗ

## МОДЕЛІ НЕЙРОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЛОГІКО-ЧАСОВОГО ТИПУ

*Вінницький національний технічний університет  
95, Хмельницьке шосе, Вінниця, 21021, Україна  
Тел.: +380 (432) 598019, e-mail: kvp@vstu.vinnica.ua*

**Анотація.** Розглянуто основні положення розвитку оптико-електронних логіко-часових середовищ в контексті нейробиологічної інтерпретації для подальшого застосування у штучних нейронних мережах. Запропоновано логіко-часову модель нейронного елемента на основі квантронів з можливістю використання відомих переваг функціональної оптоелектроніки. Розглянуто особливості апаратної реалізації формального нейрона – перцептрона.

**Аннотация.** Рассмотрены основные положения развития оптоэлектронных логико-временных сред в контексте нейробиологической интерпретации для дальнейшего применения в искусственных нейронных сетях. Предложена логико-временная модель нейронного элемента на основе квантрон с возможностью использования известных преимуществ функциональной оптоэлектроники. Рассмотрены особенности аппаратной реализации формального нейрона – перцептрона.

**Abstract.** The basic principles of optoelectronic logic-temporary environments development in a context of neurobiology interpretation for the further application in artificial neural networks is considered. The logic-temporary model of neural element on a basis of kvantrons with an opportunity of use of known advantages functional optoelectronic is offered. Some features of formal neuron - perceptron hardware support are observed also.

**Ключові слова:** оптоелектроніка, логіко-часові середовища, логіко-часові функції, квантрон, нейронні мережі, нейронний елемент, формальний нейрон, перцептрон.

## ВСТУП

Сучасний розвиток високоефективних засобів обчислювальної техніки показав, що при збереженні сучасної архітектури ЕОМ тільки за рахунок збільшення швидкодії елементної бази та підвищення рівня технологічної інтеграції нереально значно розширити їхні функціональні властивості і подолати перешкоди, які виникають. Разом з тим, існує багато актуальних задач, таких як паралельна обробка та аналіз сигналів і зображень, розпізнавання образів, які не можливо ефективно розв'язати за допомогою сучасних комп'ютерів класичної архітектури. Тому потрібні не тільки нові принципи обробки, перетворення і передачі інформації, але й нові архітектурні і схемотехнічні рішення [1-3].

Перспективним напрямком вирішення цих задач є застосування оптоелектронних логіко-часових середовищ [1, 2]. З іншого боку, наведені задачі з великою продуктивністю розв'язуються за допомогою систем, розроблених на базі нейроматематики і нейромереж [3]. Однією з основних переваг нейрообчислювача є те, що його основу складають відносно прості, найчастіше - однотипні елементи з великою кількістю між'єднань, що імітують роботу нейронів мозку – формальні нейрони (ФН) [3-5].

В даній роботі розглядається формальний нейрон у вигляді перцептрона, оскільки незважаючи на простоту його функції активації він затребуваний для вирішення прикладних задач [5]. Перцептрон застосовується, наприклад, для задач автоматичної класифікації, яка у загальному випадку базується на поділі простору ознак між заданою кількістю класів. Разом з тим застосування перцептрона поставило ряд питань, робота над вирішенням яких привела до створення більш "розумних" нейронних мереж [3-5]. Тому залишається актуальною задача вдосконалення відомих моделей ФН на рівні як програмної, так і апаратної його реалізації. Так, програму зручніше використовувати для моделювання ФН, але при великих об'ємах обчислення для прискорення формування сигналу відгуку ФН доцільно обирати саме апаратну реалізацію [3,4].

Загальний вигляд ФН наведено на рис. 1 [3-5], де поточний стан ФН визначається, як зважена сума його входів:

$$S = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i, \quad (1)$$

де  $x_i$  –  $i$ -й вхідний сигнал;  $w_i$  – вага  $i$ -го вхідного сигналу.

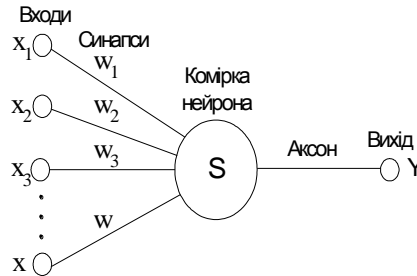


Рис. 1. Загальний вигляд формального нейрона

Виходом нейрона є функція його стану вигляду

$$y = f(S), \quad (2)$$

яка називається активаційною і може мати різний вигляд: від простої порогової функції до одного з видів сигмоїди [3-5]. Існує багато моделей ФН і майже в усіх базовим вузлом є суматор, в основі роботи якого лежить принцип просторово-часового підсумовування через необхідність паралельної обробки векторного масиву вхідних даних [3-6].

При моделюванні перцептрона проблемою є адекватне відтворення його основних функцій, а саме – просторово-часового підсумовування векторного масиву чисел (1) і порівняння з порогом  $\Theta$  зваженої суми  $S$ , як функції активації (2). При цьому виникає задача суміщення операції паралельного підсумовування і порівняння з порогом. Для цього пропонується скористатись відомим принципом паралельного підсумовування групи аналогових величин [1].

Отже, метою даної роботи є дослідження варіантів реалізації базових вузлів формального нейрона (перцептрона).

## ЛОГІКО-ЧАСОВА МОДЕЛЬ ФОРМАЛЬНОГО НЕЙРОНА

Розглянемо моделі оптоелектронних елементів і пристроїв і представимо їх у вигляді нейротехнічних структур.

Час є обґрунтованою мірою інформації. Вибір в якості внутрішнього параметра інформаційно-вимірювальних засобів кванта часу забезпечує органічну єдність теоретичних засобів перетворення і обробки інформації, які називають логіко-часовими середовищами [1,2]. Логічно, що функціонально повним елементом таких середовищ є квантрон, який реалізує принцип квантування часу світловим променем, який несе у своїй тривалості інформацію [1].

Принцип квантування часу полягає у перетворенні часового інтервалу кількістю безперервно послідовно спрацьовуючих з однаковим часом перемикаючих дискретних елементів при подачі на них сигналу про початок перетворення. Для апаратної реалізації можуть бути використані будь-які елементи з двома стійкими станами, які мають на вольт-амперній характеристиці ділянку з від'ємним опором. При цьому бажано, щоб такий елемент був простим, надійним, достатньо уніфікованим у застосуванні, технологічним у виробництві, мав високу швидкодію, не потребував додаткових елементів для індикації. Вказаним вимогам задовольняє оптрон (швидкодія  $10^9 - 10^{10}$  с) [1].

Спроцено НМ можна розглядати як глобально зв'язану мережу примітивних процесорів-нейронів [3,4]. Очевидно, що основним елементом в оптоелектронній НМ є квантрон – багатфункційний елемент пам'яті аналогово-цифрового типу із зовнішньою індикацією станів [7]. Наявність керованих оптичних інформаційних входів і оптичного виходу підвищує комунікабельність квантрона в порівнянні з аналогічними електронними елементами. Оптичні канали зв'язку забезпечують міжелементну гальванічну розв'язку, спрощують організацію міжрозрядних зв'язків. Схемотехнічно

квантрон простіший, ніж електронний статичний елемент пам'яті. За споживаною потужністю квантрон економічніший, ніж потенційні тригери, оскільки в нульовому стані практично не споживає енергії [8]. За швидкістю його можна порівняти з елементами пам'яті, побудованими на елементах серії ТТЛ [7-9].

Перелічені характеристики квантрона свідчать про перспективність його застосування не тільки, як елементної бази оптоелектронних засобів обчислювальної техніки [2]. Квантрон є активним елементом оптоелектронної однорідної мережі, який виконує обробку інформації за допомогою паралельного оптичного порівняння та часового зсуву, з чим пов'язані висока швидкість, схемотехнічна та апаратна мінімізація, високий захист від завад. У цьому випадку квантрон можна визначити як нейроподібний логіко-часовий елемент (НЛЧЕ), для якого справедливі такі аксіоми [8]:

- 1) кожний НЛЧЕ має  $n$  входів і тільки один вихід;
- 2) вихідний сигнал кожного НЛЧЕ може бути знайдений за вхідним сигналом;
- 3) синапси НЛЧЕ можуть бути збуджувальними або гальмівними;
- 4) час проходження часової інформації від одного НЛЧЕ до іншого жорстко фіксований.

Кожний нейрон обчислює певну суму сигналів, які надійшли до нього синапсами, та виконує над нею нелінійне перетворення. Під час пересилання по синапсах сигнали перемножуються на деякий ваговий коефіцієнт. Оскільки ми маємо справу з квантронною схемотехнікою, то найлогічніше застосовувати для синтезу і математичного моделювання нейромережі апарат логіко-часових функцій.

Логіко-часову модель ФН приведено на рис. 2 [8], вихідний сигнал якого оцінюється як:

$$y = \sum_{i=1}^N A_i X_i, \quad (3)$$

де  $A_i$  - деякий ваговий коефіцієнт, що може змінювати значимість під час пересилання інформації по синапсах.

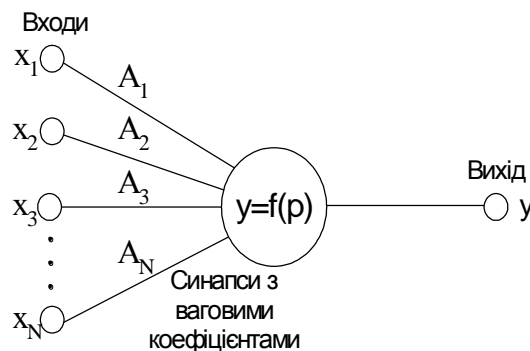


Рис. 2. Логіко-часова модель формального нейрона

Якщо припустити, що по синапсах проходить сигнал, який модулюється за довжиною імпульсу (за часом), тобто як логіко-часова функція, тоді вираз (3) матиме вигляд, аналогічний відомому способу паралельної обробки інформації [10-12]:

$$y = \sum_{i=1}^N T_i X_i, \quad (4)$$

де  $T_i$  - час або тривалість імпульсу в кожному  $i$ -му синапсі.

У моделі нейронної мережі для обробки інформації часові функції  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_{n-1}(t), x_n(t)$  у початковий момент часу порівнюють між собою за довжиною у вхідному нейроні – часовому кон'юнкторі, що виконує операцію порівняння

$$x_i(t) - x_j(t) = \max(\bar{x}_i, \bar{x}_j)_{t(x_i, x_j)} \wedge \max(x_i(t), x_j(t)). \quad (5)$$

Потім ця ж операція виконується у кожному нейроні, який виконує операцію часового віднімання. В кожному нейроні-затримувачі виконується операція затримки часового сигналу. Вихідний нейрон реалізує функцію запам'ятовування та зсуву часової інформації, що надходить з вхідного нейрона.

Сумарна дія часової інформації  $G_i$  на нейрон  $H_i$  складається з головної та допоміжних дій.

Тривалість сумарної дії  $G_i$  є визначальною для допоміжних дій:

$$\sum_{i=1}^N x_i, \sum_{i=1}^N p_i, \sum_{i=1}^N z_i, \dots, \sum_{i=1}^N k_i. \quad (6)$$

В реальних нейронних структурах головна та допоміжні дії можуть мати різну фізичну природу, тому доречно віднести появу стану енергетичного нуля до однієї з допоміжних дій у нейронній системі, що складається з квантрон-автоматів [8].

### АНАЛІЗ ЛОГІКО-ЧАСОВИХ ФУНКЦІЙ

Для аналізу логіко-часової обробки інформації найприйнятнішим є математичний апарат векторно-перемикальних (ВПФ) чи логіко-часових функцій (ЛЧФ), що оперує з безперервно змінними в часі величинами [1,12].

Функції будь-якої скінченної кількості векторно-часових логічних змінних, що набирають в інтервалі від нуля до  $M$  послідовності поточних значень, залежних від усіх поточних значень змінних, які мають місце в межах наявного відрізка часу, називаються логіко-часовими функціями:

$$F = F_T(x_{(T_1)}^{(1)}, x_{(T_2)}^{(2)}, x_{(T_3)}^{(3)}, \dots, x_{(T_k)}^{(k)})$$

де  $T$  – період визначення функції;  $T_1, \dots, T_k$  – множина відрізків часу існування відповідних змінних.

Моменти початку відрізків часу існування називатимемо часовими координатами змінних і позначатимемо  $t_i$ , а відрізок часу існування –  $T_i$ .

Елементарними називаються ЛЧФ, в яких ділянка визначення складається з одного відрізка існування:

$$x(t, t_1, T_1) = \begin{cases} (t - t_1), & \text{якщо } t_1 < t \leq t_1 + T_1; \\ 0, & \text{якщо } t_1 \geq t > t_1 + T_1, \end{cases}$$

де  $t$  – поточне значення параметра.

Розглядаючи множину аргументів  $x$ :

$$x(t, t_1, T_1, t_2, T_2, \dots, t_e, T_e) = \begin{cases} (t - t_i), & \text{якщо } t_i < t \leq t_i + T_i; \\ 0, & \text{якщо } t_i \geq t > t_i + T_i, \end{cases}$$

припускаємо, що  $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n, T_i \geq 0, T_i + t_i \leq t_{i+1}$ .

Відомою є умовна класифікація логіко-часових функцій (ЛЧФ) на три класи (рис. 3) [1,12]:

- ЛЧФ для операцій логіко-часового порівняння;
- ЛЧФ для арифметичних логіко-часових операцій;
- ЛЧФ для спеціальних логіко-часових операцій.

Операції третього класу відтворюють спеціальні логіко-часові операції, до яких належать операції затримки і зсувів.

Припустимо, що час може набирати будь-яких цілочислових значень, а еквівалентом одиниці його вимірювання є  $\tau$  (тобто значення дискретності часу встановлено довільним чином з огляду на практичну доцільність). Отже, на відрізках часу існування MIN і MAX є змінні величини, проте функції MIN і MAX принципово відрізняються одна від одної тим, що перша може набувати  $1 \dots M$  змінних значень на відрізку існування, а друга – єдине з них. Операції MIN і MAX комутативні, асоціативні та ідемпотентні [1,12].

Отже, всі логічні та арифметичні логіко-часові операції ґрунтуються на операції порівняння, а логіко-часові операції третього класу реалізують затримку чи зсув часової інформації. Важливо зазначити, що функціональні логіко-часові операції – порівняння і зсуву, а також порівняння й затримки – є функціонально повними наборами логіко-часових операцій, з допомогою яких можна реалізувати як завгодно складну ЛЧФ (рис. 3) [1,12].

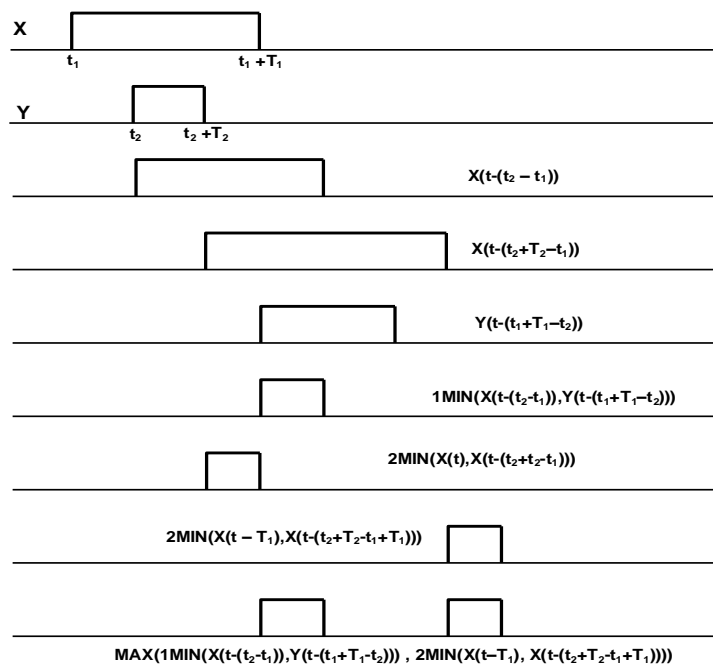


Рис. 3. Варіанти реалізації логіко-часових операцій для формування ЛЧФ.

### АПАРАТНА МОДЕЛЬ ПЕРЦЕПТРОНА

Як узагальнену модель ФН для його апаратної реалізації з використанням цифрових кодів можна розглядати відому модель ФН (рис.4), яка функціонує у трьох режимах [6]:

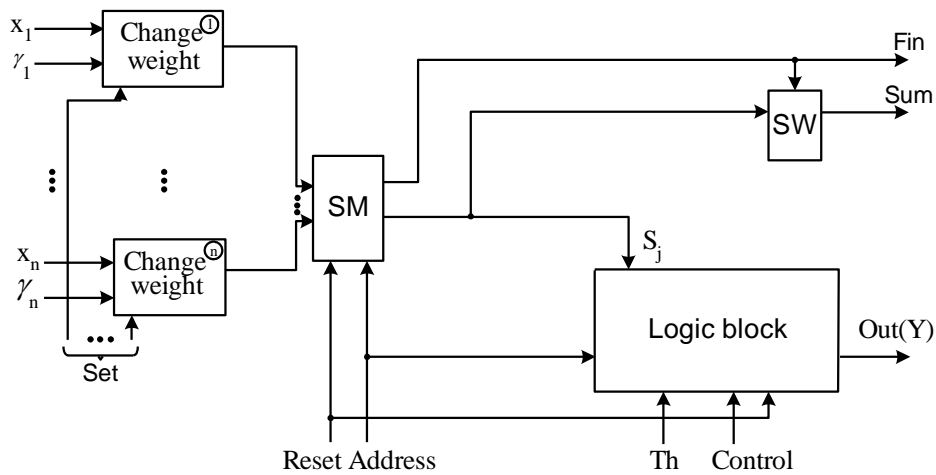


Рис. 4. Апаратна модель формального нейрона

1) у режимі суматора вхідних сигналів  $x_i$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n x_i, \quad (7)$$

2) у режимі скалярного добутку зважених вхідних сигналів

$$S = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \gamma_i = \sum_{i=1}^n a_i, \quad (8)$$

де  $\gamma_i$  - значення синаптичних ваг;

3) у режимі формального нейрона зі знаковою функцією активації

$$Y = \text{sign}\left(\sum_{i=1}^n x_i \cdot \gamma_i - \Theta\right), \quad (9)$$

де  $\Theta$  – значення порогу обробки.

Ця модель ФН (рис.4) містить: Change weight – блок зміни синаптичних ваг; SM – просторово-часовий суматор; SW – комутатор; Logic block – логічний блок; Set – настановні входи; Reset – сигнал скидання; Address – вхід адреси; Th – вхід порогу; Control – керуючий вхід; Fin –вихід сигналу „Кінець”; Sum – результат (сума); Out(Y) – вихід ФН.

### ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО СУМАТОРА

Найбільш значущим блоком моделі ФН (рис.4) є просторово-часовий суматор (ПЧС) як за важливістю реалізованої функції, так і за складністю апаратної побудови, оскільки необхідно реалізувати високий рівень паралелізму обробки  $n$  операндів за принципом систолічної обробки потоку даних [13], а саме, як паралельно-конвеєрний процесор [14].

Розглянемо один з режимів пристрою – режим формального нейрона. На рис. 5 показано структуру одного з варіантів цифрового ПЧС [15-17].

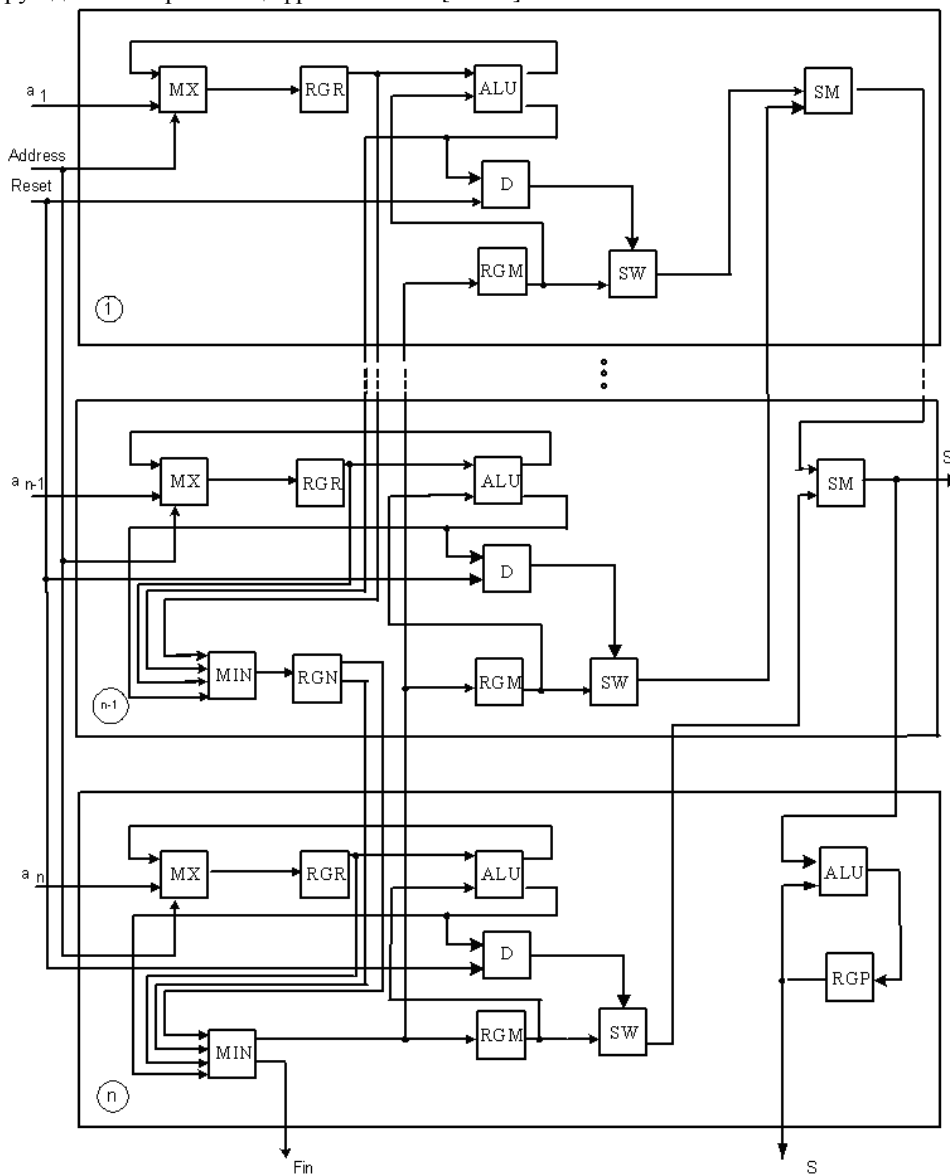


Рис. 5. Структура просторово-часового суматора

Кожна з  $n$  комірок ПЧС містить мультиплексор  $MX$ , регістри  $RGR$ ,  $RGM$ ,  $RGN$ , арифметично-логічний пристрій  $ALU$ , суматор  $SM$ , комутатор  $SW$ ,  $D$ -тригер  $D$ , мініматор  $MIN$ .

В даній моделі ФН ПЧС реалізує обробку за методом різницевих зрізів (РЗ) [14], тобто порогова обробка масиву  $n$  чисел в ньому зводиться до обчислення і підсумовування  $N$  часткових сум  $S_j$ , де  $N$  – кількість циклів обробки елементів  $a_i$  масиву чисел, порівняння цієї суми  $S$  з порогом  $\Theta$  і формування підсумкового сигналу  $Y$  виду

$$Y = \begin{cases} 1, & \text{якщо } S = \sum_{i=1}^n a_i = \sum_{j=1}^N q_j d_j \geq \Theta, \\ 0 & \text{у протилежному випадку,} \end{cases} \quad (10)$$

де  $q_j$ ,  $d_j$  – загальна значуща частина елементів РЗ та її кратність у  $j$ -му РЗ;  $j$  – цикл обробки.

Алгоритм роботи ПЧС має такий вигляд.

Крок 1. Визначається загальна значуща частина всіх доданків у  $j$ -му циклі, тобто

$$q_j = \min\{a_{i,j-1}\}_{i=1}^n, \quad j = \overline{1, N} \quad (11)$$

де  $a_{i,0}$  –  $i$ -й доданок на вході ПЧС, який дорівнює  $a_{i,0} = x_i \cdot \gamma_i$ , тобто  $i$ -й елемент початкового РЗ  $A_0$ , і перевіряється умова

$$q_j = 0. \quad (12)$$

Якщо умова (12) виконується, то процес підсумовування припиняється. У протилежному випадку виконується крок 2.

Крок 2. Виділяється РЗ  $A_j$ , тобто сукупність величин різниці всіх доданків  $(j-1)$ -го циклу з їхньою загальною частиною  $q_j$ , тобто

$$A_j = \{a_{i,j}\}_{i=1}^n = \{a_{i,j-1} - q_j\}_{i=1}^n. \quad (13)$$

В подальшому отриманий РЗ  $A_j$  є вхідною множиною доданків для наступного  $(j+1)$ -го циклу.

Крок 3. Формується кратне загальної частини, тобто часткова сума  $S_j$ , де кратність  $d_j$  визначається кількістю додатних доданків  $j$ -го циклу:

$$S_j = q_j d_j. \quad (14)$$

Крок 4. В першому циклі формується різниця між заданим порогом  $\Theta$  та частковою сумою  $S_1$ , отриманою на попередньому кроці, тобто

$$\Delta_1 = \Theta - S_1 \quad (15)$$

і перевіряється умова

$$\Delta_1 \leq 0. \quad (16)$$

В подальшому поточна різниця  $\Delta_{j-1}$  є поточним значенням порогу на наступному  $j$ -му циклі обробки, тобто

$$\Delta_j = \Delta_{j-1} - S_j, \quad j = 2, 3, \dots \quad (17)$$

На цьому ж кроці перевіряється умова

$$\Delta_j \leq 0. \quad (18)$$

В разі її виконання формується вихідний сигнал  $Y$ , який дорівнює 1, і порогова обробка припиняється, а в протилежному випадку виконуються кроки 1-4 для  $j=2, 3, \dots$  до виконання умови (18) або до визначення нульової величини  $q_j$  (12).

Фактично, спосіб обробки векторного масиву даних за РЗ є цифровим аналогом відомого способу паралельного підсумовування аналогових сигналів за їх тривалістю [12].

На рис.6 подано структурну схему пристрою для паралельного підсумовування тривалостей

групи часових інтервалів [10,12]. Вона є універсальною і може бути використана при роботі як з цифровими кодами, так і з сигналами, поданими значеннями тривалостей імпульсів (тобто в аналоговій формі), що значно розширює клас розв'язуваних задач. Спосіб паралельного підсумовування часової інформації покладено в основу створення багатьох обчислювальних пристроїв для паралельної обробки аналогових сигналів [1,2,12].

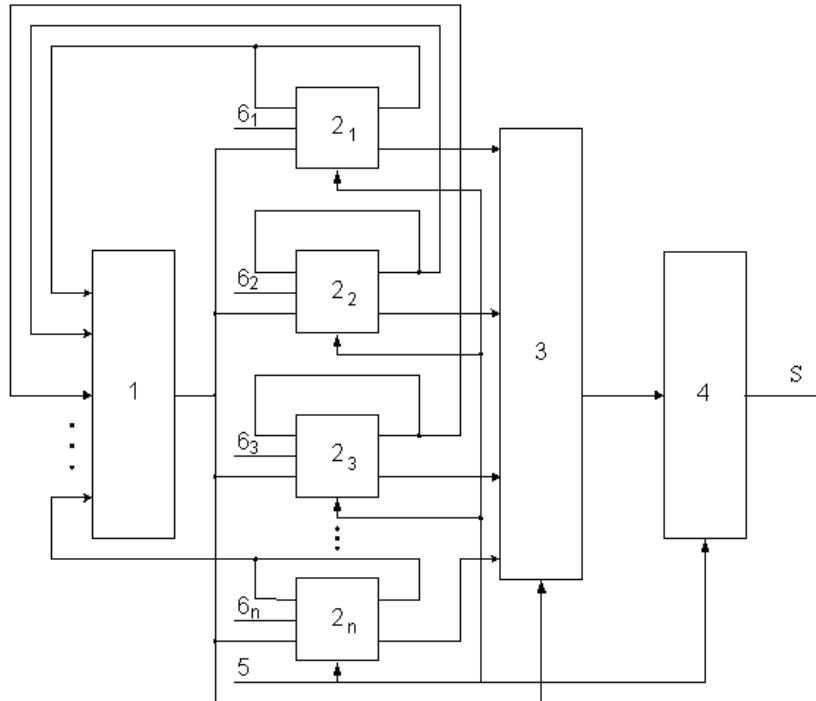


Рис. 6. Пристрій для паралельного підсумовування тривалостей групи часових інтервалів

Пристрій містить блок 1, який виконує часове порівняння аналогових сигналів, які надходять на його вхід і формує на виході найменше з них, блоки 2<sub>1</sub>, ..., 2<sub>n</sub>, які формують різниці між сигналом, що подається на встановлювальний вхід, і найменшим сигналом, помножувач 3, суматор 4, вхід 5 синхронізації, входи b<sub>1</sub>, ..., b<sub>n</sub> початкових сигналів.

## ВИСНОВКИ

У сучасній обчислювальній техніці прийняті двійкова система числення, електронно-потенціальна система кодування і підсумовування визначили розвиток сучасної елементної бази і організації обчислень у двійкових процесорах. Отже, сучасні комп'ютери на відміну від нейрокомп'ютерів краще виконують арифметичні операції. Але розпізнавання найпростіших образів виявляється для них досить складною задачею. Таким чином, образне людське мислення, що базується на оптичному порівнянні у зоровому каналі сприйняття інформації, є складною задачею для обчислювальної техніки, організованої на двійковому електронно-потенціальному підсумовуванні. Для вирішення даної проблеми перспективним є перехід на оптоелектронні логіко-часові середовища. Це дозволяє створити елементну базу, яка забезпечує суміщення введення-виведення, перетворення і обробку інформації у зручному вигляді для сприйняття людиною.

Принцип квантування часу світловим променем є теоретичною основою нового підходу в створенні оптоелектронних процесорів логіко-часового типу, основною операцією яких є порівняння (віднімання), яке при звичайному одинично-десятковому представленні чисел на часовому рівні дозволяє скоротити час виконання операцій, спростити структуру пристроїв, оскільки відсутні кодові перетворення.

Нейрокомп'ютер, як і образний комп'ютер, на відміну від класичних комп'ютерів має переваги за критеріями паралельності, швидкодії, адаптованості для виконання обробки великої кількості не лише багаторозрядних чисел, але й великих потоків інформації візуальної (образної) природи [18].

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кожемяко В.П. Оптоэлектронные логико-временные информационно-вычислительные среды. –



- Тбілісі: Мецниереба, 1984. -360с.
2. Кожем'яко В.П., Мартинюк Т.Б., Суприган О.І., Клімкіна Д.І. Квантові перетворювачі на оптоелектронних логіко-часових середовищах для око-процесорної обробки зображень. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2007. – 126 с.
  3. Галушкин А.И. Некоторые исторические аспекты развития элементной базы вычислительных систем с массовым параллелизмом (80- и 90- годы) // Нейрокомпьютер. – 2000. - №1. - С.68-82.
  4. Галушкин А.И., Иванов В.В. Некоторые концептуальные вопросы развития нейрокомпьютеров// Зарубежная радиоэлектроника. – 1997.- №2.- С. 3-10.
  5. Перцептрон – система распознавания образов/ Под ред. А.Г. Ивахненко. – К.: Наукова думка, 1975. – 431 с.
  6. А. с. СССР №1479944, МКИ G06F7/60. Устройство для моделирования нейрона/ А.В. Каляев, Ю.В. Чернухин, Ю.А. Брюхомицкий, Г.А. Галуев. - №4296969/31-13; Заявлено 24.08.87; Опубл. 15.05.89. Бюл.№18. -8с.
  7. Паралельно-ієрархічне перетворення як системна модель оптико-електронних засобів штучного інтелекту. Монографія / В.П. Кожем'яко, Ю.Ф. Кутаєв, С.В. Свечников та ін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 324с.
  8. Синтез нейронних систем на квантрон-автоматах з використанням поняття енергетичного нуля / В.П. Кожем'яко, Р.М. Хамді Рамі, Д.В. Гордієнко, Ю.В. Баштовий //Вісник ВПІ. - №6 (27). – 1999. – С.60-65.
  9. Натрошвили О.Г., Кожемяко В.П., Саникидзе Д.О. Некоторые вопросы анализа КВ-автоматов // Сообщ. АН ГССР. – 1985. – Т.120, №1. – С.137-140.
  10. А.с. СССР №1119035, МКИ G 06 G 7/14. Способ параллельного сложения длительностей группы временных интервалов/ В.П. Кожемяко, Л.И. Тимченко, Т.В. Головань, Н.Е. Фурдияк, Т.Б. Мартинюк. - № 3528309/ 18 – 24; Заявл. 24.12.82; Опубл. 15.10.84, Бюл. №38. – 8с.
  11. Оптоэлектронные параллельные вычислительные устройства: принципы построения и способы реализации / В.П. Кожемяко, О.Г. Натрошвили, Л.И. Тимченко и др. – Тбилиси: Изд-во Тбилисского ун-та, 1985. – 248с.
  12. Свечников С.В., Кожемяко В.П., Тимченко Л.И. Квазиимпульсно-потенциальные оптоэлектронные элементы и устройства логико-временного типа. – К.: Наук. думка, 1987. – 256с.
  13. Кун С. Матричные процессоры на СБИС: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 672с.
  14. Мартинюк Т.Б. Рекурсивні алгоритми багатооперандної обробки інформації. Монографія. – Вінниця: „УНІВЕРСУМ – Вінниця”, 2000. – 216с.
  15. Патент України № 7269, МПК G06F7/50. Конвеєрний підсумовуючий пристрій/ Т.Б.Мартинюк, К.А. Балашов, І.В. Мороз, Р.А. Расенко - №20041109358; Заявлено 15.11.04; Опубл. 03.03.05; Бюл.№6. – 12 с.
  16. Патент України № 10089, МПК G06F7/50. Конвеєрний підсумовуючий пристрій/ Т.Б.Мартинюк, А.В. Кожем'яко, К.А. Балашов, І.В. Мороз - №20041109356; Заявлено 15.11.04; Опубл. 03.03.05; Бюл.№11. – 14 с.
  17. Патент України № 7265, МПК G06F7/50. Конвеєрний пристрій/ Т.Б.Мартинюк, І.А. Вербицький,Н.В. Фофанова, І.В. Мороз - №20041109338; Заявлено 15.11.04; Опубл. 17.02.05; Бюл.№6. – 12 с.
  18. Кожем'яко В.П., Тимченко Л.І, Яровий А.А. Паралельно-ієрархічні мережі як структурно-функціональний базис для побудови спеціалізованих моделей образного комп'ютера. Монографія. - Вінниця: „УНІВЕРСУМ – Вінниця”, 2005. – 216с.

Надійшла до редакції 14.11.2007 р.

**КОЖЕМ'ЯКО В.П.** – академік АНУ, д.т.н., професор, завідувачий кафедрою лазерної і оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**МАРТИНЮК Т.Б.** – к.т.н., доцент кафедри лазерної і оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**ЯРОВИЙ А.А.** – к.т.н., доцент кафедри інтелектуальних систем, науковий співробітник кафедри лазерної і оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**МОРОЗ І.В.** – аспірантка кафедри інтелектуальних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.