

УДК 004.032.26

О.К. КОЛЕСНИЦКИЙ, І.В. БОКОЦЕЙ

## КОМПАКТНА ОПТОЕЛЕКТРОННА РЕАЛІЗАЦІЯ ІМПУЛЬСНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

*Вінницький національний технічний університет  
вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна*

**Анотація.** Запропонована авторами компактна оптоелектронна реалізація імпульсної нейронної мережі використовує матрицю напівпровідникових лазерів. Також запропоновано реалізацію нейронного елементу на тиристорі, який здатен керувати одразу рядком лазерів у матриці. Описано принципи роботи мережі. Оцінено досяжні параметри мережі з урахуванням сучасних технологічних можливостей.

**Аннотация.** Предложенная авторами компактная оптоэлектронная реализация импульсной нейронной сети использует матрицу полупроводниковых лазеров. Также предложена реализация нейронного элемента на тиристоре, который способен управлять сразу строкой лазеров в матрице. Описаны принципы работы сети. Оценены достижимые параметры сети с учетом современных технологических возможностей.

**Abstract.** The pulsed neural network optoelectronic compact implementation, proposed by authors, uses a semiconductor laser array. Neural element implementation, based on the thyristor, is also proposed. This neural element implementation is able to control whole row of the array. The principles of network's work are described. The achievable parameters of the network are estimated taking into account modern technological possibilities.

**Ключові слова:** імпульсна нейронна мережа, оптоелектронна реалізація, тиристор, матриця напівпровідникових лазерів, розпізнавання.

### ВСТУП

Останнім часом спостерігається суттєва активізація наукових досліджень імпульсних нейронних мереж (ІНМ) [1]. Вони приваблюють дослідників своєю нейроморфністю, тобто великою схожістю за принципами кодування інформації та функціонування з біологічними нейронними мережами. Крім того, на відміну від відомих ітераційних нейронних мереж, що будуються на формальних нейронах, ІНМ мають такі переваги: найбільш пристосовані для розпізнавання багатовимірних динамічних неперервних даних, багатозадачні (можуть одночасно розпізнавати декілька складових та оцінювати декілька параметрів), здатні до розпізнавання з передбаченням, мають нескладну процедуру навчання, підвищену продуктивність та задовільність [1, 2]. Зараз дуже нагальною і актуальною є проблема розпізнавання в реальному масштабі часу мови, рухомих зображень, запахів та ін. А оскільки мова, рухомі зображення та запахи є багатовимірними динамічними неперервними даними, то здатність ІНМ до розпізнавання в реальному масштабі часу саме багатовимірних динамічних неперервних даних робить їх особливо цікавими та перспективними для застосування.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Як відомо [3], для отримання максимуму переваг від застосування нейронних мереж для практичних задач розпізнавання образів різної природи, потрібні апаратні реалізації (а не програмні чи програмно-апаратні) нейронних мереж з якомога більшою кількістю нейронних елементів. В ідеалі ця кількість повинна наближатись до кількості нейронів у мозку людини –  $(2...5) \times 10^{11}$ . Тому вельми актуальним є питання про ефективну апаратну реалізацію імпульсних моделей нейронів та ІНМ в цілому. Відомі апаратні реалізації ІНМ на основі к-МОН НВІС (VLSI) [1, 4] мають суттєвий недолік, який полягає в непереборних труднощах організації в межах напівпровідникового чіпу розгалуженої структури великої кількості зв'язків між нейронами. Через це перспективнішими є оптоелектронні реалізації ІНМ, в яких зв'язки між нейронами організуються за допомогою оптичних засобів, а

нейрони мають оптичні входи та виходи.

Відома оптоелектронна реалізація ІНМ [5] – рис.1. Головним недоліком цієї апаратної реалізації є погані конструктивно-технологічні параметри. А саме:

- через наявність таких оптичних елементів, як циліндричні лінзи, фокони та волоконно-оптичний жгут, маса пристрою буде великою;
- через необхідність певної відстані (визначається фокусною відстанню циліндричних лінз) від масиву вхідних та інтер-нейронів до матриці зв'язків та від матриці зв'язків до вихідних нейронів, пристрій буде мати суттєву довжину, а значить і об'єм;
- через те, що вихідний оптичний сигнал одного нейрона розширюється циліндричною лінзою на весь рядок матриці зв'язків, він повинен мати значну потужність. Це потребує використання в якості світловопромінювачів потужних напівпровідникових лазерів. Що в свою чергу викликає необхідність потужних вихідних каскадів нейронних елементів, здатних видавати великі струми. А при великій кількості нейронів в мережі оптична потужність на один елемент матриці зв'язків все-одно може виявитися недостатньою.

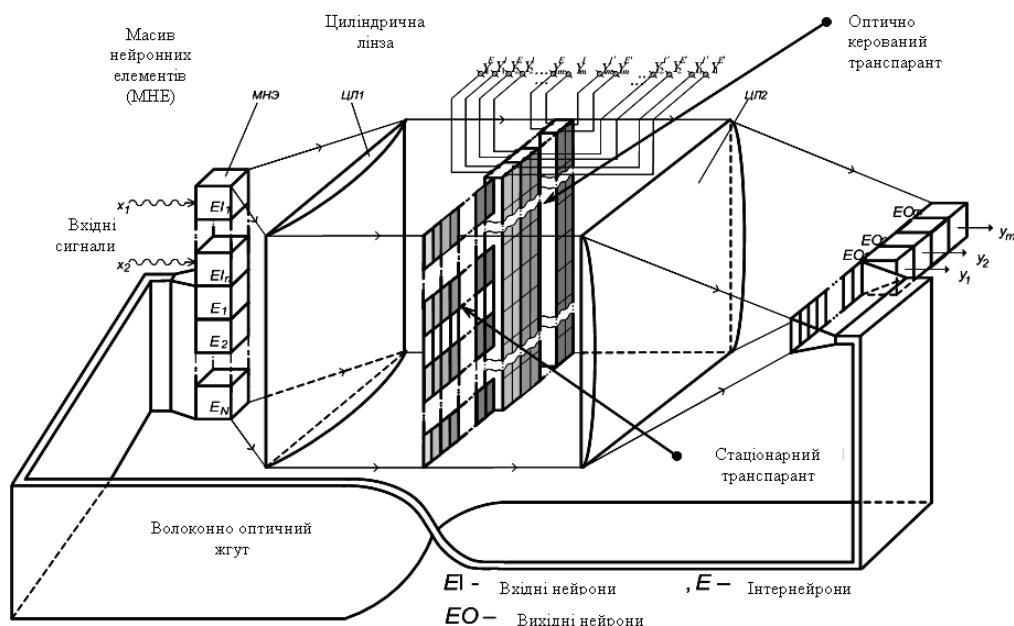


Рис. 1. Структура відомої оптоелектронної імпульсної нейронної мережі

**Мета статті** – висвітлити запроповану авторами компактну оптоелектронну реалізацію імпульсної нейронної мережі, яка має менші габарити і масу ніж відома [5], і яка побудована на нейронних елементах з підвищеною навантажувальною спроможністю, достатньою для керування матрицями світлодіодів або напівпровідникових лазерів.

### РЕАЛІЗАЦІЯ ІМПУЛЬСНОГО НЕЙРОННОГО ЕЛЕМЕНТА НА ТИРИСТОРИ

При розробці імпульсного нейронного елемента (ІНЕ) потрібно виконати наступні вимоги:

- 1) по набору своїх функцій ІНЕ [6] має бути максимально адекватним біологічному нейрону;
- 2) з урахуванням подальшого використання в оптоелектронних нейронних мережах, де сигнали між нейронами передаються в оптичному вигляді, ІНЕ повинен мати оптичні входи і виходи;
- 3) оскільки вхідні сигнали нейронів повинні інтегруватись (додаватись) в ІНЕ, то в якості такого інтегратора доцільно взяти електричну ємність;
- 4) для виконання порогової обробки накопичених вхідних сигналів, в схемі ІНЕ має бути пороговий пристрій;
- 5) для формування вихідного імпульсу певної тривалості має бути коло розряду інтегратора.

На рис.2 наведено структурну схему реалізації ІНЕ. Вона має оптичні входи (збуджувальні та гальмівні), які подаються на відповідні фотоприймачі. Алгебраїчна сума фотострумів з цих фотоприймачів інтегрується на ємності С. При досягненні різниці потенціалів на ємності порогової величини, спрацьовує пороговий пристрій, формуючи на своєму виході передній фронт вихідного імпульсу. По цьому передньому фронту включається коло розряду ємності, від параметрів якого залежить тривалість вихідного

імпульсу. Для забезпечення оптичного виходу, в схему введено світловипромінювач.

Пороговий пристрій може бути реалізований на різних елементах. Це можуть бути напівпровідникові прилади з ділянкою від'ємного опору на ВАХ: тиристори, тунельні діоди, одноперехідні транзистори, біспін-прилади; напівпровідникові прилади з пороговими властивостями: лавинний транзистор, стабілітрон; порогові схеми на біполярних або МОН-транзисторах зі зворотними зв'язками. В цій статті пропонується реалізація ІНЕ з пороговим пристроєм на тиристорі. Цей вибір визначається тим, що тиристор може керувати (перемикати) великими струмами. Саме ця властивість необхідна нам для того, щоб ІНЕ міг керувати одразу лінійкою матриці світлодіодів або напівпровідникових лазерів [7]. Маючи такі ІНЕ, можна будувати апаратні реалізації нейронних мереж на основі матриць світлодіодів або напівпровідникових лазерів у вигляді «сендвіч-структур» з покращеними масо-габаритними показниками.

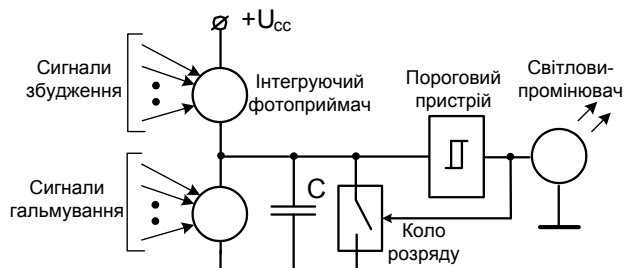


Рис. 2. Структурна схема реалізації імпульсного нейронного елемента

Прототипом запропонованому ІНЕ на тиристорі є пристрій [8]. Недоліком даного пристрою є електрична природа вхідних та вихідних сигналів (що ускладнює технологію побудови на таких елементах нейронних мереж з великою кількістю між'єднань) та відсутність гальмівних входів (що обмежує функціональні можливості пристрою). Задачею вдосконалення цього ІНЕ була можливість працювати з оптичними сигналами та наявність як збуджувальних, так і гальмівних входів, що розширює функціональні можливості пристрою.

На рис.3 наведено схему пристрою. Пристрій працює таким чином. Перший фотодіод VD1 приймає збуджувальні вхідні оптичні сигнали, які перетворюються фотодіодом в струм, що заряджає конденсатор C1, а гальмівні вхідні оптичні сигнали перетворюються фотодіодом VD2 в струм, що розряджає конденсатор C1. Напруга живлення тиристора менша напруги перемикачання при струмі керуючого електрода, що регулюється резистором R1 (в режимі очікування). Коли напруга на керуючому електроді тиристора під дією вхідних імпульсів досягне порогового значення (при даній напрузі живлення), тиристор відкривається, на резисторі R3 і світловипромінювачі VD3 створюється вихідний позитивний імпульс напруги, який надходить на вихід (світловипромінювач VD3 формує в цей час вихідний оптичний імпульс). Конденсатор C3 розряджається через відкритий тиристор, резистор R3 і світловипромінювач VD3, напруга на аноді тиристора зменшується і він закривається. Конденсатор C2, що зарядився під час відкритого стану тиристора, розряджається через резистор R3 і світловипромінювач VD3, формуючи задній фронт вихідного імпульсу. Після замикання тиристора конденсатор C3 заряджається від джерела напруги через резистор R2 до початкового значення, моделюючи фазу пониження збудження (відносна рефрактерність).

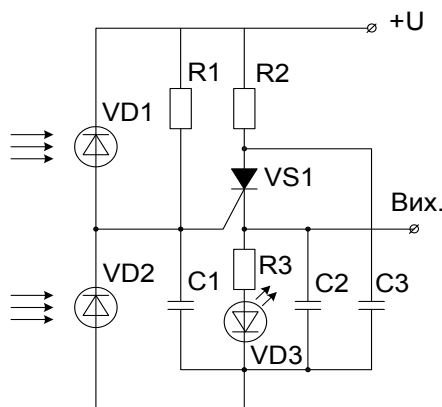


Рис. 3. Оптоелектронний імпульсний нейронний елемент на тиристорі

Завдяки наявності оптичних входів та виходів даний пристрій може легко використовуватись при побудові імпульсних нейронних мереж з великою кількістю елементів та зв'язків між ними. Організація великої кількості оптичних зв'язків реалізується набагато простіше, ніж електричних зв'язків за допомогою оптичних та голографічних засобів. Крім того, завдяки тому, що тиристор може перемикати великі струми, в якості світловипромінювача VD3 може використовуватись кілька паралельно з'єднаних світлодіодів або напівпровідникових лазерів. Це дає змогу навантажувати пристрій на цілий рядок або стовпчик матриці світлодіодів або напівпровідникових лазерів, що спрощує структуру побудови великих нейронних мереж. Наявність в запропонованому пристрої крім збуджувальних також і гальмівних входів підвищує адекватність пристрою своєму біологічному прототипу та дозволяє організувати нейронні мережі як з додатними, так і з від'ємними коефіцієнтами синаптичних зв'язків (що розширює функціональні можливості).

### РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПАКТНОЇ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ ІМПУЛЬСНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Структура компактної імпульсної нейронної мережі на основі оптоелектронної елементної бази представлена на рис. 4. Вона складається з  $n$  вхідних нейронних елементів  $EI_1 \dots EI_n$ , на які поступають вхідні сигнали  $x_1 \dots x_n$ ,  $N$  інтернейронів  $E_1 \dots E_N$ , матриці світловипромінювачів (світлодіоди або напівпровідникові лазери), транспаранта  $T$  (виконаного, наприклад, у вигляді фотопластини, коефіцієнти прозорості локальних ділянок якої відповідають значенням вагових коефіцієнтів зв'язку інтернейронів), оптично керованого транспаранта (ОКТ) [9] із системою з  $2m$  пар смугових вертикальних електродів,  $m$  вихідних нейронних елементів  $EO_1 \dots EO_m$ . У ОКТ непарні пари електродів відповідають збуджувальним (Excitatory) зв'язкам і мають виводи  $Y_i^E$  і  $Y_i^{E'}$ , а парні пари електродів відповідають гальмівним (Inhibitory) зв'язкам і мають виводи  $Y_i^I$  і  $Y_i^{I'}$  ( $i=1 \dots m$ ).

Транспарант  $T$  і ОКТ утворюють загальну матрицю вагів зв'язків всіх нейронів ІНМ. Структура загальної матриці  $W$  (розміром  $(n+N) \times (2N+2m)$ ) вагів зв'язків показана на рис. 5 і складається з чотирьох підматриць: 1) матриці **WIN** (**W** Input-Net, розміром  $n \times 2N$ ) вагів зв'язків вхідних нейронів з інтернейронами; 2) матриці **WIO** (**W** Input-Output, розміром  $n \times 2m$ ) вагів зв'язків вхідних нейронів з вихідними нейронами; 3) матриці **WNN** (**W** Net-Net, розміром  $N \times 2N$ ) вагів зв'язків інтернейронів між собою; 4) матриці **WNO** (**W** Net-Output, розміром  $N \times 2m$ ) вагів зв'язків інтернейронів з вихідними нейронами. Детальна структура загальної матриці  $W$  вагів зв'язків показана на рис. 6.

Оскільки кожен нейрон має по 2 входи (збуджувальний і гальмівний), то кожна з матриць **WIN**, **WIO**, **WNN**, **WNO** складається з двох підматриць – відповідно матриця вагів зв'язків збуджувальних входів (елементи  $w_{kl}^E$ ,  $wio_{kl}^E$ ,  $w_{nn}^E$ ,  $w_{no}^E$ , де індекс « $E$ » означає «збуджувальний» - Excitatory) і матриця вагів зв'язків гальмівних входів (елементи  $w_{kl}^I$ ,  $wio_{kl}^I$ ,  $w_{nn}^I$ ,  $w_{no}^I$ , де індекс « $I$ » означає «гальмівний» - Inhibitory). Позначення  $w_{kl}^E$  читається так – ( $w$ ) вага зв'язку виходу  $k$ -го ( $i$ -input) вхідного нейрона зі ( $E$ -excitatory) збуджувальним входом  $l$ -го ( $n$ -net) інтернейрона. Тобто друга буква після букви  $w$  позначає тип нейрона ( $i$ -вхідний нейрон  $n$ -інтернейрон), вихід якого зв'язується з входом нейрона, тип якого позначає третя буква ( $n$ -інтернейрон  $o$ -вихідний нейрон); нижній індекс  $k$  позначає номер нейрона, з виходу якого йде зв'язок, а нижній індекс  $l$  позначає номер нейрона, на вхід якого йде зв'язок; верхній індекс позначає тип входу, на який йде зв'язок ( $E$ -на збуджувальний вхід  $I$ -на гальмівний вхід).

Таким чином, наприклад, позначення  $w_{kl}^I$  читається так – ( $w$ ) вага зв'язку виходу  $k$ -го ( $n$ -net) інтернейрона з ( $I$ -inhibitory) гальмівним входом  $l$ -го ( $o$ -output) вхідного нейрона.

Елементи матриць **WIN** і **WNN** є константами (генеруються випадковим чином для конкретної ІНМ), тобто не міняються в процесі роботи мережі, а тому представляються транспарантом  $T$ . Елементи матриць **WIO** і **WNO** налаштовуються в процесі навчання ІНМ на рішення конкретної задачі, а тому представляються оптично керованим транспарантом ОКТ з пам'яттю.

Для зручності розуміння роботи оптоелектронної імпульсної нейронної мережі слід розглянути схему її роботи, приведену на рис. 7.



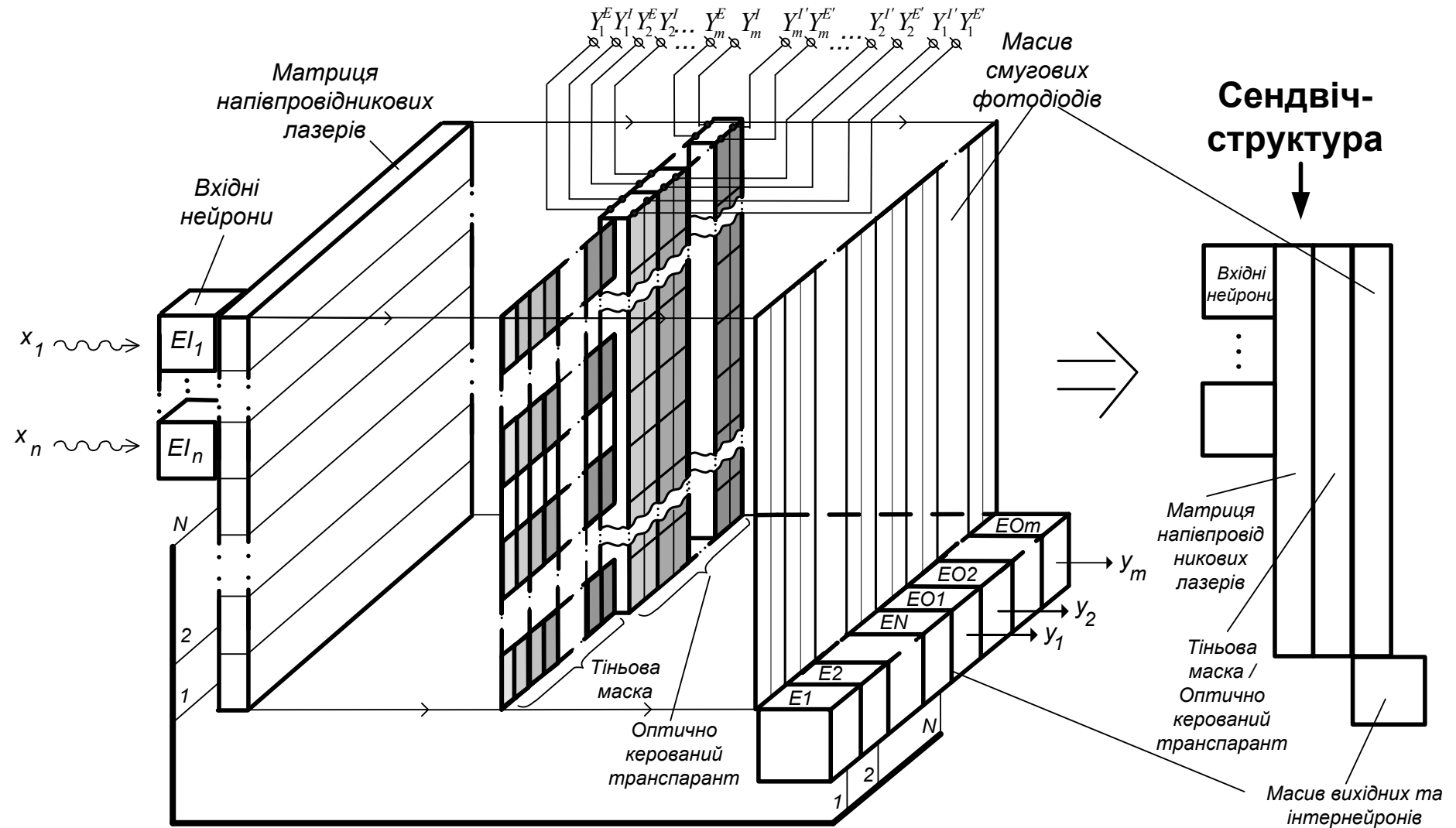


Рис. 4. Структура компактної оптоелектронної імпульсної нейронної мережі







$$\mathbf{XN} = \mathbf{YI} \times \mathbf{WIN} + \mathbf{YN} \times \mathbf{WNN}, \quad (1)$$

і вектор вхідних сигналів вихідних нейронів:

$$\mathbf{XO} = \mathbf{YI} \times \mathbf{WIO} + \mathbf{YN} \times \mathbf{WNO}. \quad (2)$$

Особливістю представлених співвідношень є те, що елементи векторів  $\mathbf{YI}$ ,  $\mathbf{YN}$ ,  $\mathbf{XO}$  і  $\mathbf{XN}$  є не константами з області дійсних чисел, а імпульсними сигналами.

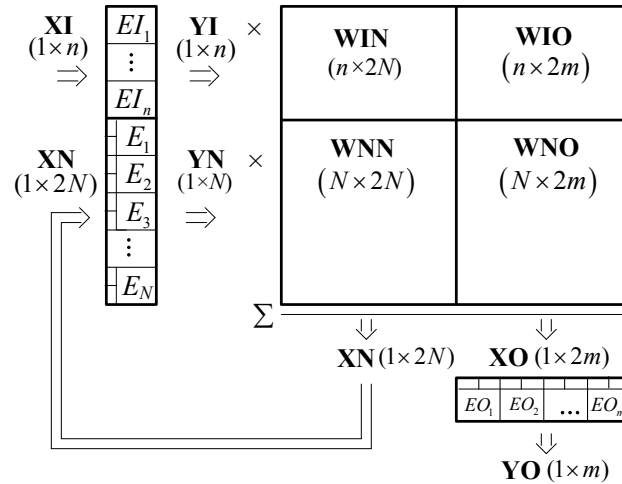


Рис. 7. Схема роботи компактної оптоелектронної імпульсної нейронної мережі

## ОПИС РОБОТИ КОМПАКТНОЇ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ ІМПУЛЬСНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Компактна оптоелектронна імпульсна нейронна мережа, схема якої представлена на рис.4, працює таким чином.

У режимі розпізнавання [10] вхідні оптичні сигнали  $x_1(t) \dots x_n(t)$  поступають на входи відповідних сенсорних нейронів  $EI_1 \dots EI_n$ , які перетворюють ці сигнали в послідовності імпульсів  $\delta(t-t_i)$  з частотою, пропорційною амплітуді сигналу  $x_i(t)$ . Імпульси мають фіксовану амплітуду і тривалість та керують одразу цілим рядком матриці світловипромінювачів, з виходу яких оптичні імпульси надходять на  $i$ -й рядок встановлених поруч транспарантів Т і ОКТ. У режимі розпізнавання між всіма електродами  $Y_i^E$  і  $Y_i^E'$ , також як і між всіма електродами  $Y_i^I$  і  $Y_i^I'$  ( $i=1 \dots m$ ) – нульові різниці потенціалів, при яких коефіцієнти пропускання локальних областей ОКТ, встановлені в режимі навчання, залишаються незмінними. Оптичні імпульси, проходячи через комірки транспарантів Т і ОКТ, що мають різні коефіцієнти пропускання, рівні вагам синаптичних зв'язків нейронів, змінюють свою амплітуду (відбувається множення амплітуди імпульсу на вагу зв'язку). Імпульси, що пройшли через транспаранти Т і ОКТ, оптично збираються (просторово інтегруються) за допомогою масиву смугових фотодіодів [11] із стовпців цих транспарантів. Масив смугових фотодіодів формує електричні сигнали, які керують світловипромінювачами інтернейронів  $E_1 \dots E_N$  (вектор  $\mathbf{XN}$ ) і подаються на них за допомогою жгута. У інтернейронах сигнали вектора  $\mathbf{XN}$  (серед яких є і збуджувальні і гальмівні сигнали) піддаються часовій інтеграції, внаслідок чого формуються сигнали  $\mathbf{YN}$ , які знов поступають через транспаранти Т і ОКТ на входи інтернейронів  $E_1 \dots E_N$ . Функціонування здійснюється повністю асинхронно, на відміну від традиційних нейронних мереж на формальних нейронах Маккалока-Пітса з потенційними виходами.

Оптичні сигнали, зібрані масивом смугових фотодіодів із стовпців транспаранта ОКТ, є вхідними сигналами (вектор  $\mathbf{XO}$ ) для вихідних нейронів  $EO_1 \dots EO_m$ . Останні здійснюють часову інтеграцію збуджувальних і гальмівних сигналів, що містяться у векторі  $\mathbf{XO}$ , і формують вихідні сигнали ІНМ (вектор  $\mathbf{YO}$ ). Наявність максимально інтенсивної імпульсації на  $j$ -тому вихідному нейроні свідчить про те, що аналізовані вхідні сигнали максимально схожі на  $j$ -тий еталонний образ. По відношенню середньої за період вимірювання частоти імпульсації цього вихідного нейрона до максимально можливої частоти можна судити про міру відповідності аналізованого і еталонного образів.

У режимі навчання необхідно послідовно подавати на входи еталонні набори сигналів  $x_1^s(t) \dots x_n^s(t)$  ( $s=1 \dots S$ ), відповідні кожному з  $S$  еталонів розпізнаваних образів і відповідним чином міняти клерувальні потенціали між електродами  $Y_i^E$  і  $Y_i^E'$ , а також між електродами  $Y_i^I$  і  $Y_i^I'$  ( $i=1 \dots m$ ). Так, спочатку на входи нейронів  $EI_1 \dots EI_n$  подають сукупність еталонних сигналів першого образу, на

електроди  $Y_i^E$  і  $Y_i^{E'}$  подають від блоку управління (на рис.4 не показаний) позитивну різницю потенціалів  $+U$ ; на електроди  $Y_i^I$  і  $Y_i^{I'}$ , а також на електроди  $Y_i^E$  і  $Y_i^{E'}$  ( $i=1\dots m, i\neq 1$ ) – нульову різницю потенціалів, а на електроди  $Y_i^I$  і  $Y_i^{I'}$  ( $i=1\dots m, i\neq 1$ ) – від’ємну різницю потенціалів  $-U$ . Це приводить до того, що оптичні імпульси, що поступають через ОКТ на збуджувальний вхід першого вихідного нейрона  $EO_1$ , будуть збільшувати вагу зв'язку цього нейрона з тим нейроном, від якого прийшов імпульс (правило Хебба). А імпульси, що поступають на гальмівні входи інших нейронів, збільшують ваги гальмівних зв'язків, що в режимі розпізнавання викликатиме загальмовування цих нейронів неінцидентними їх збудженому стану імпульсами. Ваги зв'язків гальмівного входу першого нейрона і збуджувальних входів інших нейронів залишаються незмінними.

Далі процедуру повторюють для кожної  $s$ -того еталонного образу. При цьому на входи нейронів  $EI_1\dots EI_n$  подають сукупність еталонних сигналів  $s$ -го образу, на електроди  $Y_s^E$  і  $Y_s^{E'}$  подають від блоку управління (на рис. 4 не показаний) позитивну різницю потенціалів  $+U$ ; на електроди  $Y_s^I$  і  $Y_s^{I'}$ , а також на електроди  $Y_i^E$  і  $Y_i^{E'}$  ( $i=1\dots m, i\neq s$ ) нульову різницю потенціалів, а на електроди  $Y_i^I$  і  $Y_i^{I'}$  ( $i=1\dots m, i\neq s$ ) – негативну різницю потенціалів  $-U$ .

Після цього слід протестувати роботу мережі, подаючи на вхід по черзі еталонні образи і контролюючи, аби максимальна інтенсивність імпульсації при  $i$ -тому еталоні було саме на  $i$ -тому виході. Якщо ця вимога виконується, то закінчити навчання. Інакше - змінити випадковим чином порядок представлення еталонів і повторити процес навчання.

### ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕАЛІЗАЦІЇ КОМПАКТНОЇ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ ІНМ

Запропонована реалізація компактної оптоелектронної ІНМ виконана у гібридному вигляді, тобто поєднує оптичні двовимірні просторово-неперервні структури (ОКТ [9]) і електронні (НВІС) компоненти. Як видно з рис.4, дану ІНМ можна виготовити у вигляді «сандвіч-структури». Так, ОКТ являє собою шар рідких кристалів, що знаходиться між скляними пластинами. Між цими ж пластинами поруч з шаром рідких кристалів можна розташувати транспарант  $T$  у вигляді фотопластинки. До цієї твердої конструкції з одного боку «приклеюється» матриця лазерів [7], на яку за технологією гібридних ІС встановлено напівпровідниковий чіп з лінійкою входних нейронів  $EI_1\dots EI_n$ . З іншого боку до цієї твердої конструкції «приклеюється» підкладка з масивом смугових фотодіодів, на якій також встановлено: напівпровідниковий чіп з інтернейронами  $E_1\dots E_N$  та вихідними нейронами  $EO_1\dots EO_m$ , зовнішні елементи нейронів (конденсатори) та контакти для згута дротів, що йде на матрицю лазерів.

Для оцінки розміру площі такої «сандвіч-структури», що приходиться на 1 нейрон, треба визначити роздільну здатність всіх складових. Так, напівпровідникові лазери виготовляються з апертурою 8-10 мкм [7], ОКТ має роздільну здатність 100-200 лін/мм (5-10 мкм) [9], смугові фотодіоди можна виконати шириною 6-8 мкм [11]. Найбільшим значенням є 10 мкм. Якщо вважати технологічно нормальним розміром для оптоелектронних пристроїв апертуру величиною 3 см, то на ній можна розташувати 3000 пікселів. Таким чином, на сьогоднішній день є реальним виготовлення апаратних реалізацій ІНМ з кількістю нейронів близько 3000. Причому це будуть модулі ІНМ, які можна каскадувати за допомогою оптичних засобів і отримувати ІНМ з більшою кількістю елементів. Для порівняння, на основі елементної бази стандартної електронної кМОН-технології з проектною нормою 0,6 мкм виготовляються мікромережі з 21 імпульсним нейроном і 129 синапсами на чіпі розмірами 3,16×3,16 мм (розмір одного нейрона 69×83 мкм<sup>2</sup>, а синапсу - 68×47 мкм<sup>2</sup>) [4].

### ВИСНОВКИ

Запропонований в статті варіант апаратної реалізації оптоелектронної імпульсної нейронної мережі є компактнішим за відомий [5]. Він передбачає використання матриці світлодіодів чи напівпровідникових лазерів, що дозволяє виконати мережу з меншими масо-габаритними показниками у вигляді «сандвіч-структури». Для керування цілим рядком матриці світловипромінювачів потрібні нейронні елементи з великими вихідними струмами, тому було запропоновано схему такого елемента на тиристорі. Описано принципи функціонування запропонованої системи. Її особливістю є організація навчання нейронної мережі за допомогою апаратних засобів (ОКТ) без використання обчислювальних процедур, причому також існує здатність мережі донавчатись і перенавчатись (адаптивність).

Показано, що при сучасному рівні розвитку технології, на основі оптоелектронної елементної бази можна реалізувати ІНМ з кількістю нейронів біля 3000. Для реалізації ІНМ з більшою кількістю нейронів необхідно об'єднувати по декілька мікромереж з кількістю 3000 нейронів кожна за допомогою додаткових оптичних засобів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Maass W. Pulsed Neural Networks / W. Maass and C. M. Bishop., MIT Press, Cambridge, 2001. –281p.
2. Бардаченко В.Ф. Перспективи застосування імпульсних нейронних мереж з таймерним представленням інформації для розпізнавання динамічних образів / В.Ф. Бардаченко, О.К. Колесницький, С.А. Василецький // УСiМ. – 2003 – №6. – С. 73-82.
3. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры. Кн.3: учебное пособие для вузов / Общая редакция А.И.Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 528с.
4. A VLSI Recurrent Network of Integrate-and-Fire Neurons Connected by Plastic Synapses With Long-Term Memory / E.Chicca, D.Badoni, V.Dante, M.D'Andreagiovanni, G.Salina, L.Carota, S.Fusi, and P.Del Giudice // IEEE Transactions on Neural Networks. – September 2003 – vol. 14 – No. 5.
5. Колесницький О.К. Оптоелектронна реалізація імпульсної нейронної мережі / О.К. Колесницький, В.П. Кожемяко, Самра Муавія Хасан Хамо // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (міжнародний науково-технічний журнал). – 2005. – №2 – С. 134-138.
6. Бардаченко В.Ф. Таймерні нейронні елементи та структури: [Монографія.] / В.Ф. Бардаченко, О.К. Колесницький, С.А. Василецький – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 126 с.
7. Princeton Optronics' Advanced High-Power Diode Lasers [Електронний ресурс. Режим доступу: <http://www.princetonoptronics.com/pdfs/HighPowerVCSELarrays.pdf>]
8. А.с. 376787 СССР, МКИ<sup>3</sup> G 06 F 7/650. Устройство для моделирования нейрона / Снежко Е.М. – № 1661157; заявлено 31.05.71; опубл. 05.04.73. Бюл.№17.
9. Пространственные модуляторы света / А.А. Васильев, Д. Касасент, И.Н. Компанец, А.В. Парфенов. – М.: Радио и связь, 1987
10. Колесницький О.К. Метод розпізнавання багатовимірних часових рядів за допомогою імпульсних нейронних мереж / О.К. Колесницький, Самра Муавія Хасан Хамо // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2006. – №2(6). – С. 54-62.
11. Стемпковский А. КМОП-фотодиодные СБИС – перспективная элементная база однокристалльных систем приема и обработки информации / А. Стемпковский, В. Шилин // ЭЛЕКТРОНИКА: наука, технология, бизнес. – 2003. – №2. – С. 14-20.

Надійшла до редакції 12.11.2010р.

**КОЛЕСНИЦЬКИЙ ОЛЕГ КОСТЯНТИНОВИЧ** – к.т.н., докторант, доцент кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

**БОКОЦЕЙ ПРИНА ВІТАЛІВНА** – аспірант, інженер 1-ї категорії кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.