

Хмельницького національного університету. Технічні науки, 2008. – № 6. – С. 43-55.

41. Кондратов В.Т. Свойства и функциональные возможности экспоненциальных функций распределения нормируемых погрешностей в течение времени наработки на метрологический отказ / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2009. – № 1. – С.57-65.

42. Кондратов В.Т. Основы технического языка. Сообщение 1. / В.Т. Кондратов // Законодательная и прикладная метрология. – 2007. – № 6. – С. 112-124.

43. Кондратов В.Т. Основы технического языка. Сообщение 1. / В.Т. Кондратов // Законодательная и прикладная метрология. – 2008. – № 1. – С. 78-91.

44. Кондратов В.Т. Основы технического языка. Сообщение 1. / В.Т. Кондратов // Законодательная и прикладная метрология. – 2008. – № 2. – С. 82-105.

45. Кондратов В.Т. Про чистоту технічної мови спілкування та обміну думками в метрології і вимірювальній техніці // Препринт / НАН України. Ін-т кібернетики; 2002-7. Авторський переклад з видання рос. мовою. Вид. 2-е, випр. і доп. – 59 с.

46. Кондратов В.Т. Правила "ВЛАДИКОН" – основні правила коректного написання наукових праць з метрології та вимірювальної техніки // Препринт / НАН України. Ін-т кібернетики; 2002-8. Авторський переклад з видання рос. мовою. Вид. 2-е, випр. і доп. – 56 с.

47. Кондратов В. Современная метрология: 50 Правил "Владикон". Часть 1 / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2003. – № 1. – С. 7-12.

48. Кондратов В. Современная метрология: 50 Правил "Владикон". Часть 2 / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2003. – № 2. – С. 37-41.

49. Кондратов В. Современная метрология: 50 Правил "Владикон". Часть 3 / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2004. – № 1. – С. 17-23.

50. Кондратов В. Современная метрология: 50 Правил "Владикон". Часть 4 / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2004. – № 2. – С. 10-15.

51. http://sources.ru/magazine/1009/tech_lang.html. Научно-технический язык.

52. The Life of Sir J.J. Thomson", Lord Rayleigh, Cambridge University Press, 1942. – p. 198.

53. http://revolution.allbest.ru/international/00250837_0.html. Международная организация законодательной метрологии.

54. <http://www.metrob.ru/HTML/zak/nach.html>. Законодательная метрология.

Надійшла до редакції

4.11.2010 р.

УДК 004.032.26

О.К. КОЛЕСНИЦЬКИЙ, І.В. БОКОЦЕЙ, С.С. ЯРЕМЧУК

Вінницький національний технічний університет

ПРИСТРОЇ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЙРОНА. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВИНАХОДІВ ТА ПАТЕНТІВ

В статті проведено класифікацію відомих пристроїв для моделювання нейрона, розглянуто типові види пристроїв з різною формою представлення інформації, виконані на різних видах елементної бази. Виявлено недоліки відомих пристроїв та запропоновано шляхи їх вдосконалення: для багаторозрядних цифрових ПМН – це підвищення швидкодії та розширення функціональних можливостей, а для найпростіших аналогових ПМН – зменшення апаратної складності та організація оптичних входів та виходів з великою вихідною потужністю.

Classification of the known devices for neuron's simulation (DNS) is conducted in the article. The typical types of the devices with the different forms of information representation are considered, implemented on the different types of elementary basis. It is found out the lacks of the known devices and offered directions of their perfection: for multidigit digital DNS are the fast-acting's increasing and functional possibilities' expansion, but for simplest analog DNS are apparatus simplification and organization of optical inputs and outputs with high-power.

Ключові слова: нейрон, пристрій для моделювання нейрона, апаратна реалізація, нейронна мережа

Вступ

На сучасному етапі розвитку техніки та технології людський мозок набагато краще за комп'ютерні системи виконує такі складні задачі, як аналіз та розпізнавання великих об'ємів інформації, яка надходить від органів сприйняття; задачі пошуку оптимальних рішень за умови багатопараметричних вхідних даних; задачі планування та прогнозування за відсутності повної початкової інформації. Комп'ютер, навпаки, найбільш ефективно використовується для розв'язання задач, пов'язаних з точними обчисленнями за формулами, законами, арифметичними операціями і т. ін. Для того, щоб поєднати потужності мозку та комп'ютера, необхідно створити апаратно багатфункційні штучні нейронні мережі з великою кількістю нейронів.

Постановка задачі. Як відомо [1], 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 наблизитись до кількості нейронів у мозку людини – $(2...5) \times 10^{11}$. Тому вельми

актуальним є питання про ефективну апаратну реалізацію моделей нейронів та нейронних мереж в цілому.

Мета цієї статті – провести класифікацію та порівняльний аналіз відомих пристроїв для моделювання нейрона, виявити недоліки і запропонувати шляхи їх усунення.

1. Актуальність дослідження і розробки пристроїв для моделювання нейрона

Вивчення принципів функціонування біологічних нейронних мереж і створення різних їх моделей викликано прагненням покращити функціональність, швидкодюю, ефективність, гнучкість і надійність технічних систем. Результати вивчення нейронних мереж знаходять застосування при створенні пристроїв для розпізнавання зорових і звукових образів, для діагностики стану технічних об'єктів, розробки методів адаптивного управління, конструювання надійних і гнучких обчислювальних машин, навчання роботів складній поведінці та у багатьох інших випадках.

Особливе значення при дослідженні нейронних мереж набуває метод моделювання. Це пов'язано з тим, що неможливо одночасно реєструвати електричні процеси для сотень тисяч нейронів у біологічних нейронних мережах. Існують два основні підходи до моделювання нейронних мереж. Задачею першого підходу є пояснення і опис інформаційної функції нейронної мережі, а потім її відтворення на основі логічних і обчислювальних середовищ, здатних до пристосовування і самонавчання, циклічної активності і т. ін.; другий підхід пов'язаний з розробкою на основі нейронних елементів структурно-функційних моделей цілих відділів біологічних систем (наприклад, аналізаторів або ефекторних систем мозку) для того, щоб зрозуміти, як все-таки працює мозок, як реалізуються окремі елементарні акти розумової діяльності; а також для створення штучних нейронних мереж з широкими функційними можливостями та високою інформаційною ємністю.

Хоча сучасна електроніка працює з наносекундними сигналами, біологічні нейрони генерують імпульси мілісекундної тривалості. Мозок, що має велике нагромадження зв'язків між нейронами, генерує 10^{16} операцій в секунду, незважаючи на низьку швидкодюю окремих нейронів, в той час, коли для суперкомп'ютера ця цифра складає 10^{12} операцій за секунду. Процес сприйняття зображення за глибиною займає менше 100 елементарних нейронних операцій завдяки наявності величезної складності зв'язків у мозку. Хоча таке оцінювання переваг і недоліків біологічної системи з електронною не є абсолютно справедливим, розуміння хоча б деяких механізмів обробки інформації в мозку і практична реалізація цих принципів на сучасній елементній базі в ефективній системі обробки інформації – актуальна наукова задача. Для її розв'язання потрібно дослідити, як і які надструктури нейронів можуть моделювати елементарні акти розумової діяльності. А для цього потрібно мати максимально адекватні до біологічних нейронів фізичні та комп'ютерні моделі нейронних елементів та мереж.

Як бачимо, при побудові нейроподібних систем штучного інтелекту можна виділити два основних підходи: так звані підходи "зверху" та "знизу". Перший підхід – підхід "зверху" – передбачає створення таких функціональних або інформаційних структур, які моделюють процеси, що відбуваються в мозку людини під час сприйняття інформації. Внутрішня структура самого мозку при цьому не враховується. Тому нейронні елементи, які використовують підхід "зверху", використовуються для вивчення принципів функціонування мозку, а тому їх структура може бути більш складною для виконання великого числа операцій. Другий підхід передбачає створення так званих імітаційних структур, тобто таких систем, структура яких подібна структурі мозку людини. Нейронні елементи для такого підходу повинні бути найпростішими, але в той же час повинні бути досить точними, оскільки вони будуть використовуватись для побудови нейронних мереж.

2. Класифікація пристроїв для моделювання нейрона

На сьогоднішній день існує багато різноманітних підходів до побудови пристроїв для моделювання нейронів (ПМН). Тому постає задача їх аналізу та класифікації.

ПМН можна класифікувати за такими ознаками:

- форма представлення інформації (цифрова або аналогова);
- тип елементної бази;
- характер настроювання синапсів (постійні або змінні);
- час передачі сигналів (синхронні або асинхронні).

Класифікація ПМН по формі представлення інформації показана на рис. 1.

По формі представлення інформації всі ПМН можуть бути розділені на два класи – див. рис. 1:

ПМН, в яких вхідні, вихідні сигнали та вагові коефіцієнти зв'язку представляються у вигляді цифрових кодів (вони зазвичай будуються



Рис. 1. Класифікація пристроїв для моделювання нейрона по формі представлення інформації

на цифрових елементах – інверторах, логічних елементах, тригерах, регістрах, цифрових суматорах, цифрових компараторах, запам'ятовуючих пристроях та ін.). Цифрові ПМН бувають однорозрядні (наприклад, формальний нейрон) та багаторозрядні (див табл. 1);

- ПМН, в яких вхідні, вихідні сигнали та вагові коефіцієнти зв'язку представляються у вигляді аналогових сигналів (вони зазвичай будуються на аналогових елементах – операційних підсилювачах та компараторах, або на електронних компонентах: діодах, транзисторах, тиристорах, резисторах, конденсаторах та ін.). Залежно від виду аналогового сигналу розрізняють ПМН з представленням інформації у вигляді: 1) рівня напруги, 2) величини струму, 3) частоти імпульсів, 4) тривалості часових інтервалів (див. табл. 1).

Класифікація нейронних елементів по типу елементної бази представлена на рис. 2. Серед електронної елементної бази можна виділити три основні групи: надвеликі інтегральні схеми (НВІС), інтегральні схеми середнього ступеня інтеграції (СІС) та програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС). НВІС містять до 1 мільйону елементів в кристалі, тоді як СІС лише до 1000 елементів. Основним елементом аналогових мікросхем є біполярні та польові транзистори.

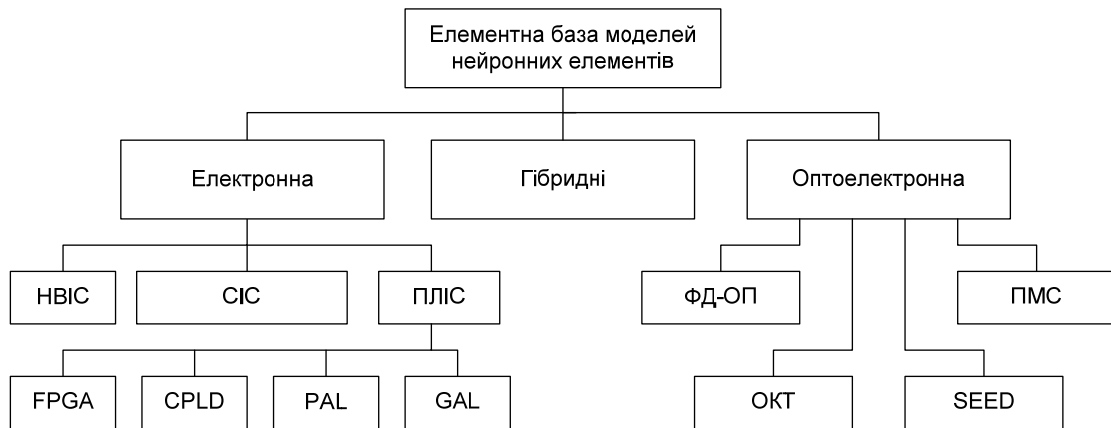


Рис. 2. Класифікація ПМН по типу елементної бази

ПЛІС (*programmable logic device, PLD*) – електронний компонент, що використовується для створення цифрових інтегральних схем. На відміну від звичайних цифрових мікросхем, логіка роботи ПЛІС задається за допомогою програмування, а не при виготовленні. Основні типи ПЛІС:

- FPGA (*field-programmable gate array*);
- CPLD (*complex programmable logic device*);
- PAL (*programmable array logic*);
- GAL (*gate array logic*).
- Типи PAL і GAL мають більш просту архітектуру. Альтернативою ПЛІС є:
- БМК (*Uncommitted Logic Array*) – базові матричні кристали, що вимагають заводського виробничого процесу для програмування. Вони являються великими інтегральними схемами, які програмуються технологічно шляхом нанесення маски з'єднань останнього шару металізації;
- ASIC (*application-specific integrated circuit*) – спеціалізовані замовні для вирішення конкретної задачі інтегральні схеми;
- спеціалізовані процесори або мікроконтролери (повільніші за ПЛІС).

Серед оптоелектронної елементної бази можна виділити чотири основні групи: оптоелектронні мікросхеми на основі фотодіодів та операційних підсилювачів (ФД-ОП), пристрої на основі оптично керованих транспарантів (ОКТ), пристрої на основі оптичних бістабільних SEED-приладів (*Self-Electrooptic Effect Device*) та пристрої на основі просторово-часових модуляторів світла (ПМС).

Класифікація ПМН по характеру настроювання синапсів:

- з фіксованим ваговими коефіцієнтами (обираються одразу, виходячи з умов задачі);
- з настроюваними ваговими коефіцієнтами (в процесі навчання відбувається настроювання ваги синаптичних зв'язків).

В ряді нейронних елементів функція активації може залежати від часу передачі імпульсу (сигналу) по каналах зв'язку τ_{ij} . Тому за часом передачі сигналів моделі нейронних елементів можна поділити на синхронні та асинхронні. *Синхронним нейроном* називають такий нейрон, в якого час передачі τ_{ij} кожного зв'язку дорівнює або нулю, або фіксованій сталій τ . *Асинхронним* називають такий нейрон у якого час передачі τ_{ij} для кожного зв'язку між елементами u_i і u_j свій, але також постійний.

3. Відомі пристрої для моделювання нейрона та їх недоліки

Перелік ПМН, знайдених у патентних джерелах колишнього СРСР (СНГ), України та РФ, представлено у табл. 1. Нижче розглянемо детально ПМН окремих типів, що відображені на рис. 1.

З проведеного огляду літератури видно, що на теренах колишнього СРСР дослідженнями в області ПМН займалися такі інститути як Уфімський авіаційний інститут, Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова АН України, Ростовський державний університет, Таганрозький радіотехнічний інститут, Львівський державний медичний інститут, Інститут фізіології ім. Павлова, Львівський політехнічний інститут,

Вінницький національний технічний університет, Казанський державний університет, Одеський державний університет, Дніпропетровський державний університет, Московські ВУЗи (МДУ, МІФІ, МІРЕА, МВТУ ім. Баумана) та інші.

Таблиця 1

Пристрої для моделювання нейрона, знайдені в патентних джерелах колишнього СРСР, України та РФ

№ п/п	Вид ПМН	А.с. СССР	Росія Пт-патент Зв-заявка	Патент України
1	Однорозрядні цифрові	619933, 964662, 1013984		
2	Багаторозрядні цифрові	682910, 708369, 736130, 765823, 883927, 993292, 1075632, 1479944, 1589296, 1709356, 1737468	Пт 2029368, Пт 2059290, Пт 2093889	19466, 22679
3	Аналогові, напруга	494752, 553635, 553636, 565306, 591877, 618755, 652575, 708368, 860096	Пт 2295769	
4	Аналогові, струм	1138813		
5	Аналогові (цифрові), частота імпульсів	376787, 409245, 422006, 437103, 452016, 453710, 482766, 512478, 512479, 519730, 528580, 563680, 623214, 623215, 647698, 647699, 675431, 694873, 696497, 746594, 746597, 746597, 750522, 765826, 781846, 796869, 809245, 853632, 881783, 886016, 894744, 902033, 913414, 913415, 920772, 922809, 955118, 963003, 982028, 991449, 997052, 1084829, 1089592, 1103259, 1171773, 1179389, 1324044, 1360436, 1387023, 1401490, 1425731, 1439631, 1439632, 1458879, 1464181, 1497626, 1501101, 1520558, 1561076, 1564654, 1585810, 1585811, 1642485, 1645973, 1672482, 1691858	Зв 92009179, Зв 93051515, Зв 94039141, Зв 96105745, Зв 2002114269, Пт 2024059, Пт 2028669, Пт 2034332, Пт 2050019, Пт 2093889,	22956, 25525, 40452, 43371, 46470, 51827, 52771
6	Аналогові, тривалість імпульсу	Запропоновано авторами статті		

Одним з представників цифрових однорозрядних ПМН є модель формального нейрона (рис. 3) [2], який містить логічні елементи І-НІ та інвертори з входними діодами Шотткі та транзисторами. В основі моделі – звичайний R-S-тригер. Цифрові логічні схеми часто використовуються для побудови формального нейрона, але також іноді використовуються екзотичні елементи, як от іонотронний транзистор (а.с. 619933, табл. 1) або пристрій з циліндричними магнітними доменами – ЦМД (а.с. 1013984, табл. 1). Формальні моделі нейрона є дуже спрощеними, оскільки входні та вихідні сигнали в них бінарні (хоча ваги розрядів можуть бути багатозначними). Саме тому вони є малофункціональними і дуже рідко на сучасному етапі використовуються для побудови нейронних мереж. Зараз перспективнішими є моделі нейронів з багатозначними (нескінченнозначними) входними, вихідними сигналами та вагами синапсів [3].

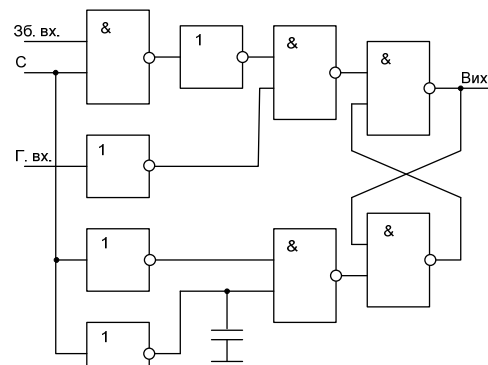


Рис. 3. Модель формального нейрона

Цифрові багаторозрядні ПМН є більш численним класом (див. табл. 1). Їх типовим представником є пристрій [4] для моделювання нейрона (рис. 4), який містить дві групи інформаційних входів $1_1 \dots 1_n$ і $2_1 \dots 2_n$, n блоків $3_1 \dots 3_n$ зміни синаптичних ваг, установчі входи $4_1 \dots 4_n$, суматор 5, перший 6 і другий 7 елементи І, перший 8 і другий 9 регістри, логічний блок 10, керуючі входи 11 – 16, інформаційні виходи 17 – 20 з відповідними зв'язками. Після встановлення всіх регістрів і тригерів в нульовий стан здійснюють налаштування моделі на потрібний режим функціонування. Входи 15 і 16 задають режими роботи пристрою. Для режиму градуального підсумовуючого нейрона подають код операції 10, для режиму функціонування формального нейрона – 01, а для режимів скалярного добутку векторів, цифрового інтегратора та суматора входних сигналів – 00, який відключає логічний блок 10. В блоках $3_1 \dots 3_n$ зміни синаптичних ваг відбувається множення входних сигналів $x_{i,1}, \dots, x_{i,n-1}$ на поточні значення синаптичних ваг $\gamma_{i,1}, \dots, \gamma_{i,n-1}$ і, в режимах градуального та формального нейронів, множення величини порогу ($-\theta$) на 1, отримані добутки підсумовуються в суматорі 5 (для перших двох режимів $P_i = \sum_{j=1}^{n-1} x_{ij} \cdot \gamma_{ij} - \theta$). На виході 17 пристрою

видається сигнал добутку вхідних векторів $\sum_{j=1}^{n-1} x_{ij} \cdot \gamma_j$. Для режиму суматора вхідних сигналів значення синаптичних ваг $\gamma_{i,1}, \dots, \gamma_{i,n-1}$ задаються рівними одиниці. На виході 20 формується вихідний сигнал $Y_{вих}$, який буде для режиму градуального $Y_{вих} = \max\{0; P_i\}$ і формального $Y_{вих} = \text{sign}(\sum_{j=1}^{n-1} x_{ij} \cdot \gamma_{ij} - \theta)$ нейрона.

Недоліком цього пристрою є недостатня швидкодія через послідовний принцип оброблення n операндів в суматорі. Взагалі, головною перевагою багаторозрядних цифрових ПМН є висока (цифрова) точність моделювання, а головним недоліком – великі апаратурні витрати.

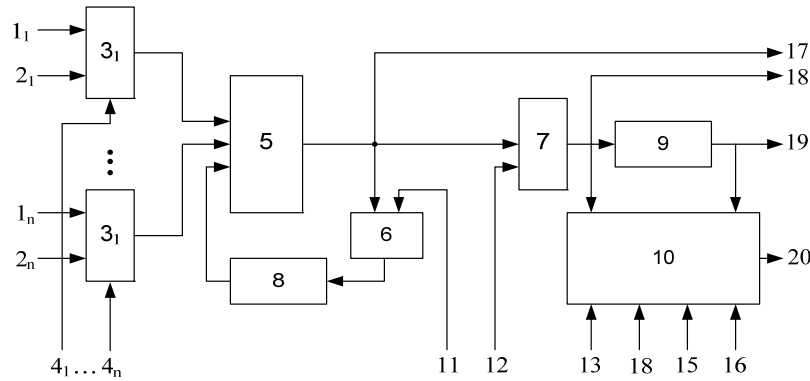


Рис. 4. Багаторозрядний цифровий пристрій для моделювання нейрона

Типовим представником аналогових ПМН, в яких інформація представляється у вигляді рівня напруги є пристрій для відтворення передатної функції нервової клітини (рис. 5) [5], який складається з суматора 1, інтеграторів 2 і 3, інвертора 4, блока 5 множення, реле 6 з контактною групою 7, входов 8 і 9 та виходу. Як бачимо, основою таких ПМН є операційні підсилювачі, тому вони мають меншу точність моделювання ніж багаторозрядні цифрові ПМН, але апаратно простіші за них. Незважаючи на це, апаратурні витрати таких ПМН ще не дозволяють будувати на їх основі великомасштабні нейронні мережі.

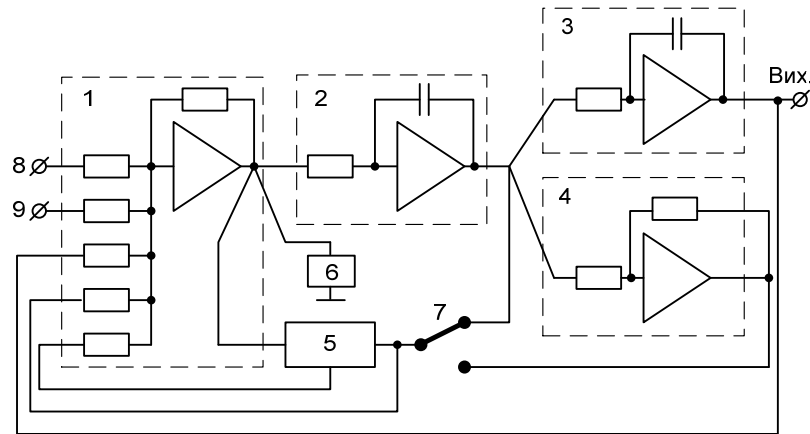


Рис. 5. Пристрій для відтворення передатної функції нервової клітини

Одним з представників аналогових ПМН, в яких інформація представляється у вигляді величини струму є пристрій для моделювання нейрона [6], який побудований на I²Л-вентиліях і містить двоколекторні інвертори-мультиплікатори струму, чотирьохзначні I²Л-вентилі та порогові детектори. Функціональна схема пристрою зображена на рис. 6. Вона містить групу каналів збудження 1 та гальмування 2, суматор 3, пороговий блок 4 і блок 5 формування вихідного сигналу. Кожна група каналів 1 та 2 містить блоки 6 – 9 зважування вхідних сигналів і вхідні порогові блоки 10 – 13 відповідно. Група каналів збудження 1 додатково містить суматор 14 зважених вхідних сигналів та інвертор 15.

На входи 16-19 подаються ідентичні сигнали у вигляді дискретних рівнів "0", "1", "2" та "3" струму, які представляють значення збуджувальних X_1 і X_2 та гальмівних Y_1 і Y_2 сигналів. Струми інвертуються і мультиплікуються на два виходи. Якщо струм X_1 менше заданого порогу T_1 ($X_1 < T_1$), пороговий детектор блоку 10 відкривається, а чотирьохзначний I²Л-вентиль закривається; аналогічно якщо струм X_2 менше заданого порогу T_2 ($X_2 < T_2$), закривається чотирьохзначний I²Л-вентиль. На виході 20 пристрою струм буде рівним нулю. Якщо ж струми X_1 та X_2 будуть більші зазначених порогів T_1 та T_2 , то на виході 20 буде протікати струм $3 - [3 - (X_1 + X_2)] = (X_1 + X_2)$ одиниць. Якщо сигнали на входах 18 і 19 перевищують

свої пороги або рівні їм $Y_1 \geq T_3; Y_{21} \geq T_4$, то відбуваються процеси, аналогічні як в каналах збудження і на виході 20 буде протікати струм $3 - \{3 - [(X_1 + X_2) - (Y_1 + Y_2)]\} = [(X_1 + X_2) - (Y_1 + Y_2)]$ одиниць струму.

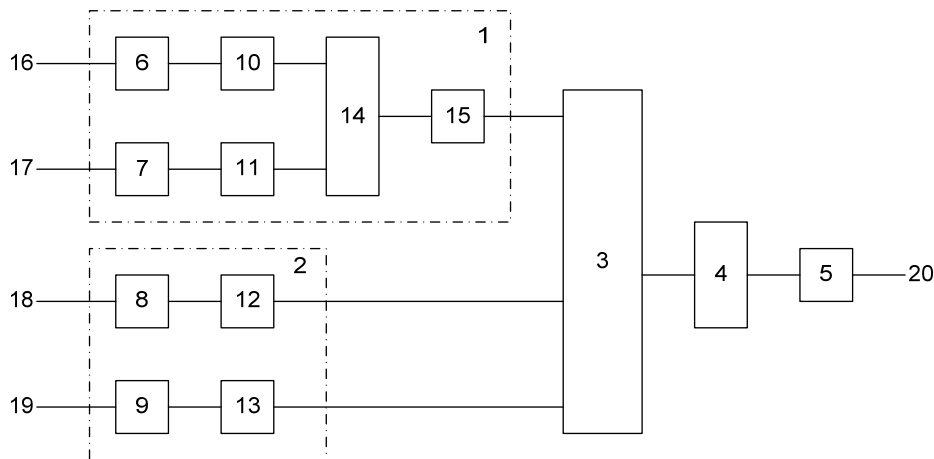


Рис. 6. Пристрій для моделювання нейрона на I²L-вентилях

Найбільш численними є ПМН з частотно-імпульсною формою представлення інформації (див. табл. 1). Напевно, це пояснюється тим, що в біологічних нейронах інформація також представляється імпульсами, частота яких залежить від рівня збудження. За апаратною складністю такі ПМН можна поділити на три класи:

1) найскладніші – з використанням цифрової елементної бази (лічильники, тригери, перетворювачі частота-напруга та напруга-код). Приклад – патент України № 46470,

2) середньої складності – з використанням аналогової елементної бази (операційні підсилювачі, аналогові компаратори, перетворювачі частота-напруга та напруга-частота). Приклад – а.с. СРСР № 886016.

3) найпростіші – з використанням нелінійних електронних (оптоелектронних) елементів (одноперехідний транзистор [7], лавинний транзистор [8], тиристор [9], біспін-прилад [10], тригер Шмідта на МДН-транзисторах [11]).

Звичайно, з точки зору апаратної реалізації нейромереж з великою кількістю елементів, найбільш привабливими є найпростіші ПМН.

В якості прикладу розглянемо ПМН [7], який містить (рис. 7) одноперехідний транзистор 1, біполярний транзистор 2, резистори 3-6, резистор навантаження 7, конденсатори 8-10, діоди 11-12. Активним елементом є одноперехідний транзистор 1, резистори 3, 5 і 7 забезпечують заданий режим роботи, збуджувальний 13 і гальмівний 14 входи містять діоди 11, 12 і ланцюги часового підсумовування, які складаються з резисторів 6, 4 і конденсаторів 10, 9.

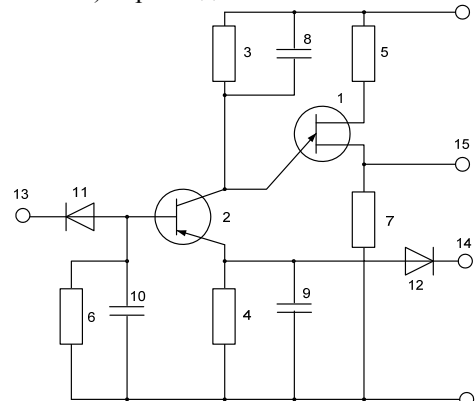


Рис. 7. Пристрій для моделювання нейрона на одноперехідному транзисторі

Недоліками пристроїв [7-11] є наявність електричних входів та виходів (що не дозволяє організувати велику кількість зв'язків нейронів) та низька навантажувальна спроможність (неможливість управляти великими струмами, необхідними для живлення матриць світлодіодів або напівпровідникових лазерів при організації оптичних виходів нейрона).

ПМН, в яких інформація представляється у вигляді тривалості часових інтервалів, під час проведеного огляду знайдено не було. Однак авторами в роботі [12] запропоновано модель нейрона логіко-часового типу, який працює саме з тривалостями часових інтервалів.

4. Апаратна реалізація нейронних мереж та шляхи вдосконалення пристроїв для моделювання нейрона.

З проведеного в попередньому пункті статті огляду типових ПМН видно, що:

1) цифрові однорозрядні ПМН дуже спрощено відтворюють роботу біологічного нейрона, тому були доречні тільки на початковому етапі дослідження штучних нейронних структур,

2) побудова цифрових багаторозрядних ПМН потребує значних апаратних витрат, але вони є досить точними і багатофункціональними, а тому придатні для використання при детальному вивченні та дослідженні роботи окремих біологічних нейронів або невеликих ансамблів нейронів. Огляд показав, що їх недоліки – низька швидкодія і значна апаратна складність. Тому необхідно збільшувати швидкодію таких пристроїв, що і пропонується авторами в роботах [13-15];

3) ПМН, які працюють з аналоговою інформацією, що представлена напругою, струмом або частотою, зазвичай значно простіші за багаторозрядні цифрові ПМН, але мають обмежені функціональні

можливості та невелику точність моделювання. Тому, крім використання для дослідження функціонування біологічних нейронів, їх можна застосовувати для побудови апаратних реалізацій нейронних мереж з великою кількістю елементів.

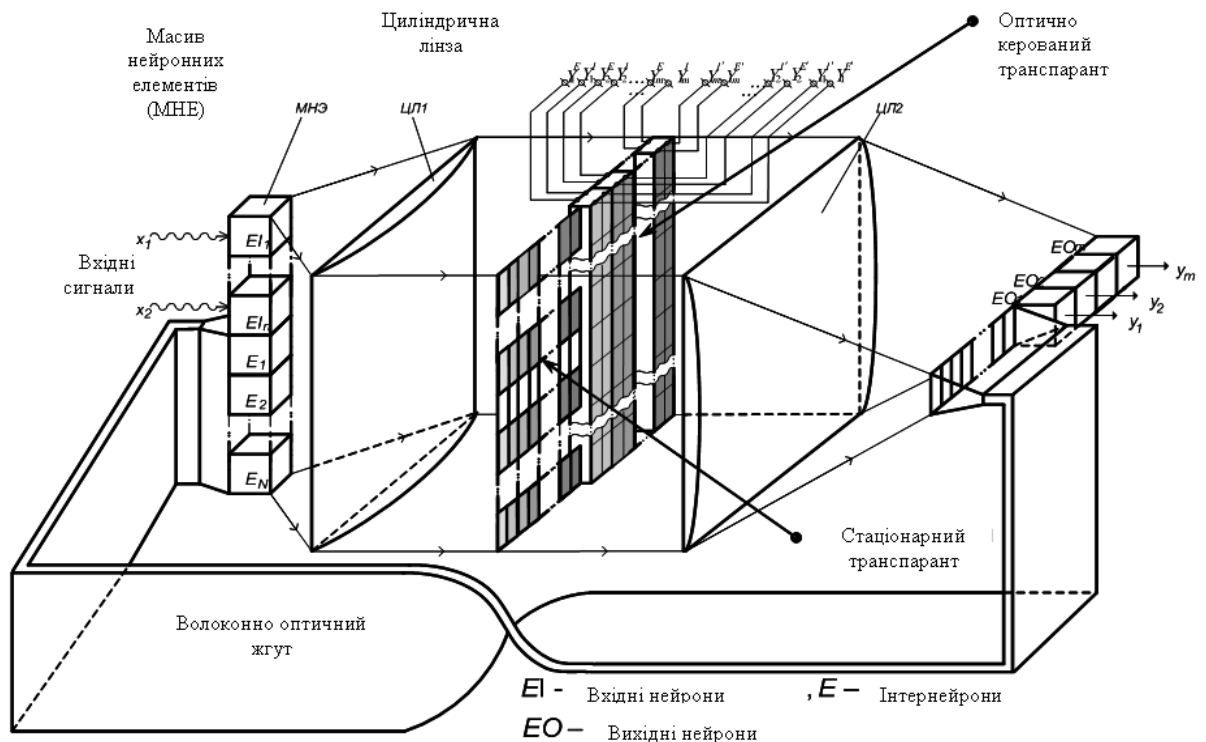


Рис. 8. Структура імпульсної нейронної мережі на основі оптоелектронної елементної бази ПНОЕС

Безсумнівним є той факт, що для отримання максимуму переваг від застосування нейронних мереж для практичних задач розпізнавання образів різної природи, потрібні апаратні реалізації 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 такі нейронні елементи повинні бути якомога простішими і придатними для виконання в інтегральному вигляді.

Відома, наприклад, структура імпульсної нейронної мережі [16] на основі оптоелектронної елементної бази просторово-неперервних оптоелектронних структур, показана на рис. 8. Вона складається з n входніх нейронних елементів $EI_1...EI_n$, на які поступають входні сигнали $x_1...x_n$, N інтернейронів $E_1...E_N$, двох циліндричних лінз ЦЛ1 і ЦЛ2, транспаранта Т (виконаного, наприклад, у вигляді фотопластики, коефіцієнти прозорості локальних ділянок якої відповідають значенням вагових коефіцієнтів зв'язку інтернейронів), оптично керованого транспаранту ОКТ із системою з $2m$ пар смугових вертикальних електродів, m вихідних нейронних елементів $EO_1...EO_m$, волоконно-оптичного жгута ВОЖ з фоконами Ф1 і Ф2. 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' ($i=1...m$). Транспарант Т і ОКТ утворюють загальну матрицю ваг зв'язків всіх нейронів ІНМ.

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 входніх 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 світловипромінювачів 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.

Таким чином, шляхи покращення багаторозрядних цифрових ПМН полягають у підвищенні швидкодії, а аналогових ПМН – в підвищенні навантажувальної спроможності (вихідної оптичної потужності) та створенні таких ПМН, які дозволяли б будувати на їх основі нейронні мережі з поліпшеними масогабаритними показниками. Результати проведеного аналізу наведено у вигляді логічної структури на рис. 9.

Для підвищення швидкодії та розширення функціональних можливостей багаторозрядних цифрових ПМН авторами створено декілька варіантів ПМН [13-15], в яких в якості основного блоку використано просторово-часовий суматор, який працює на базі різницевих зрівів. Пристрої працюють у режимах формального нейрона (тобто порівняння зваженої суми входніх сигналів з порогом), цифрового

інтегратора (тобто підсумовування вхідних сигналів), скалярного добутку вхідних векторів.

Для усунення недоліків найпростіших аналогових ПМН потрібно зменшувати апаратну складність моделі та організувати оптичні входи та виходи з великою вихідною оптичною потужністю. Для цього в роботі [17] пропонується ПМН на тиристорі, який може керувати матрицею напівпровідникових лазерів, а також структура нейронної мережі на основі таких ПМН.



Рис. 9. Недоліки існуючих ПМН та шляхи їх покращення

Висновки

В статті доведено актуальність дослідження пристроїв для моделювання нейрона з огляду застосування їх в нейромережевих системах розв'язання когнітивних задач (розпізнавання образів, паралельна обробка, прийняття рішень за умов невизначеності та ін., коли застосування традиційних комп'ютерів стає неефективним). Зроблено ґрунтовний патентний пошук, в результаті якого було знайдено 91 авторське свідоцтво СРСР, 9 патентів та 5 заявок Росії, 9 патентів України, які стосуються пристроїв для моделювання нейронів. Проведено класифікацію відомих пристроїв для моделювання нейронів за різними критеріями, розглянуті типові види нейронних елементів з різною формою представлення інформації, проаналізовано різні види елементної бази. Проведено опрацювання недоліків відомих пристроїв для моделювання нейронів та запропоновано напрямки їх вдосконалення: для багаторозрядних цифрових ПМН – це підвищення швидкодії та розширення функціональних можливостей за рахунок використання в якості основного блоку просторово-часового суматора, який працює на базі різницевої зрізи, а для найпростіших аналогових ПМН – зменшення апаратної складності та організація оптичних входів та виходів з великою вихідною оптичною потужністю.

Література

1. Галушкин А. И. Нейрокомпьютеры. Кн. 3: Учебное пособие для вузов / [Общая редакция А. И. Галушкина]. – М.: ИПРЖР, 2000. – 528 с. – ISBN 5-93108-007-4.
2. А. с. 964662 СССР, МКИ³ G 06 F 7/650. Модель формального нейрона / Г. И. Фурсин (СССР). – № 3002819/18-24; заявл. 05.11.80; опубл. 07.10.82, Бюл. № 37.
3. Бардаченко В. Ф. Таймерні нейронні елементи та структури Монографія // В. Ф. Бардаченко, О. К. Колесницький, С. А. Василецький. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005, 126 с.
4. А. с. 1479944 СССР, МКИ³ G 06 F 7/650. Устройство для моделирования нейрона / А. В. Каляев, Ю. В. Чернухин, Ю. А. Брюхомицкий, Г. А. Галуев (СССР). – № 4296969/31-13; заявл. 24.08.87; опубл. 15.05.89, Бюл. № 18.
5. А. с. 860096 СССР, МКИ³ G 06 F 7/650. Устройство для воспроизведения передаточной функции нервной клетки / А. А. Киринов (СССР). – № 2723778/18-24; заявл. 26.01.79; опубл. 30.08.81, Бюл. № 32.
6. А. с. 1138813 СССР, МКИ³ G 06 F 7/650. Устройство для моделирования функций нейрона / Кузнецова В.Л., Раков М.А., Овсяк В.К. – № 3572016/28-13; заявлено 30.03.83; опубл. 07.02.85. Бюл. № 5.
7. А. с. 623215 СССР, МКИ³ G 06 F 7/650. Устройство для моделирования нейрона /

- М. М. Кряхтунова, Б. А. Соколов, Ю. Ф. Титов (СССР). – № 2466323/18-24; заявл. 24.03.77; опубл. 05.09.78, Бюл.№ 33.
8. А. с. 482766 СССР, МКИ³ G 06 F 7/650. Модель нейрона / В. Г. Иващенко, Е. Д. Цыбышев (СССР). – № 2024002/18-24; заявл. 12.05.74; опубл. 30.08.75, Бюл.№ 32.
9. А. с. 376787 СССР, МКИ³ G 06 F 7/650. Устройство для моделирования нейрона / Е. М. Снежко (СССР). – № 1661157/18-24; заявл. 31.05.71; опубл. 05.04.73. Бюл.№ 17.
10. Пат. 22956 Україна, МПК G 06 F 7/50. Модель нейрона / О. К. Колесницький, В. П. Кожем'яко, М. Б. Нізельський, С. А. Василецький, заявник і власник патенту Вінницьк. нац. технічн. ун-т – № 97041757/18-24; заявл. 15.04.97; опубл. 05.05.98.
11. Biomorphie analog pulse – coupled neural circuits /Tyson Thomas. NASA TECH BRIEF Vol. 25, No. 6, 06.01.2001
12. Моделі нейронних елементів логіко-часового типу / В.П. Кожем'яко, Т.Б. Мартинюк, І.В. Мороз, А.А. Яровий // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – № 14. – С.63-71.
13. Пат. 27751 Україна, МПК G 06 F 7/50. Пристрій для моделювання нейрона / В. П. Кожем'яко, Т. Б. Мартинюк, А.В. Кожем'яко, І. В. Мороз; заявник і власник патенту Вінницьк. нац. технічн. ун-т – № u200708023; заявлено 16.07.07; опубл. 12.11.07, Бюл.№ 18.
14. Пат. 34466 Україна, МПК G 06 F 7/50. Пристрій для моделювання нейрона / В. П. Кожем'яко, Т. Б. Мартинюк, О. К. Колесницький, І. В. Мороз, О. І. Чечельницький, заявник і власник патенту Вінницьк. нац. технічн. ун-т – № u200803614; заявлено 21.03.08; опубл. 11.08.08, Бюл.№ 15.
15. Пат. 38491 Україна, МПК G 06 F 7/50. Пристрій для моделювання нейрона / Т. Б. Мартинюк, Л. М. Куперштейн, І. В. Мороз, О. І. Чечельницький, заявник і власник патенту Вінницьк. нац. технічн. ун-т – № 200810096; заявлено 04.08.08; опубл. 12.01.09, Бюл.№ 15.
16. Kolesnytskyj O. K. Optoelectronic Implementation of Pulsed Neurons and Neural Networks Using Bispin-Devices / O. K. Kolesnytskyj, I. V. Bokotsey, S. S. Yaremchuk // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*, 2010, Vol.19, № 2, pp.154-165.
17. Колесницький О. К. Компактна оптоелектронна реалізація імпульсної нейронної мережі / О. К. Колесницький, І. В. Бокоцей // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2010. – № 2. – С.63-71.

Надійшла до редакції
23.11.2010 р.