

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ АРХІТЕКТУРИ СПАЙКОВИХ НЕЙРОКОМП'ЮТЕРІВ

¹Вінницький національний технічний університет

Уточнено визначення термінів «нейрокомп'ютер» та «архітектура нейрокомп'ютера», обґрунтовано вибір спайкових нейромереж як операційного блоку нейрокомп'ютера. На основі аналізу сучасного рівня знань щодо архітектури нейрокомп'ютерів і на основі їх узагальнення сформульовано принципи побудови архітектури спайкових нейрокомп'ютерів за аналогією з відомими принципами побудови цифрових комп'ютерів фон Неймана.

Ключові слова: архітектура нейрокомп'ютера, спайкова нейронна мережа, принципи побудови.

Вступ

Важливим завданням нейрокомп'ютерної техніки є розробка гнучких подібних мозку архітектур нейрокомп'ютерів, здатних до широкого спектру реально-часових застосувань. При цьому потрібно прагнути до максимально можливої кількості нейронів (в ідеалі — як у мозку людини — 10^{11}) та до ультра-низьких потужностей споживання і компактного розміру, як у біологічних нейронних систем. Створення подібних мозку нейрокомп'ютерів дозволить вирішити дві взаємопов'язані задачі: 1) створення «розумних» комп'ютерів для виконання складних когнітивних неформалізованих завдань; 2) розкриття таємниць роботи мозку людини шляхом його зворотного конструювання технічними засобами. Найближчою стратегічною метою є створення нейроморфних ядер (чипів апаратних нейромереж), які інші вчені зможуть використовувати для перевірки своїх власних теорій щодо принципів роботи кори мозку і для побудови на їх основі різноманітних нейрокомп'ютерних систем для практичних застосувань. Ці нові знання можуть бути потім використані в наступному поколінні нейроморфних ядер.

Постановка задачі

У науковій літературі існує велика кількість інформації про різноманітні архітектури побудови нейрокомп'ютерів. Оскільки всі відомі нейрокомп'ютери можна розділити на 3 великих класи (програмні, програмно-апаратні та апаратні), то і архітектури також можна розглядати для програмних [1, 2], програмно-апаратних [3, 4] та апаратних нейрокомп'ютерів [4]. Оскільки максимум переваг нейрокомп'ютерів перед традиційними комп'ютерами можна отримати тільки при їх апаратній реалізації [4, 5], то в цій статті будемо розглядати тільки архітектури апаратних нейрокомп'ютерів. Широко відомими є принципи побудови цифрових комп'ютерів, сформульовані свого часу Джоном фон Нейманом [6]

Мета цієї статті — аналіз відомих теоретичних матеріалів щодо побудови архітектури нейрокомп'ютерів і на основі їх узагальнення формулювання принципів побудови архітектури нейрокомп'ютерів за аналогією з відомими принципами побудови цифрових комп'ютерів фон Неймана.

1. Розвиток поняття нейрокомп'ютера

Схемотехнічний (конструктивно-технологічний) та системотехнічний (архітектурний) аспекти розробки засобів обчислювальної техніки тісно пов'язані один з одним, що грає важливу роль для вибору оптимальної стратегії проектування комп'ютерів [7]. Це положення повністю стосується і нейрокомп'ютерів. Тут навіть важко визначити, що є первинним, а що вторинним. З одного боку, нові архітектурні рішення стимулюють розвиток технології, а з іншого боку, досягнення технології наштовхують на зміну архітектурних рішень і так далі ці два процеси циклічно розвиваються по зростаючій спіралі.

Поняття «нейрокомп'ютер» на сьогоднішній день не має усталеного визначення. Сенс цього поняття змінювався в міру розвитку нейрокомп'ютерної техніки. Докладно історія та етапи розви-

тку нейрокомп'ютерів описані в роботі [4], тому проаналізуємо їх коротко (рис. 1).

спеціалізовані системи з невеликою кількістю штучних нейронів (напр., у Марк-1 – 512)	50-ті роки XX ст.
нейрокомп'ютери на порогових елементах цифрової логіки, зокрема ТТЛ	60-70-ті роки XX ст.
програмна емуляція нейрокомп'ютерів на мікропроцесорах (програмні нейрокомп'ютери)	80-ті роки XX ст.
програмні нейрокомп'ютери на багатопроцесорних паралельних суперкомп'ютерах	90-ті роки XX ст.
нейроплати — спеціалізовані обчислювачі векторно-матричних добутків (програмно-апаратні нейрокомп'ютери)	
нейропроцесори (на основі сигнальних процесорів та трансп'ютерів)	2000-ні роки
суто апаратна реалізація біологічно правдоподібних нейромереж з великою кількістю нейронів на основі спеціалізованої елементної бази	Наш час

Рис. 1. Етапи розвитку нейрокомп'ютерів

Перші нейрокомп'ютери, такі як Марк-1, Адалін, Мадалін та ін. були створені у 50-х роках 20-го століття і були спеціалізованими системами з невеликою кількістю штучних нейронів (наприклад у Марк-1 — 512 нейронів). Вони розв'язували вузьке коло завдань із розпізнавання нескладних образів. Елементна база цих нейрокомп'ютерів була досить примітивна: від електромеханічних інтеграторів до магнітних, електрохімічних та конденсаторних.

Далі у 60—70-х роках 20-го століття в зв'язку із розвитком технології цифрових інтегральних схем нейрокомп'ютери почали реалізовувати на порогових елементах цифрової логіки, зокрема ТТЛ. Але виникла суттєва проблема ефективних засобів для зміни вагових коефіцієнтів нейронів в процесі навчання та перекомутації топології їх зв'язків зі зміною типу мережі під конкретну задачу. Апаратними засобами ця проблема вирішувалась досить складно, тому почали застосовувати для вказаної мети універсальні цифрові комп'ютери, які до того часу вже набули достатнього розвитку. Так з'явилися гібридні нейрокомп'ютери, які включали в себе блок нейронів та універсальний цифровий комп'ютер, який виконував функції введення, виведення, навчання, управління та індикації.

Подальший розвиток мікропроцесорної техніки зробив неефективним використання спеціалізованих систем. Ефективнішою стала програмна емуляція нейромережевих принципів обробки інформації на стандартних мікропроцесорах. Тоді з'явилися, так звані, програмні нейрокомп'ютери, тобто пакети прикладних програм, які дозволяли моделювати різні типи нейронних мереж з кількістю нейронів у сотні-тисячі. Але програмна емуляція нейромереж з великою кількістю нейронів вимагала використання значної долі ресурсів комп'ютера (великих обсягів оперативної пам'яті та значного завантаження процесора). Це відбувалось через необхідність виконання великої кількості операцій векторно-матричного множення. Для вирішення цієї проблеми було визначено 2 шляхи: 1) моделювати нейромережі на багатопроцесорних паралельних суперкомп'ютерах (програмні нейрокомп'ютери) та 2) розвантажити центральний процесор шляхом введення в комп'ютер додаткового апаратного забезпечення — нейроплати, яка є спеціалізованим обчислювачем векторно-матричних добутків (програмно-апаратні нейрокомп'ютери).

Що стосується нейроплат, то спочатку їх виконували на серійних мікросхемах, а потім почали розробляти спеціальні нейропроцесори, використовувати сигнальні процесори та трансп'ютери. Але всі ці намагання не дали бажаних результатів через декілька причин. Першою причиною є те, що таке моделювання нейромереж, коли асинхронний обмін нервовими імпульсами між біологічними нейронами представляється у вигляді синхронізованої обробки цифрових масивів та послідовним обміном кодами по шинах даних, не характеризується адекватністю біологічним прототипам. А тому неможливо буде реалізувати складні когнітивні функції біологічних нейромереж. Другою причиною є те, що кількість штучних нейронів в таких реалізаціях ($10^3 \dots 10^4$) є дуже далекою від кількості нейронів в людському мозку (10^{11}), а підвищити цю кількість суттєво не вдасться через обмеження технології виробництва планарних напівпровідникових чипів.

В кінці 90-х років пройшла також і пора повального захоплення програмною емуляцією нейрокомп'ютерних технологій на персональних ЕОМ, робочих станціях і навіть суперЕОМ. Стало зро-

зумілим, що тільки створення спеціалізованої елементної бази (як тоді здавалося, НВІС-нейрочипів) для суто апаратної реалізації біологічно правдоподібних нейромереж з великою кількістю нейронів дозволить значно підвищити відношення продуктивності до вартості при реалізації нейрокомп'ютерних засобів обробки інформації. Однак реалізації на основі електронних НВІС мають низку суттєвих недоліків, пов'язаних з неможливістю організації в площині напівпровідникового кристалу великої кількості ліній електричного зв'язку між нейронами. Через це замість асинхронної передачі імпульсів між нейронами (як в природі) використовується синхронізована передача кодованих цифрових пакетів даних [8] між групами нейронів, що спотворює самі принципи організації природних нейроструктур (нейроморфність).

Проблемою сьогодення є створення апаратних нейрокомп'ютерів з великою кількістю енергоємних нейронів та нейроморфними принципами організації: безпосередні зв'язки між фізично відокремленими спайковими нейронами, адаптивне навчання без використання обчислювальних процедур.

Для визначення шляхів подолання цієї проблеми потрібно відповісти на такі основні питання:

1. Яка має бути архітектура нейрокомп'ютера?
2. Яка має бути структура його процесорного ядра — нейронної мережі?
3. За якою технологією реалізовувати апаратно цю нейронну мережу?
4. Які методи та засоби застосувати для адаптивного навчання нейромережі без використання обчислювальних процедур?

2. Огляд принципів побудови архітектури нейрокомп'ютера

Щоб розглянути архітектуру нейрокомп'ютерів, потрібно спочатку визначитись із самим поняттям архітектури. Наприклад, досі серед фахівців не існує однозначного визначення поняття архітектури комп'ютера (обчислювальної машини). Розглянемо два найвживаніші визначення:

1. Архітектура комп'ютера — це концептуальна структура комп'ютера [7], яка визначає проведення обробки інформації і містить методи перетворення інформації в данні та принципи взаємодії технічних засобів та програмного забезпечення.

2. Архітектура комп'ютера — це логічна організація, структура та ресурси комп'ютера, які може використовувати програміст. Архітектура визначає принципи дії, інформаційні зв'язки та взаємне з'єднання основних логічних вузлів комп'ютера [9].

Об'єднує ці два визначення таке: архітектура комп'ютера включає в себе як структуру, що віддзеркалює склад комп'ютера, так і програмно-математичне забезпечення. Структура комп'ютера — це сукупність елементів і зв'язків між ними.

Основи вчення про архітектуру цифрових комп'ютерів були закладені Джоном фон Нейманом [6]. Сукупність цих принципів породила класичну (фон-нейманівську) архітектуру ЕОМ. Фон Нейман не тільки сформулював фундаментальні принципи логічної будови ЕОМ, але і запропонував її структуру, показану на рис. 2.

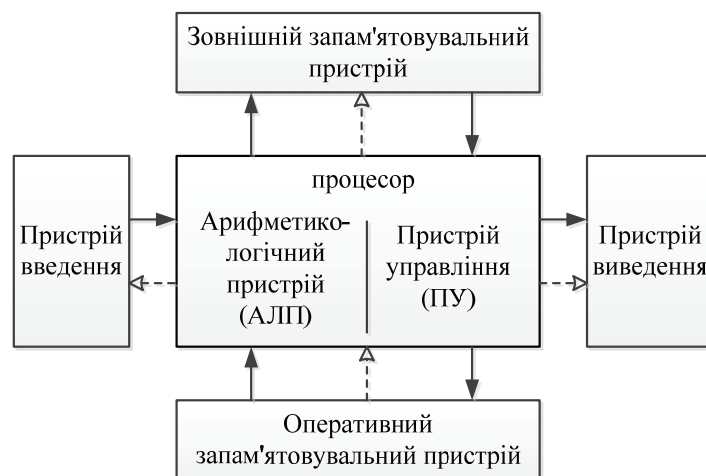


Рис. 2. Архітектура цифрового комп'ютера, побудованого на принципах фон Неймана:
 — потоки інформації; - - - - - потоки сигналів управління

Згадаємо принципи фон Неймана:

1. *Принцип двійкового кодування*: вся інформація в комп'ютері представляється у двійковому вигляді, сполучення 0 і 1.

2. *Принцип однорідності пам'яті*: і програми і дані зберігаються в тій самій пам'яті, тому комп'ютер не розпізнає, що зберігається у цій комірці пам'яті, а там можуть зберігатися цифри, текст, команда тощо. Над командами можна здійснювати такі самі дії, що і над даними.

3. *Принцип адресованості пам'яті*: структурно основна пам'ять (ОП) складається з пронумерованих комірок, центральному процесору (ЦП) в будь-який момент часу доступна будь-яка комірка пам'яті. Тому можливо присвоювати імена блокам пам'яті для зручнішої взаємодії ОП і ЦП.

4. *Принцип послідовного програмного управління*: програма складається із сукупності команд, які виконуються ЦП автоматично одна за одною у визначеній послідовності.

5. *Принцип умовного переходу*: не завжди відбувається так, що команди виконуються одна за одною, тому можлива присутність команди умовного переходу, яка змінює послідовність виконання команд в залежності від значення даних, що зберігаються.

Дамо визначення архітектури нейрокомп'ютера за аналогією з цифровим комп'ютером.

Архітектура нейрокомп'ютера — це сукупність концептуальної структури нейрокомп'ютера та фундаментальних принципів функціонування, взаємодії його складових частин, які включають методи представлення та обробки інформації, навчання та організації зручного інтерфейсу з користувачем.

Яка має бути архітектура нейрокомп'ютера? В науково-технічній літературі дуже мало публікацій, щодо архітектури абстрактного нейрокомп'ютера та його концептуальної узагальненої структури. Є багато інформації про структури і архітектури різноманітних типів нейронних мереж (багатошаровий перцептрон, мережа Хопфілда, мережа Хеммінга та ін.). Також є структури і архітектури конкретних (а не абстрактних) нейропроцесорів (наприклад на основі векторно-матричних операцій), нейроплат або «векторно-матричних» нейрокомп'ютерів [3, 4], орієнтованих на конкретну елементну базу (напр., ПЛІС) чи конкретну структуру нейронної мережі на формальних чи аналогових нейронах. Як приклад узагальненої структури нейрокомп'ютера, яка корелюється з іншими подібними роботами, можна навести схему, показану на рис. 3 [10].

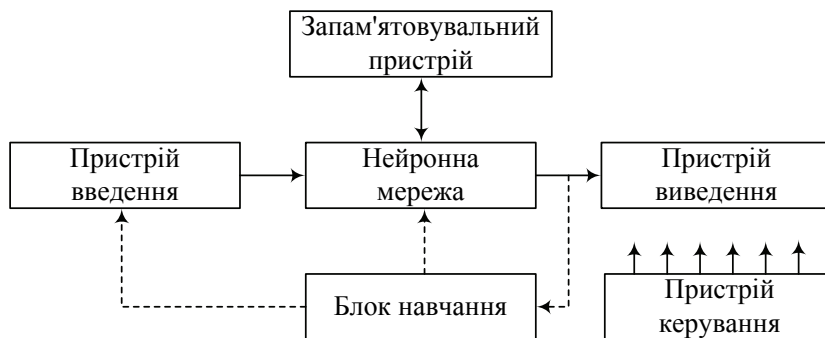


Рис. 3. Узагальнена структурна схема абстрактного нейрокомп'ютера

У цій же роботі [10] сформульовано основні архітектурні принципи побудови абстрактного нейрокомп'ютера:

1. Основним операційним блоком нейрокомп'ютера, його процесором є штучна нейронна мережа, яка являє собою сукупність формальних нейронів, що з'єднані каналами передачі інформації.

2. Нейронна мережа не виконує обчислень, а трансформує вхідний сигнал (образ) у вихідний відповідно до своєї топології та значень коефіцієнтів міжнейронних зв'язків.

3. У запам'ятовувальному пристрої нейрокомп'ютера зберігається програма змінення коефіцієнтів зв'язку між нейронами.

4. Пристрої введення і виведення інформації виконують ті ж функції, що і в структурі фон Неймана, а пристрій керування виконує синхронізацію роботи всіх структурних блоків нейрокомп'ютера при вирішенні конкретної задачі.

5. Нейрокомп'ютер працює в двох режимах — навчання та функціонування. Процес навчання — це розв'язання задачі оптимізації, метою якої є мінімізація функції помилки (або нев'язки) на певній множині прикладів навчальних пар вхідного та вихідного образів шляхом підбору коефіцієнтів зв'язку між нейронами.

ентів міжнейронних зв'язків. В режимі функціонування навчальний блок відключено і на вхід нейрокомп'ютера подаються сигнали з шумом, які необхідно розпізнати.

Як бачимо, в [10] принципи сформульовано дещо аморфно, не в такому визначеному стилі, як принципи фон Неймана. Ця структура і сформульовані принципи потребують на сьогоднішній день уточнень і чіткіших формулювань, які викликані досягненнями наукових досліджень останніх років, зокрема, досягненнями в галузі спайкових нейронних мереж [5, 8].

3. Обґрунтування вибору спайкових нейромереж як операційного блоку нейрокомп'ютера

В останні роки спостерігається інтенсифікація наукових досліджень в галузі спайкових нейронних мереж (англ. — *Spiking neural networks*), в яких інформаційними сигналами є імпульси (спайки), а не статичні сигнали певного рівня. Чим це викликано? Докладно це питання розглядається в [4, 5, 8], але якщо коротко, то, по-перше, тим, що ці мережі є нейроморфними (більш подібними до мозку, ніж традиційні) та універсальними (їх структура не залежить від розв'язуваної задачі, як у традиційних мереж зі статичними сигналами). Тобто не потрібно цілого «зоопарку» структур нейронних мереж для задоволення всіх практичних потреб.

Структурно-функціональна модель спайкової нейронної мережі, запропонована в [11], будується, на відміну від проблемно-орієнтованих мереж, на принципах створення динамічних систем в комбінації зі статистичною теорією навчання. Структура спайкової нейронної мережі зображена на рис. 4 і містить вхідні нейрони (вхідний шар), інтернейрони (проміжковий шар, або — мікромережа) та вихідні нейрони (вихідний шар). Така структура подібна структурі мозку, де є аферентні (сенсорні), проміжкові та еферентні (ефекторні) нейрони. Питома кількість і ваги синаптичних зв'язків кожного нейрона в такій мережі вибираються на основі даних нейрофізіологічних досліджень (тобто за аналогією з біологічними нейронними мережами). Випадковість вибору нейронів, які зв'язані з будь-яким нейроном в мережі, приводить до виникнення багатоконтурних зворотних зв'язків, тобто такі спайкові нейронні мережі є рекурентними. Нейрони в такій мережі мають бути двох типів: 1) збуджувальні (видають на виході електричний імпульс додатної полярності) та 2) гальмівні (видають на виході електричний імпульс від'ємної полярності).

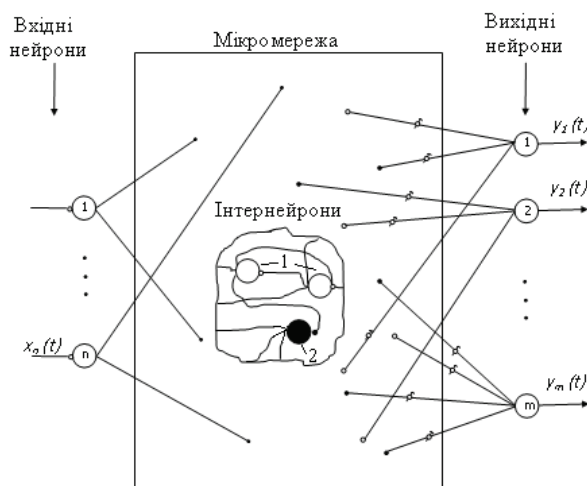


Рис. 4. Структура спайкової нейронної мережі:
1 — збуджувальні нейрони; 2 — гальмівні нейрони

Кількість вхідних нейронів n визначається розв'язуваною задачею. Кількість вихідних нейронів m дорівнює кількості можливих класів вхідних образів. Кількість зв'язків одного нейрона з іншими (наприклад, з 10...15 % інших), дальність їх поширення, співвідношення кількості збуджувальних і гальмівних зв'язків (наприклад, відповідно 80 % і 20 %) може визначатися даними нейрофізіологічних досліджень [8, 11]. Як видно зі структури спайкової нейронної мережі (рис. 4), лише вихідні нейрони повинні мати можливість підстроювати свої ваги синаптичних зв'язків в процесі навчання. Це відрізняє вихідні нейрони від інтернейронів, які мають постійні ваги зв'язків, що задаються при формуванні мережі.

На рис. 5 показана абстрактна модель спайкової нейронної мережі [11] у вигляді автомата з «плаваючими» станами. Її «плаваючий» високорозмірний аналоговий стан $x(t)$ змінюється безпе-

первно в часі. І хоча динаміка такого автомата в загальному випадку дуже складна, немає необхідності визначати його передавальну функцію з цієї динаміки, оскільки можливе відновлення інформації, яка містилася в $x(t)$, безпосередньо з поточного стану автомата, навіть якщо він спотворений деяким шумом.

Формально такий автомат M складається з фільтра L^M (тобто, функція, яка відображає вхідні потоки $u(\cdot)$ в потоки $x(\cdot)$), причому $x(t)$ може залежати не тільки від $u(t)$, але і абсолютно довільно нелінійно від попередніх входів $u(s)$: $x(t) = L^M(u(t))$, і з функції зчитування без запам'ятовування f^M , яка відображає в будь-який момент часу t вихід фільтра $x(t)$ («плаваючий стан») в деякий цільовий вихід $y(t)$. Загалом, такий автомат реалізує фільтр, який відображає $u(\cdot)$ в $y(\cdot)$.

Рекурентно з'єднана нейромережа може розглядатися в першому наближенні як реалізація такого фільтра загального призначення L^M (наприклад, деяка незміщена аналогова пам'ять), з якого різні вихідні нейрони витягують і комбінують різні компоненти інформації, що містилася в попередньому вхідному сигналі $u(\cdot)$. Якщо цільовий вихід $y(t)$ набуває аналогові значення, то можна використовувати замість одного зчитувального нейрона ансамбль зчитувальних нейронів, імпульсна активність яких в момент часу t представляє рівень $y(t)$ у просторово-частотному коді. Фактично, ці зчитувальні нейрони мають пам'ять, але їхня постійна часу мембрани істотно коротше, ніж тривалість періоду, протягом якого необхідне накопичення інформації, що вимагається в більшості когнітивних задач.

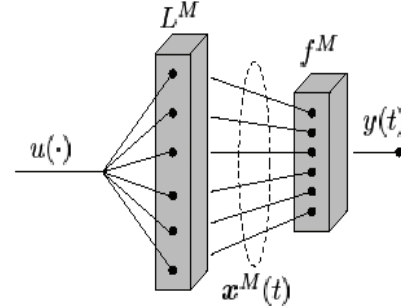


Рис. 5. Структура автомата з плаваючими станами (АПС)

Спайкові нейронні мережі завдяки нейроморфності мають перед традиційними, крім універсальності, ще й такі переваги [5, 8, 11]:

- 1) розпізнавання динамічних образів (мова, динамічні зображення і т. і.);
- 2) багатозадачність (інформація про вхідні потоки циркулює в рекурентній нейромережі і на вихід одночасно можуть бути подані результати різних задач за допомогою різних груп вихідних нейронів, навчених на виконання тієї чи іншої задачі);
- 3) розпізнавання з передбаченням (будь-який динамічний процес може бути розпізнаний навіть за неповною інформацією про нього, тобто навіть раніше, ніж він закінчиться);
- 4) простота процедури навчання (навчаються не всі нейрони мережі, а тільки вихідні зчитувальні нейрони);
- 5) підвищена продуктивність обробки інформації та завадостійкість завдяки імпульсному (спайковому) представленню інформації.

Саме завдяки цим перевагам спайкових нейронних мереж, вони є найперспективнішою архітектурою для побудови операційного ядра нейрокомп'ютерів.

4. Удосконалення принципів побудови архітектури нейрокомп'ютера

Структура нейрокомп'ютера (див. рис. 3) і наведені під рис. 3 принципи побудови нейрокомп'ютера [10] потребують на сьогоднішній день уточнень, які викликані досягненнями наукових досліджень останніх років та результатами робіт [5, 12—15]. Так, в п. 1 замість «формальних нейронів» потрібно написати «біологічно-реалістичних спайкових нейронів», а замість «які з'єднані каналами передачі інформації» потрібно «які з'єднані безпосередньо». Це пояснюється просто: щоб розкрити таємниці людського мозку, потрібно максимально реалістично його імітувати, тобто замість формальних нейронів з потенційним виходом використовувати спайкові нейрони, а зв'язки між нейронами все-таки робити безпосередніми, а не замінити процес асинхронної передачі імпульсів процесом синхронізованої передачі пакетів цифрових кодів. Якщо цього не зробити, то є ризик не отримати потрібного ефекту виникнення надзвичайних властивостей (усвідомлення, мислення, емоції тощо) у мережі звичайних інформаційних одиниць, якими є нейрони.

Із п. 2 можна повністю погодитись. У п. 3 викликає сумнів той факт, що в природній нейромережі (у мозку) немає ніяких програм, зокрема і програм навчання (змінення коефіцієнтів зв'язку між нейронами). Механізм навчання закладено у саму структурно-функціональну організацію мозку. І цей факт підтверджує «правило Хебба» [3, 8, 10], отримане із результатів нейрофізіологічних досліджень. Достеменно механізми роботи мозку поки не вивчені, тому чітко і однозначно

скоригувати структуру по рис. 3 поки неможливо, але однозначно механізм навчання має бути закладений в організацію нейрокомп'ютерного ядра (нейромережі). І саме запам'ятовування також має відбуватися у нейронній мережі (принцип «пам'ять в процесорі»). Але окремий запам'ятовуючий пристрій може існувати для запам'ятовування другорядної інформації з метою розвантаження нейронної мережі.

Із п. 4 можна погодитись частково. Що стосується пристроїв введення, то давно існує думка, що нейрокомп'ютер повинен мати сенсорні поля, аналогічні п'яти відчуттям людини (тобто розуміти людську мову, сприймати зображення, відчувати запах, смак та мати тактильні сенсори). А що стосується пристроїв виведення, то відповідно нейрокомп'ютер повинен генерувати людську мову, формувати зображення та мати виконуючі механічні органи для руху в просторі та орієнтації своїх сенсорних полів. Нейрофізіологи визначили, що мозок людини складається із окремих мікромереж нейронів (неокортикальні колонки) і в мозку є ділянки, що відповідають за певні функції. Відносно пристрою управління, то можливо на початкових етапах він є потрібним, але, з просуванням наших знань про мозок, функції управління будуть закладені також в одну з підсистем нейронного ядра нейрокомп'ютера.

Із п. 5 також можна погодитись частково, з єдиним уточненням, що таке розділення на 2 режими (навчання та функціонування) є досить умовним. Адже відомо, що в біологічному мозку ці 2 режими існують паралельно і нема ніякої зовнішньої системи, що їх перемикає.

Крім цих пунктів, варто було б ще додати пункт про доукомплектування нейрокомп'ютера звичайним цифровим комп'ютером, який використовувався б для розв'язання формалізованих завдань. Тобто не цифровий комп'ютер має управляти блоками нейрокомп'ютера, а нейрокомп'ютер має управляти цифровим комп'ютером (ставити йому завдання, з якими той справляється краще і швидше) та використовує результати цих завдань.

Таким чином, з урахуванням наведених доводів, структура абстрактного нейрокомп'ютера може бути подана схемою, показаною на рис. 6, а архітектурні принципи його побудови сформульовано так:

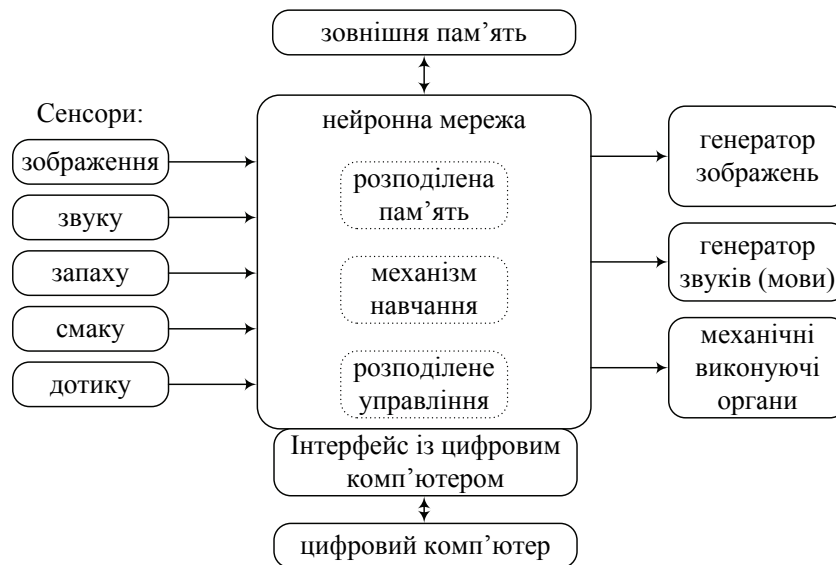


Рис. 5. Удосконалена узагальнена структурна схема абстрактного нейрокомп'ютера

1) *Принцип імпульсного кодування*: вся інформація в нейрокомп'ютері представляється в імпульсній (спайковій) формі (інформація кодується моментами появи імпульсів).

2) *Принцип асоціативності обробки*: Основним процесорним ядром нейрокомп'ютера є апаратно реалізована мережа біологічно-реалістичних спайкових нейронів максимально можливої кількості, які зв'язані між собою безпосередньо. Нейронна мережа не виконує обчислень, а трансформує вхідний сигнал (образ) у вихідний відповідно до своєї топології та значень коефіцієнтів міжнейронних зв'язків.

3) *Принцип автономності та адаптивності навчання*: навчання нейрокомп'ютера на виконання заданого відображення має відбуватися автономно на основі адаптації, а механізм навчання має бути закладений в організацію його процесорного ядра (нейронної мережі).

4) *Принцип розподіленості пам'яті*: функції запам'ятовування у нейрокомп'ютері реалізуються його процесорним ядром (нейронною мережею), а окрема зовнішня пам'ять має допоміжне значення;

5) *Принцип природності інтерфейсу*: нейрокомп'ютер повинен мати звичний для природи людини інтерфейс, тобто розуміти і генерувати мову, зображення і мати сенсорні поля, аналогічні п'яти відчуттям людини, а також мати виконувальні механічні органи для руху у просторі та орієнтації своїх сенсорних полів;

6) *Принцип однорідності обробки і управління*: функції управління функціональними частинами нейрокомп'ютера реалізуються його процесорним ядром (нейронною мережею);

7) *Принцип підсилення цифровим комп'ютером*: нейрокомп'ютер повинен мати у своєму складі цифровий комп'ютер, який використовується для вирішення формалізованих завдань. Нейрокомп'ютер управляє цифровим комп'ютером (ставить йому формалізовані завдання, з якими той справляється краще і швидше) через відповідний інтерфейс.

Відповідно до цих принципів можна дати таке визначення нейрокомп'ютера:

Нейрокомп'ютер — це комплекс технічних засобів для обробки інформації, основним процесорним блоком якого є апаратно реалізована великомасштабна мережа спайкових нейронів; який має звичні для природи людини вербально-візуальний інтерфейс і сенсорні поля; та виконує когнітивні функції, властиві мозку людини.

Нейрокомп'ютер згідно з цим визначенням суттєво відрізняється від всіх попередніх програмних, програмно-апаратних та апаратних нейрокомп'ютерів на основі цифрових чи аналогових потенційних штучних нейронів. Його можна відокремити від них, надавши йому таку характеристику, як «природний нейрокомп'ютер», тому що він має бути так само інтелектуальним, творчим і самосвідомим, як людина. Жодна така машина поки ще не була побудована, але це лише справа часу.

Висновки

Огляд науково-технічної інформації щодо побудови архітектури нейрокомп'ютерів показав, що на сьогодні відсутні чітко сформульовані принципи побудови архітектури нейрокомп'ютерів за аналогією з відомими принципами побудови цифрових комп'ютерів фон Неймана. Аналіз розвитку нейрокомп'ютерної техніки дозволив уточнити визначення термінів нейрокомп'ютер та архітектура нейрокомп'ютера. Узагальнена інформація по відомих структурах нейрокомп'ютерів та принципах їх побудови та функціонування. Обґрунтовано вибір спайкових нейромереж як операційного блоку нейрокомп'ютера. Таким чином, на основі аналізу сучасного рівня знань щодо архітектури нейрокомп'ютерів і на основі їх узагальнення сформульовано принципи побудови архітектури нейрокомп'ютерів за аналогією з відомими принципами побудови цифрових комп'ютерів фон Неймана:

- 1) принцип імпульсного кодування,
- 2) принцип асоціативності обробки,
- 3) принцип автономності та адаптивності навчання,
- 4) принцип розподіленості пам'яті,
- 5) принцип природності інтерфейсу,
- 6) принцип однорідності обробки і управління,
- 7) принцип підсилення цифровим комп'ютером.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Миркес Е. М. Нейрокомпьютер. Проект стандарта / Е. М. Миркес. — Новосибирск : Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1998. — ISBN 5-02-031409-9.
2. Концепция и архитектура программного нейрокомпьютера SNC [Текст] : материал технической информации / В. И. Гриценко, И. С. Мисуно, Д. А. Рачковский и др. // Управляющие системы и машины. — 2004. — № 3. — С. 3—14.
3. Круг П. Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры : учеб. пос. / П. Г. Круг. — М. : изд-во МЭИ, 2002.
4. Галушкин А. И. Нейрокомпьютеры. Кн. 3: [учеб. пос. для вузов] / А. И. Галушкин. — М. : ИПРЖР, 2000. — 528 с. — ISBN 5-93108-007-4.
5. 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.
6. Von Neumann, J. The General and Logical Theory of Automata / J. Von Neumann // in Cerebral Mechanisms in Behavior (ed. L. A. Jeffress). — New York : Wiley, 1951. — Pp. 1—41.

7. Мотоока Т. Копьютеры на СБИС: в 2-х кн. Кн. 1 : пер. с япон. / Т. Мотоока, С. Томита, Х. Танака. — М. : Мир, 1988. — 392 с., ил. — ISBN 5-03-000409-2.
8. Pulsed Neural Networks / W. Maass and C. M. Bishop, editors. — Cambridge : MIT Press. — 2001. — 377 p. — ISBN 0-262-13350-4.
9. Архитектура ЭВМ. Курс дистанционного обучения [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.lessons-tva.info/edu/e-inf1/e-inf1-2-2.html>.
10. Комарцова Л. Г. Нейрокомпьютеры : учеб. пос. для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. / Л. Г. Комарцова, А. В. Максимов. — М. : изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2004. — ISBN 5-7038-2554-7.
11. Natschläger T. The "liquid computer": A novel strategy for real-time computing on time series / T. Natschläger, W. Maass, H. Markram // Special Issue on Foundations of Information Processing of TELEMATIK. — 2002. — V. 8, No 1. — Pp. 39—43.
12. Колесницкий О. К. Метод распознавания многомерных временных рядов при помощи импульсных нейронных сетей / О. К. Колесницкий, Самра Муавия Хамо // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2006. — № 2(6). — С. 86—93.
13. 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. — P. 154—165. — ISSN 1060-992X.
14. Колесницкий О. К. Компактна оптоелектронна реалізація імпульсної нейронної мережі / О. К. Колесницкий, І. В. Бокоцей // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2010. — № 2. — С. 54—62.
15. Колесницкий О. К. Математична модель імпульсного нейроелемента на біспін-приладі / О. К. Колесницкий, І. В. Бокоцей // Вісник Хмельницького національного університету. — 2011. — № 5. — С. 141—149.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних наук ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 6.03.2014

Колесницкий Олег Костянтинович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, e-mail: okk_vin@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

O. K. Kolesnytskyi¹

Construction principles of spiking neurocomputer architecture

¹Vinnitsia National Technical University

The paper clarifies the "neurocomputer" and "neurocomputer architecture" term definition. The choice of spiking neural network as neurocomputer operating unit is substantiated. The spiking neurocomputer organization principles are formulated by analyzing and generalization of the current level of knowledge on neurocomputer architecture. These principles are similar to the well-known von Neumann organization principles of digital computer.

Keywords: neurocomputer architecture, spiking neural network, construction principles.

Kolesnytskyi Oleh K. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Computer Sciences, e-mail: okk_vin@mail.ru

О. К. Колесницкий¹

Принципы построения архитектуры спайковых нейрокомпьютеров

¹Винницкий национальный технический университет

Уточнено определение терминов «нейрокомпьютер» и «архитектура нейрокомпьютера», обоснован выбор спайковых нейросетей как операционного блока нейрокомпьютера. На основе анализа современного уровня знаний по архитектуре нейрокомпьютеров и на основе их обобщения сформулированы принципы построения архитектуры спайковых нейрокомпьютеров по аналогии с известными принципами построения цифровых компьютеров фон Неймана.

Ключевые слова: архитектура нейрокомпьютера, спайковая нейронная сеть, принципы построения.

Колесницкий Олег Константинович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных наук, e-mail: okk_vin@mail.ru