

# КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.8:519.7

DOI:10.34229/2707-451X.23.3.6

О.С. БІЛОКОНЬ

## ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

**Різні підходи до проблеми побудови штучних функцій мозку.** Існують щонайменше два основні положення, які мають фундаментальний вплив на теорію функціонування мозку, і ці положення схожі у більшості сучасних вчених. Перше положенням це те, що основні властивості мозку мають типологічну структуру мережі нервових клітин, чи нейронів, і послідовність поширення імпульсів у мережі. Деякі вчені вважають, що дане положення має відхилення від істини, бо окремі клітини і їх властивості є не такі важливі порівняно з властивостями кори головного мозку та властивостями що відбуваються у корковому середовищі біострумів (Вольфганг Келер (Wolfgang Köhler) [1]). Теодор Холмс Баллок (Theodore Holmes Bullock) вважає, що на сьогодні «нейронна теорія» є настільки загальновідома, що обговорювати її не має сенсу [2]. Тому, будемо брати до уваги те, що властивості мозку, виходячи з даних про властивості і зв'язки, складаються з його нейронів.

Друге положення, хоч і часто піддавалося сумнівам, наприклад, від нейролога Джон Кер'ю Екклс (John Eccles), складається з того, що властивості біологічних зв'язків переробляють інформацію не залежно від віталістичних сил, які не можна відтворити пристроєм, що створений людиною. Але не зважаючи на це, відомі нам на сьогодні складові нервових клітин можна моделювати, використовуючи електронні пристрої. Також важливим є, що ще ніхто не знайшов у окремих елементах чи клітинах нервової мережі якусь психологічну функцію, наприклад, «пам'ять» чи «розум». Це підштовхує нас вважати, що такі властивості належать окремим елементам і залежать від організації і функціонування нервової системи у цілому. Тому потрібно проводити дослідження, для того щоб зрозуміти як працює мозок і до яких наслідків призводить з'єднання простих нервових елементів.

Досить великою мірою розходяться думки вчених про те на скільки методи збереження, пошуку та оброблення інформації, що є в мозку, та відповідає тим методам, які нині використовуються.

*Створення інтелектуальних кіберфізичних систем неможливе без знання аналізу розвитку штучних нейронних мереж. Основна задача даної статті дослідження та аналіз концепції інтелектуальних технологій, що базуються на штучних нейронних мережах.*

**Ключові слова:** штучні нейронні мережі, перцептрон, теорії Маккалоха – Піттса.

© О.С. Білоконь, 2023

Є два варіанти роботи кібернетичної моделі мозку: 1) коли мозок працює з завчасно заданим алгоритмам, що є подібними до алгоритмів, які використовують у цифрових машинах; 2) мозок працює не на детермінованих алгоритмах і властивості його не подібні із логічними і математичними алгоритмами, а працює з цифровими машинами Джон фон Нейман (John von Neumann). Вчені, які підпорядковуються даній теорії вважають, що спочатку необхідно знайти нові фундаментальні принципи, які адекватно описують механізми мозку. Вважається, що існуючі методи і механізми адаптації просто необхідні для цієї цілі.

Але також стоїть питання чи є мозок більш-менш звичайним обчислювальним пристроєм, при якому стохастичні процеси і адаптація відіграють випадкову і не випадкову роль, або він сильно залежить від цих процесів і тому модель, де це не враховується, виявиться нездатною пояснити психологічні особливості мозку.

Методи вивчення механізмів мозку і побудова моделей. Перший метод, це модель монотипного наближення, приводить до детальної розробки логічного пристрою, який складається із обчислюваної машини, яка призначена для обрахунку заданої «психологічної функції». При цьому дана функція є досить близька з функцією, яка обраховується нервовою мережею.

Другий метод, це модель генотипного приближення. Генотипна модель складається не із алгоритму та його реалізації, а будується за допомогою множини алгоритмів, з подальшим аналізом їх характеристик, які допомагали б встановити загальні функціональні властивості таких систем.

### Монотипні моделі

Коли описуємо монотипну модель, то вона починається із точного опису всіх характеристик майбутньої моделі. Також уточнюється алгоритм обробки інформації, визначається функція, яка виражає залежність виходу, реакції від стимулу чи характеристики запам'ятовування і відтворення. У однотипній моделі необхідно, щоб система нормалізувала розмір і положення образу, а вже потім порівнювала нормалізовані функції з визначеними характерними в пам'яті величинами, що необхідні для ідентифікації [3]. Отримавши опис необхідних характеристик у досить обмежених термінах, дослідник переходить до побудови обчислюваного пристрою або системи автоматичного управління, які аналогічні за своїми властивостями біологічним нейронам.

Тоді як модель, яка імітує поведінку тварин чи пристрої з годинниковими механізмами, нараховує багатовікову історію, ідея створення моделей із нескладних елементів, що складаються із нейроподібних властивостей є відносно нова. По-перше, у роботі Алан Тюрінг (Alan Turing) «Про обчислювані числа», опублікований у 1936 р., і наступна робота фон Нейманом та деякими ученими в 1940 р. програмуючих цифровими машинами [4] призвела до створення великих чисел «універсальних автоматів», які можуть виконувати програми, що дозволяють їм проводити будь-які обрахунки використовуючи «цеглинки» простих логічних елементів. По-друге, група математиків-біофізиків (Чикаго, США), надрукувала «Математична біофізика» у 1938 р. [5], і поклала початок вивченню питання про те, як можна використовуючи «нервові мережі», які включають у себе формалізовані нейрони і зв'язки, реалізовувати психологічні функції.

У 1943 р. загальний принцип та більшість із теорем такого підходу до теорії нервових мереж були вперше чітко викладені Воррен Маккалохом (Warren Sturgis McCulloch) й Волтером Піттсом (Walter Harry Pitts) у роботі «Логічне обчислення ідей, які відносяться до нервової активності» [6].

Основний принцип теорії Маккалоха – Піттса полягає у тому, що всі психологічні явища можуть бути проаналізовані і зрозумілі як деяка активність у мережі, яка складається із логічних елементів, що має лише дві властивості («все» або «нічого»). Результат, отриманий Маккалох – Піттсом, приводить до того, що вони показують можливість реалізації за допомогою такої формальної

нервової мережі будь-якого функціонування у цьому розумінні за умови, що вона піддається багато разів логічно точному і однозначному опису кінцевим числом слів.

«Нейрон Маккалоха – Піттса» у подальшому був використаний при побудові різних моделей. Основні припущення викладені у роботі [6] вони приводять до наступного: функціонування нейрона підлягає закону «все» або «нічого».

Для збудження нейрона у деякий довільний момент часу необхідно протягом латентного періоду завести певні, фіксовані числа синапсів (з'єднання), які не залежать від зовнішніх збудників.

Єдиний існуючий зв'язок у межах нервової системи – це синапсові зв'язки.

Збудження будь-якого гальмівного синапса повністю виключає можливість збудження зв'язаного з цим нейроном.

Структура мережі не змінюється з часом. В моделі Маккалоха – Піттса є неможлива стійка пам'ять. Але можна побудувати мережу Маккалоха – Піттса, у якій здійснювалися б всі співвідношення входу-виходу за допомогою системи, яка включає довільний механізм пам'яті, за умови постійної роботи мережі.

У наступних роботах Маккалоха – Піттса [3], та Джеймса Калбертсона (James T. Culbertson) досліджуються автомати, які призначені для виконання безпосередньо «психологічних функцій», таких, як розпізнавання образів. Калбертсон, безпосередньо, розробив у всіх подробицях ряд схем для вирішення великого числа цікавих задач. Його ідея описана у праці «Свідомість і поведінка». Але, нажаль, ефективність моделювання почала знижуватися, і це визвано такими причинами: психологічні функції, які могли бути основою для побудови моделі, недостатньо строго визначені.

Дані рішення завжди погано узгоджуються із існуючими даними нейроанатомії і нейроеконії у тому розумінні, що число нейронів, які необхідні для таких моделей часто перевищують їх фактичну кількість. Дані моделі не можуть визначити загальні закони організації мережі. Ці моделі не можуть передбачати. Моделі не можуть у деталях бути перевірені шляхом співставлення з біологічними об'єктами.

Хоч основний напрямок у підходах до концепції монотипних моделей не привів до створення задовільної штучної моделі мозку; тим не менше, такі вчені, як Маккалох та Піттс вивели теорему про існування мережі (термін «мережа» розуміється, як штучна нейронна мережа), репрезентуючи довільні функції роботи мозку.

### Генотипні моделі

При монотипному підході властивостей, що створюють нервову мережу елементів – нейронів, які мають аксіоматичну здатність, таку як і топологія мережі. При генотипному підході властивості елементів також можуть бути повністю задані, але структура мережі визначена лише частково у результаті накладених обмежень і задача функції розподілу ймовірностей, що приводить до задачі класу систем. Таким чином, генотипний підхід має справу з властивостями системи.

Різниця у моделях приводить до суттєвих відмінностей у типах створених моделей, також у властивостях об'єктів, які можна за допомогою них моделювати. При аналізі таких моделей основний інтерес представляють властивості класу систем, структура яких визначається введеними алгоритмами. Тому при такому підході головну роль відіграє теорія ймовірності.

Функціональні характеристики генотипної моделі виступають як завершена ціль аналізу, а вхідними даними є фізична система. Концепція генотипних моделей мала невеликий вплив на технічні науки, більше збагачувалась за рахунок концепцій фізіології і анатомії. Опис анатомії XIX століття підготували ґрунт для нових досліджень локальних функцій мозку, і нейрології, як прикладу Джон Хьюлінгс Джексон (John Hughlings Jackson), зазначає явну пластичність системи, яка виражалася у прийманні на себе функції ушкоджених ділянок.

На початку ХХ століття Карл Лешлі (Karl Lashley) проголосив повну взаємозаміну великій частині кори головного мозку [7]. Всі ці нейрологічні дані привели до представлення про мозок, як про відносно малу диференційовану структуру.

Найбільш детально розробив модель Дональд Олдінг Гебб (Donald Olding Hebb) він також відомий, як творець теорії штучних нейронних мереж. Гебб вважав, що наявність процесів, завдяки яким нейрони, досить часто збуджені, мають певні функціональні структури, які називають «асоціацією клітини» та «фазових послідовностей», що під дією відповідного стимулу визивають елементарний образ або відчуття. Хебб підійшов досить близько до детального уточнення моделі, а вже Рочестер з співробітниками змогли доповнити її і використовуючи машину ІВМ, провели експериментальні перевірки гіпотези про «Асоціацію клітин».

Щодо більшості заперечень, що висувалися проти монотипної моделі, генотипна модель виглядала менш вразлива. Для початкового етапу тут не потрібно детальних даних психологічних функцій. При такому підході вихідним є спочатку фізична модель, а не функції, які мають бути реалізовані, не складно зрозуміти, що за своїм об'ємом і організацією модель відповідала загальним характеристикам біологічної системи.

### Стан теорії

Основи теорії перцептронів була запропонована у 1957 р. і у наступних роботах Френка Розенблата (Frank Rosenblatt) та інших дослідників було вивчено велике число моделей з різними властивостями. Перцептрони є генотипні моделі з механізмом пам'яті, які дозволяють їм навчатися реакціям на стимули у експериментах різних типів. У кожному випадку об'єктом аналізу є експериментальна система, що включає у себе перцептрон, певну оточуючу середу. Результати можна порівняти із результатами експериментів над людьми та тваринами, що дає можливість встановити функціональну відповідність моделі або її недостатність.

Перцептрони не призначені служити якійсь конкретній нервовій системі. Вони представляють собою спрощені мережі, створені для того, щоб вивчати закономірні взаємозв'язки, які проявляються у організації нервової мережі, структурою, що створена навколо неї і її «психологічні» властивості, якими може володіти дана мережа. Досить часто вони є спрощена модель центральної нервової системи. Це призводить до того, що одні властивості є гіпертрофованими, а інші – подавленими.

Коли не можна отримати точних аналітичних відповідей, використовують методи експериментального моделювання або на цифрових машинах, або на механічних моделях. Модель це не кінцевий результат досліджень, а лише початкова точка для аналізу її поведінки.

### Огляд систем штучного інтелекту

Вважається, що термін «штучний інтелект» запропонував Джон Маккарті (John McCarthy) у 1955 – 1956 рр. разом із Марвін Мінський (Marvin Lee Minsky), Натаніелем Рочестером (Nathaniel Rochester) і Клодом Шенноном (Claude Shannon). Напочатку, зазначає Джон Маккарті, під штучним інтелектом (ШІ) розумілась наука і технологія створення інтелектуальних машин і, у тому числі, інтелектуальних комп'ютерних систем.

Системи штучного інтелекту включали у себе експериментні системи і робототехніку. З іншого боку, ШІ став частиною філософії і нової науки когнітології.

Створення систем штучного інтелекту поділяють на такі напрямки:

Нейрокібернетика – апаратне моделювання структури і функції людського мозку.

Кібернетика «чорної» скриньки – має реагувати на зовнішні впливи, такі як мозок людини.

У математичній логіки основна форма запису це префіксна форма. Основна теорема префіксної форми.

Послідовність  $S$  символів є правильно побудована якщо тоді і тільки тоді:

- 1) ранг  $(S) - 1$ ;
- 2) ранг (послідовність зліва від  $S$ )  $\geq 0$ , при цьому ранг (оператора) = вага (оператора)  $- 1$ ;
- 3) ранг (попорожня послідовність) =  $0$ ;
- 4) ранг ( $n$ -го символу) =  $n - 1$ ;
- 5) ранг (змінний) = ранг (константи)  $- 1$ ;
- 6) ранг ( $S1$  з'єднаний з  $S2$ ) = ранг( $S1$ ) + ранг ( $S2$ ) [8].

Нагадаємо, що формальна система – це набір абстрактних об'єктів, не зв'язаних з зовнішнім світом, у якому є правила оперування множиною символів у синтаксичному трактуванні без урахування сенсу.

- Заданий кінцевий алфавіт.
- Визначена процедура побудови формул (чи слів) формальної системи.
- Виділена деяка множина формул, називаються аксіомами.
- Задано кінцева множина правил висновків, які дозволяють із деякої кінцевої множини формул отримати іншу множину формул.

Формальну систему іноді називають аксіоматика. Саме популярна формальна система це логіка висловлювань.

Фактичний закон протидії означає, що ніяка теорема не може бути одночасно і теоремою і не теоремою. Згадаємо про теорему Поста, на честь Еміль Леона Пост (Emil Leon Post) (1921 р.).

Формулу  $F$  можна доказати за обрахунками висловлювань, якщо тоді і тільки тоді вона є тождно-істинна, тобто істинна за всіма інтерпретаціями обрахунків висловлювань. Виходячи із формулювання теорема можна сказати:

- а) неприхованість (тобто  $t$  і  $\rightarrow t$  не можуть бути одночасно висновками);
- б) повнота;
- в) розв'язність.

Аналог теорема Поста – перша теорема Геделя, названа в честь австрійського логіка та математика Курта Геделя (Kurt Gödel) (1930 р.). Всі теореми логічно значимі формули, тобто – істинні скрізь. До недоліку можна віднести той факт, що ця теорема не призводить до ефективної процедури обчислення.

У 1931 р. у роботі Геделя з'являється теорема, що має назву Друга теорема Геделя про неповноту арифметики: «У формальній арифметиці існують формули  $m$ , такі, що ні  $m$ , ні  $\rightarrow m$  не є доказаними.

У 1936 р. Гергардом Генценом (Gerhard Gentzen:1909–1945 рр.) була доказана несуперечність формальній арифметиці. Тим самим у силу результату Геделя формальна арифметика неповна. Ще дві теореми доповняють цей результат: це теорема Тарського назва в честь польсько-американського логіка та математика Альфред Тарського (Alfred Tarski) (1935 р.) і теорема Черча, американський математик та логік Алонзо Черч (Alonzo Church) (1936 р.).

Теорема Тарського: існують формальні системи, для яких всі інтерпретації приводять до вираження одночасно істинним і недоказаним. Теорема Черча: обчислення предикатів першого порядку недозволено. Тобто існують формальні системи, для яких неможливо побудувати системи процедур, які можуть відрізнити теореми від не теоремами.

Для баз знань у штучному інтелекті діють два типи методів передачі знань (ПЗ) [9]:

- формальні моделі ПЗ;
- неформальні моделі ПЗ (семантичні, реляційні);
- зв'язок, наявність ієрархічної мережі;
- семантичної метрики;
- активності.

На сьогоднішній день використовують такі чотири моделі: логічні, мережеві, продукційні та фреймові, які описуємо далі.

**Логічні моделі.** Ці моделі створені на формальній системі, як правило, задаються четвіркою

$$M = \langle T, P, A, B \rangle,$$

де  $T$  – множина базових елементів;

$P$  – множина семантичних правил, за допомогою яких будують їх елементи;

$A$  – підмножина, яка називається набір аксіом;

$B$  – множина, що називається правило введення.

На практиці достатньо зберігати в базі знань лише  $A$ , а інші елементи отримуються із них за правилами введення.

**Мережеві моделі.** У основі лежить семантична мережа. Мережі, як правило, використовують у штучному інтелекті трьох типів: класифікуючі мережі, функціональні мережі і сценарії.

**Продукційна модель.** Це синтез елементів логічної і мережевої моделей. Із логічних моделей взята ідея правил введення, а із мережевих моделей – це опис знань у вигляді семантичної мережі. Особливість цієї моделі – вихід на знання.

У загальному випадку продукційну модель можна представити у вигляді четвірки:

$$\langle S, L; A \rightarrow B; Q \rangle$$

де  $S$  – описує клас ситуацій;

$L$  – умову, при якій продукція активується;

$A \rightarrow B$  – ядро продукції;

$Q$  – проєкційне правило.

**Фреймові моделі.** На відміну від мережевих і продукційних моделей фреймові моделі мають точного автора і час появи. Автор, якого називають «батьком» штучного інтелекта, – Мервін Мінскі.

Команда NSS підготувала ґрунт для широкого розвитку ШІ: мова програмування, комп'ютерна симуляція, проблеми прийняття людиною рішень, комунікація людини і машини. Мова IPL була створена у кінці 1954 р., проблема евристичного пошуку закінчена до 1957 р., а ось сам проєкт (С.I.P.) хоч і був формально завершено, але не дав очікуваного результату.

У 1971 р. Едвард Фейгенбаум (Edward Feigenbaum), під керуванням Герберта Саймона (Herbert A. Simon) в CIT1, опублікував роботу [10] про інтерпретатор для мас-спектрограм DENDRAL, який став основою всіх експертних систем. У 1976 р. з'явився варіант системи DENDRAL для медичних цілей під назвою MYCIN, який ставив діагноз і вибирав лікування при захворюваннях, викликаних бактеріальною інфекцією, і захворювання згортання крові [11].

### Системи штучного інтелекту

Електронні обчислювальні машини, навіть якщо б вони не були необхідними для створення і випробування моделі штучного інтелекту, є досить хорошим засобом дослідження, а саме з ним зв'язаний зліт досліджень з штучного інтелекту. У 1954 р. Аллен Ньюелл (Allen Newell) створив програму для гри у шахи, а А. Тюрінг, один із перших спеціалістів із інформатики який розробив обчислювальну модель цієї програми. Пізніше Ренд Дж. Шоу і Г. Саймон та колектив психологів із Амстердама, створили мову програмування, яка призначалася для того, щоб машиною було легко управляти інформацією у символній формі, працювати із системою покажчиків і обробляти списки. Це була мова програмування ПЛІ(1956 р.), є попередником мови Лісп (1960 р.). Перша програма штучного інтелекту стала «Логік-Теоретик», вона доводить докази теорем у обчислюванні висловлювань (1956 р.).

Програма для гри у шахи NSS була створена у 1957 р. Ця програма, аналізуючи різниці між ситуаціями і конструюючи цілі, добре вирішує головоломки типу «Ханойська вежа» або обраховує невизначені інтеграли.

Спеціалісти у області інформатики починають цікавитися штучним інтелектом, і деякі починають писати статті на цю тему, наприклад, Дж. Маккарті, М. Мінській [12], Г. Саймон. Створюють нові програми, Дж. Гелернтер показує, що його програма доведення теорем із шкільної геометрії може працювати краще, чим її засновник.

Програма ЕРАМ – елементарна програма для сприйняття і запам'ятовування, задумана Е. Фейгенбаумом для моделювання психологічних ситуацій.

Програми, які працюють із запитом на природній мові, були створені давно, знайшовши пристосування при пошуку інформації у базі даних.

Великі надії поклала робота у області машинного перекладу. У цій сфері продовжують працювати великі групи дослідників. Вони орієнтуються перш за все на використанні синтаксичного аналізу і інформації, яку отримують із словників.

Новий підхід у формальній логіці, що створений на приведення міркувань до протиріччя, появився у 1965 р. (Дж. Робінсон). Цей підхід дозволяє формалізувати більшість задач і дати їх машинну інтерпретацію. Його успішно використовували для доказу теорем і верифікацію програм. Це стало початком створення оригінальної мови програмування Пролог, яка була створена А. Колмрауером у 1971 р.

Дослідження в області штучного інтелекту супроводжуються розробкою мови програмування нових поколінь і створенням все більше програм нового покоління. Мова програмування Лісп, Пролог, PLANNER, QA4 дозволяють з допомогою концепцій цілі і затвердження моделювати і формалізувати логічні висновки у рішенні завдань; мова MACSYMA, REDUCE дозволяє виготовляти формальні маніпуляції з математичними виразами; мова TMS дозволяє здійснювати управління при ненадійних даних і перевіряти відповідності останніх один одному.

Описані результати дозволяють використовувати у робототехніці при управлінні роботою нерухомих або мобільних роботів, які діють в реальному тривимірному просторі.

До 1986 р. дослідники працювали в основному з окремим «мікропростором»: вони створювали системи, які придатні для таких специфічних і органічних сфер додатків, таких як ігри, евклідова геометрія, інтегральне обчислення. Майже у всіх цих системах використовували один і той же підхід – спрощення комбінаторики, яка базується на зменшенні необхідного перебору альтернатив на основі здорового смислу, застосування числових функцій оцінювання і різну евристику.

У 70 х роках відбувся відчутний скачок у дослідженні штучного інтелекту. Для цього були наступні передумови. Дослідники поступово розуміли, що всіма раніше створені програми є недостатні для глибокого знання у відповідній області. Тому для відчутного отримання результатів всі роботи потребують не просто удосконалення евристики, а навпаки необхідно використовувати методи логічних роздумів і накоплені знання, представити у символічній формі.

Виникає проблема: як передати знання програмі, якщо її творець ними не володіє. Тоді сама програма повинна їх виділяти із даних, отриманих від експерта.

### **Штучні нейронні мережі**

Сучасна ера нейронних мереж почалася з новаторських робіт Маккалоха та Піттса [3, 6]. Маккалох за освітою був психіатром та нейроанатомом і понад 20 років займався питаннями представлення подій у нервовій системі. Піттс був талановитим математиком, він приєднався до досліджень Маккалоха у 1942 р.

У своїй класичній роботі Маккалох та Піттс описали логіку обчислень у нейронних мережах на основі результатів нейрофізіології та математичної логіки. Формалізована модель нейрона від-

повідала принципу «все» або «нічого». Свого часу робота Маккалоха та Пітса широко обговорювалася. Вона залишається актуальна і сьогодні. Ця робота вплинула на ідеї фон Неймана, втілені в конструкції комп'ютера EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer), розробленого на основі пристрою ENIAC.

У 1948 р. було видано знамениту книгу Норберта Вінера (Norbert Wiener) під назвою Кібернетика. У ній були описані деякі важливі концепції управління, комунікацій та статистичної обробки сигналів. Друга редакція цієї книги вийшла 1961 р. До неї було додано матеріал, що стосується навчання та самоорганізації систем.

Наступний важливий етап у розвитку нейронних мереж це поява у 1949 р. наукової роботи Хебба «The Organization of Behavior». У ній наводиться чітке визначення фізіологічного правила навчання синаптичної модифікації (synaptic modification). Зокрема, Хебб припустив, що у міру того, як організм навчається різним функціональним завданням, зв'язки у мозку постійно змінюються і при цьому формуються ансамблі нейронів (neuron assembly). Знаменитий постулат (postulate of learning) Хебба говорить, що ефективність змінного синапсу між двома нейронами підвищується при багаторазовій активації цих нейронів через цей синапс. Книга Хебба стала джерелом натхнення при створенні обчислювальних моделей навчальних та адаптивних систем (learning and adaptive System).

Перша спроба використання комп'ютерного моделювання для перевірки формалізованої теорії нейронів, заснована на постулаті теорії Хебба. Результати моделювання чітко показали, що для повноти цієї теорії до неї слід додати гальмування. У тому ж році Альберт Морел Аттлі (Albert Maurel Uttley) продемонстрував, що нейронні мережі із змінними синапсами можна навчити класифікувати до найпростіших двійкових образів. Він ввів поняття та активацію нейрона, яке було формально проаналізовано Едуардо Ренато Каяньєлло (Eduardo Renato Caianiello) в 1961 р. [13].

У 1953 р. побачила світ книга, яка не втратила своєї актуальності і сьогодні [14]. Ідея, представлена в цій роботі, полягала у тому, що адаптивна поведінка є не вродженою, а набутою, і за допомогою навчання можна покращити поведінку тварини (системи). У 1954 р. Мінський написав докторську дисертацію в Принстонському університеті, присвячену теорії нейроаналогових систем навчання з підкріпленням і її застосування в задачах моделювання мозку.

У тому ж 1954 р. Денніс Габор (Dennis Gabor) один з зачинателів у теорії комунікації і першовідкривач голографії, запропонував ідею нелінійного адаптивного фільтра (nonlinear adaptive filter). Зі своїми однодумцями він створив машину, яка навчалася на прикладі стохастичного процесу, розробив матрицю навчання (learning matrix), що складається з плоскої мережі перемикачів, що об'єднувала масиви сенсорних рецепторів та виконавчих механізмів. У 1969 р. була опублікована робота з неголографічної асоціативної пам'яті. У ній представлені дві моделі: проста оптична модель кореляційної пам'яті та нейромережева модель, реалізована у вигляді оптичної пам'яті.

Предмет окремого дослідження у контексті нейронних мереж це створення надійних мереж з нейронів, які самі по собі вважаються ненадійними компонентами. Це завдання було вирішено в 1956 р. фон Нейманом за допомогою ідеї надмірності [15] на підтримку використання розподіленого надлишкового уявлення у нейронних мережах.

Через 15 років після виходу класичної роботи Маккалоха та Пітса Розенблатт запропонував новий підхід до завдання розпізнавання образів, заснований на використанні перцептрона та нового методу його вивчення [16]. Головним досягненням цієї роботи була так звана теорема збіжності перцептрона (perceptron convergence theorem), перший доказ якої було отримано Розенблаттом у 1960 р. [17].

В 1962 р. академік Віктор Михайлович Глушков запропонував теорію навчання дискретних перцептронів [18] також розвинув теорію щодо питання про самонавчання у перцептроні [19]. Крім цього ці роботи В.М. Глушкова слугували розвитком знань про штучні нейронні мережі та появи



глибинного навчання, концепція метод групового обліку аргумента (МГОА), була запропонована академіком Івахненко О.Г. [20].

Важливим значенням, що виникає при конструюванні багат шарового персептрона, була названа проблема присвоєння коефіцієнтів довіри (credit assignment problem). Термін привласнення коефіцієнтів довіри вперше використав Мінський в 1961 р. До кінця 1960-х вже було сформульовано багато ідей і концепцій, необхідних вирішити проблеми присвоєння коефіцієнтів довіри персептрона. Було також розроблено безліч ідей, покладених згодом в основу рекурентних мереж, які отримали назву мереж (Hopfield network) на честь американського фізика Джона Хопфілда (John Hopfield) Однак вирішення цих важливих проблем довелося очікувати до 1980-х років.

Для проведення експериментів не існувало персональних комп'ютерів або робочих станцій. Наприклад, коли Габор створював свій нелінійний фільтр, йому і його команді знадобилося шість років для того, щоб створити цей фільтр на аналогових пристроях.

Монографія відштовхнула вчених від робіт у цьому напрямі, а наукові фонди та агентства перестали забезпечувати його фінансову підтримку.

Аналогія між нейронними мережами та просторовими ґратами (lattice spin) була недосконалою. Більш точна модель була створена лише у 1975 р. [21].

У 1970-х роках розгорнулася діяльність у галузі карт самоорганізації (selforganizing map), заснованих на конкурентному принципі навчання (competitive learning). Принцип самоорганізації вперше був проілюстрований за допомогою комп'ютерного моделювання в 1973 р. У 1976 р. була опублікована робота, присвячена картам самоорганізації, що відображає топологічно впорядковану структуру мозку [22].

Стівен Гроссберг (Stephen Grossberg) ранні роботи [23], якого присвячувалися принципу конкурентного навчання [24], у 1980 р. відкрив новий принцип самоорганізації, який отримав назву теорії адаптивного резонансу (adaptive resonance theory) [24]. В основі цієї теорії лежить використання шару розпізнавання «знизу вгору» та шару генерації «зверху вниз».

У 1982 р. Хопфілд використовував функцію енергії для опису нового рівня розуміння обчислень, що виконувалися рекурентними мережами із симетричними синаптичними зв'язками [25]. Крім того, він встановив ізоморфізм між рекурентною мережею та ізінгівською моделлю (Ising model), що використовується у статистичній фізиці. Ця аналогія відкрила шлях для припливу результатів фізичної теорії у нейронне моделювання, трансформувавши таким чином область нейронних мереж.

Крег (B.G. Cragg) та Темперлі (H.N. Temperley) в 1954 – 1955 рр. зробили наступне спостереження [26]. Подібно до того, як нейрони можуть бути активізовані або приведені в стан спокою, атоми просторових ґрат можуть мати спіни, спрямовані «вгору» і «вниз». У 1967 р. Кован ввів «сигмоїдальну» характеристику і гладку функцію активації для нейронів.

Гроссберг в 1967 – 1968 рр. представив адитивну модель (additive model) нейрона, що включає нелінійні різницево-диференціальні рівняння, і досліджував можливість використання цієї моделі як основи короткочасної (short-term) пам'яті [27].

Амарі в 1972 р. незалежно від інших розробив адаптивну модель нейрона і використовував її для вивчення динамічної поведінки нейроноподібних елементів, пов'язаних випадковим чином [28].

Вільсон і Кован у 1972 р. вивели системи нелінійних диференціальних рівнянь для опису динаміки просторово-локалізованих популяцій, що містять як збуджуючі, так і гальмують моделі нейронів.

У 1975 р. була запропонована імовірнісна модель (probabilistic model) нейрона, яка використовувалася для розробки теорії короткочасної пам'яті.

У 1977 р. була описана нейромережева модель, що складається з простої асоціативної мережі, пов'язаної з нелінійними динамічними елементами.

Ще однією цікавою роботою 1982 р. стала публікація Кохонена [29], присвячена самоорганізації карт, що використовують одно- або двовимірну структуру просторової решітки, яка відрізнялася від ранньої роботи [14]. Модель Кохонена отримала більш активну підтримку і стала своєрідною точкою відліку для інших інновацій у цій галузі [30]. Описана нова процедура, що отримала назву моделювання відпалу (simulated annealing), що дозволяє вирішувати завдання комбінаторної оптимізації.

У 1986 р. було розроблено алгоритм зворотного розповсюдження помилки (back-propagation algorithm) [17]. У 1988 р. Брумхед і Лове описали процедуру побудови багатошарової мережі прямого поширення з урахуванням радіальних базисних функцій, що стала альтернативою багатошаровому перцептроні. Покладена в основу такої мережі ідея радіальних базисних функцій сягає корінням до методу потенційних функцій (method of potential functions). Теоретичні основи методу потенційних функцій були розроблені в [31, 32]. Опис методу функцій потенціалу наведено також.

На початку 1990-х Вапник (Vapnik) та його колеги виділили потужний з обчислювальної точки зору клас мереж, що навчаються з учителем, який отримав назву машини опорних векторів (support vector machine). Такі мережі дозволяють вирішувати завдання розпізнавання образів, регресії та оцінки щільності. Цей новий метод ґрунтується на результатах теорії навчання на основі вибірки кінцевого розміру.

В даний час добре відомо, що хаос (chaos) є ключовим аспектом багатьох фізичних явищ. Виникає питання: чи відіграє хаос таку ж важливу роль у навчанні нейронних мереж? Стверджується, що у біологічному контексті відповідь на це питання – позитивна. Зокрема, хаотична динаміка представляє базис для опису умов, необхідних проявити якість емерджентності у процесі самоорганізації популяцій нейронів. За період, що минув з моменту публікації статті Мак-Каллоха та Піттса, нейронні мережі пройшли довгий шлях. Теорія нейронних мереж стала міждисциплінарною областю досліджень, що тісно пов'язана з нейробіологією, математикою, психологією, фізикою та інженерією. Немає необхідності додатково говорити про те, що з розвитком теорії нейронних мереж нарощуватимуть свій теоретичний та прикладний потенціал і ці науки.

Отже результатом даної роботи є цілісна картина генезису інтелектуальних систем та технологій штучних нейронних мереж. Процес розвитку наукової думки дають чітке розуміння особливостей філософських концепцій та ідей інтелектуальних технологій побудованих за допомогою штучних нейронних мереж, а також розуміння закладених підходів до функціонування обчислень.

#### Список літератури

1. Kohler W. Relational Determination in Perception. *Cerebral mechanisms in behavior* / ed. L. A. Jeffress. New York : Wiley, 1951. P. 200–243.
2. Bullock T.H. Neuron Doctrine and electrophysiology. *Science*. 1959. Vol. 129, N 3355. P. 997–1002. <https://doi.org/10.1126/science.129.3355.997>
3. Pitts W., McCulloch W.S. How we know universals: The Perception of auditory and visual forms. *Bull. of Math. Biophys.* 1947. Vol. 9. P. 127–147. <https://doi.org/10.1007/BF02478291>
4. Turing A.M. On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungs problem. *Proc. London Math. Soc.* 1936. Ser. 2, Vol. 42. P. 230–265; 1937. Vol. 43. P. 544–546. <https://doi.org/10.1017/S002248120003958X>
5. Rashevsky N. *Mathematical Biophysics; Physicomathematical Foundations of Biology*. Chicago : Univ. Chicago Press, 1938. 340 p.
6. McCulloch W.S., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bull. of Math. Biophys.* 1943. Vol. 5. P. 115–133. <https://doi.org/10.1007/BF02478259>
7. Lashley K.S. *Brain mechanisms and intelligence: a quantitative study of injuries to the brain*. Chicago : Univ. Chicago Press, 1929. XIV, 186 p. : XI pl., ill., diagr. <https://doi.org/10.1037/10017-000>

8. Voas R.B. A description of the astronaut's task in project mercury. *Human Factors*. 1961. Vol. 3, N 3. P. 149–165. <https://doi.org/10.1177/001872086100300301>
9. Licklider J.C.R. Man-computer symbiosis. *IRE Trans. on Human Factors in Electronics*. 1960. Vol. HFE-1. P. 4–11. <https://doi.org/10.1109/THFE2.1960.4503259>
10. Morrison Charles by Richard Bissell Prosser. *Dictionary of National Biography*. 1885–1900. Vol. 39. [https://en.wikisource.org/wiki/Dictionary\\_of\\_National\\_Biography,\\_1885-1900/Morrison,\\_Charles](https://en.wikisource.org/wiki/Dictionary_of_National_Biography,_1885-1900/Morrison,_Charles)
11. Rail W. Some historical notes. *Computational Neuroscience* / ed. E. L. Schwartz. Cambridge : MIT Press, 1990. P. 3–8.
12. Minsky M.L. Theory of neural-analog reinforcement systems and its application to the brain-model problem. Thesis. Diss. Princeton : Princeton Univ., 1954. 24 p.
13. Caianiello E. Outline of a theory of thought-processes and thinking machines. *Journal of Theoretical Biology*. 1961. Vol. 1, No. 2. P. 204–235. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(61\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0022-5193(61)90046-7)
14. Kohonen T. The self-organizing map. *Proc. of the IEEE*. 1990. Vol. 78, N. 9. P. 1464–1480. <https://doi.org/10.1109/5.58325>
15. Neumann J. von. Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components. *Automata Studies* / ed C. E. Shannon, J. Mc Carthy. Princeton ; N. Y. : Univ. Press, 1956. P. 43–98. <https://doi.org/10.1515/9781400882618-003>
16. Rosenblatt F. The Perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychol. Rev.* 1958. Vol. 65, N. 6. P. 386–408. <https://doi.org/10.1037/h0042519>
17. Rosenblatt F. On the convergence of reinforcement procedures in simple perceptrons. Cornell Aeronautical Laboratory Report VG-1196-G-4. Buffalo, NY. February 1960.
18. Глушков В.М. Теория обучения одного класса дискретных перцептронов. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 1962. Т. 2, № 2. С. 317–335.
19. Глушков В.М. К вопросу о самообучении в перцептроне. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 1962. Т. 2, № 6. С. 1102–1110.
20. Ивахненко А.Г. Система эвристической самоорганизации в технической кибернетике. Київ: Техніка, 1971. 372 с.
21. Willshaw D.J., Von Der Malsburg C. How patterned neural connections can be set up by self-organization. *Proc. of the Roy. Soc. of London. Ser. B: Biol. sciences*. 1976. Vol. 194, N. 1117. P. 431–445. <https://doi.org/10.1098/rspb.1976.0087>
22. Minsky M.L. Steps towards artificial intelligence. *Proc. of the Ins. of Radio Eng.* 1961. Vol. 49, N. 1. P. 8–30 (Reprinted in: *Computers and Thought* / [ed. E. A. Feigenbaum, J. Feldman]. New York : McGraw-Hill, 1963. P. 406–450.
23. Grossberg S. Adaptive pattern classification and universal receding: I. Parallel development and coding of neural detectors. *Biol. Cybernetics*. 1976. Vol. 23, N. 3. P. 121–134. <https://doi.org/10.1007/BF00344744>
24. Grossberg S. How does a brain build a cognitive code? *Psychol. Rev.* 1980. Vol. 87, N. 1. P. 1–51. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.87.1.1>
25. Hopfield J.J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proc. of the Nat. Acad. of Sciences*. 1982. Vol. 79, N. 8. P. 2554–2558. <https://doi.org/10.1073/pnas.79.8.2554>
26. Cragg B.G., Tamperley H.N.V. Memory: The analogy with ferromagnetic hysteresis. *Brain*. 1955. Vol. 78, Part II. P. 304–316. <https://doi.org/10.1093/brain/78.2.304>
27. Grossberg S. A prediction theory for some nonlinear functional-difference equations. *J. of Math. Analysis and Applications*. 1968. Vol. 21, Iss. 3. P. 643–694. Vol. 22, Iss. 3. P. 490–522. [https://doi.org/10.1016/0022-247X\(68\)90269-2](https://doi.org/10.1016/0022-247X(68)90269-2)
28. Amari S. Characteristics of random nets of analog neuron-like elements. in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1972. Vol. SMC-2, N. 5. P. 643–657. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1972.4309193>
29. Kohonen T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biol. Cybernetics*. 1982. Vol. 43, N. 1. P. 59–69. <https://doi.org/10.1007/BF00337288>
30. Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi Jr., Vecchi M.P. Optimization by simulated annealing. *Science. New Series*. 1983. Vol. 220, N. 4598. P. 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
31. Aizerman M.A., Braverman E.M., Rozonoer L.I. Theoretical foundations of the potential function method in pattern recognition learning. *Automation and Remote Control*. 1964. Vol. 25. P. 821–837.
32. Duda R.O., Hart P.E. *Pattern Classification and Scene Analysis*, New York: Wiley, 1973.

Одержано 08.09.2023

**Білоконь Олександр Сергійович,**

аспірант Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ.

<https://orcid.org/0000-0002-9658-5730>

[sashabilokon82@gmail.com](mailto:sashabilokon82@gmail.com)

УДК 004.8:519.7

**О.С. Білоконь**

## **Огляд та аналіз розвитку штучних нейронних мереж**

*Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ*

*Листування: [sashabilokon82@gmail.com](mailto:sashabilokon82@gmail.com)*

Створення інтелектуальних кіберфізичних систем неможливе без знань аналізу та процесу розвитку наукової думки, щодо штучних нейронних мереж. Основна задача даної статті – дослідження та аналіз концепції інтелектуальних технологій, що базуються на штучних нейронних мережах. Знання особливостей створення, становлення та розвитку знань про штучні нейронні мережі має у свою чергу особливе значення для науковців, розробників, інженерів проєктувальників. Стаття складається з наступних частин: в першу чергу висвітлюються різні підходи до проблеми побудови штучних функцій мозку, погляди яких що у свою чергу поділяється на монотипні та генотипні моделі. Наступна частина – аналіз розвитку систем штучного інтелекту, також вводяться деякі факти процесу розвитку системи штучного інтелекту та висвітлюються особливості наукової думки з питань штучних нейронних мереж. Розглядаються різні концепції та погляди за допомогою яких можливо відтворити процес обчислення для більш детального аналізу та синтезу алгоритмів інтелектуальних систем. У частині про стан теорії акцентується увага на тому факті, що дослідники, які не могли отримати точних аналітичних відповідей, долучають до наукового інструментарію методи експериментального моделювання або на цифрових машинах, або на механічних моделях. Крім цього зазначається, що модель це не кінцевий результат досліджень, а лише початковою точкою для аналізу її поведінки. У частині штучних нейронних мереж автор торкається наступних концепцій: логіка обчислень Маккалоха та Піттса у нейронних мережах, проблеми присвоєння коефіцієнтів довіри, принцип самоорганізації, які були вперше проілюстровані за допомогою комп'ютерного моделювання, принципу конкурентного навчання, модель Кохонена, багат шарові мережі прямого поширення з урахуванням радіальних базисних функцій, що стала альтернативою багат шаровому персептроні, машини опорних векторів. Як результат автор отримує цілісну картину генезису інтелектуальних систем та технологій штучних нейронних мереж. Процеси розвитку наукової думки дають чітке усвідомлення особливостей інтелектуальних технологій побудованих за допомогою штучних нейронних мереж, особливостей функціонування та обчислення.

**Ключові слова:** штучні нейронні мережі, персептрон, теорії Маккалоха – Піттса, інтелектуальних комп'ютерних систем, кіберфізичний агент, мобільний робот, робототехніка.

UDC 004.8:519.7

**Oleksandr Bilokon**

## **Review and Analysis of the Development of Artificial Neural Networks**

*V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv*

*Correspondence: [sashabilokon82@gmail.com](mailto:sashabilokon82@gmail.com)*

**Introduction.** The creation of intelligent cyber-physical systems is impossible without knowledge of the analysis and process of development of scientific thought regarding artificial neural networks. The main task of this article is research and analysis of the concept of intelligent technologies based on artificial neural networks. Knowledge of the peculiarities of the creation, formation, and development of knowledge about artificial neural networks is of particular importance for scientists, developers, and design engineers. The article consists of the following parts: first, different approaches to the problem of building artificial functions of the brain are highlighted, the views of which are, in turn, divided into monotypic and genotypic models. The next

part is the analysis of the development of artificial intelligence systems, some facts of the process of the development of the artificial intelligence system are also introduced and the peculiarities of scientific opinion on the issues of artificial neural networks are clarified. Various concepts and views are considered, with the help of which it is possible to reproduce the calculation process for a more detailed analysis and synthesis of algorithms of intelligent systems. In the part about the state of the theory, attention is focused on the fact that researchers who could not get accurate analytical answers add to the scientific toolkit methods of experimental modeling either on digital machines or on mechanical models. In addition, it is noted that the model is not the result of research, but only a starting point for analyzing its behavior. In the part of artificial neural networks, the author touches on the following concepts: the logic of McCulloch and Pitts calculations in neural networks, the problems of assigning confidence coefficients, the principle of self-organization, which were first illustrated with the help of computer simulations, the principle of competitive learning, the Kohonen Self-Organizing Maps, multilayer networks of direct propagation taking into account the radial basis functions, which became an alternative to the multilayer perceptron, the support vector machine. As conclusions and as a result, the author receives a complete picture of the genesis of intelligent systems and the technology of artificial neural networks. The processes of development of scientific thought give a clear understanding of the features of intellectual technologies built with the help of artificial neural networks, features of functioning and calculation.

**Keywords:** artificial neural networks, perceptron, theories of McCulloch-Pitts, intelligent computer systems, cyber-physical agent, mobile robot, robotics.