

НЕЙРОКОМП'ЮТЕРИ

ПРИХОВАНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА РЕВОЛЮЦІЯ



Олександр Різник
доктор технічних наук,
завідувач відділу
нейротехнологій
Інституту проблем
математичних машин і систем
НАН України,
м. Київ

1. Нейрокомп'ютери

Сучасні нейрокомп'ютери з'явилися близько 20 років тому. На відміну від звичайних комп'ютерів, здатних лише виконувати команди, задані програмістом, нейрокомп'ютери можуть навчатися на прикладах і самі програмувати свої дії. Тому вони здатні розв'язувати навіть такі завдання, для яких не існує аналітичних методів розв'язку і які неможливо ефективно розв'язувати на звичайних комп'ютерах. До них належить більшість задач прогнозування послідовностей, пошуку закономірностей, розпізнавання образів, прийняття рішень в умовах невизначеності. *В наш час нейрокомп'ютери використовують практично у всіх сферах людського життя.* За їх допомогою банки планують свою діяльність, аналізують кредитоспроможність клієнтів, оцінюють фінансові ризики. В промисловості вони застосовуються для керування технологічними процесами, планування виробництва, діагностики обладнання, контролю якості продукції і т. ін. Найпоширенішим є використання нейрокомп'ютерів у сфері досліджень та розробок для моделювання та прототипування нових виробів. Це дозволяє не тільки значно прискорити проектування, але і створювати принципово нові системи з унікальними властивостями. Прикладом такої розробки може служити створена фірмою Боїнг в 1998 р. нейросистема керування безпілотним гіперзвуковим літаком Х-36, яка була застосована при його випробуваннях в 2000 р. (рис. 1)

Нейрокомп'ютери діють за принципами нервової системи, основним елементом якої є нейрон, — нервова клітина, яка одержує сигнали від оточуючих нейронів і передає свою реакцію іншим клітинам. Нейрон може мати до 5000 входів (синапсів) і виконувати до 1000 операцій на секунду. За швидкістю він майже в мільйон разів поступається персональному комп'ютеру. Але оскільки мозок людини має понад 10 мільярдів нейронів, які здатні діяти паралельно, він може аналізувати складні ситуації з високою швидкістю, недосяжною для більшості сучасних комп'ютерів. Штучні нейрони, застосовувані в нейрокомп'ютерах, є набагато простішими, ніж клітини нервової системи, будову та функції яких почали вивчати ще в ХІХ ст.

Першу модель штучної нейронної мережі було створено в 1943 р. У. Мак Каллоком та У. Піттсом, які довели здатність штучних нейронів виконувати логічні операції. В 1949 р. фізіолог Д. Хебб запропонував метод навчання нейронів, який було застосовано при розробці перцептрона, — першої штучної мережі, здатної навчатись. Його створено 1957 р. американським вченим Ф. Розенблаттом.

Аналогічні розробки розпочали і в Україні. В 1960 р. О.Г. Івахненко створив аналог перцептрона — систему "Альфа". В 1962 р. В.М. Глушков запропонував математичну модель перцептрона. В 1966 р. автором цієї статті було розроблено модель пластичного нейрона, здатного до самонавчання, а в 1970-72-х — створено перший цифровий перцептрон "Адам" — спеціалізовану ЕОМ із 512 пластичних нейронів (рис.2).

Перші перцептрони демонстрували при випробуваннях високі результати на задачах розпізнавання образів, але їхня здатність до навчання була незадовільною. Відсутність ефективних методів навчання призвела до припинення досліджень штучних нейронних мереж майже на 15 років. Вони були поновлені лише в середині 1980-х рр., коли зусиллями багатьох вчених, зокрема *Д. Хопфілда*, *Т. Кохонена*, *П. Вербоса*, *Д. Румельхардта* та ін. розроблено основи теорії штучних нейронних мереж та удосконалено методи їх навчання. Протягом короткого періоду 1983-86 рр. запропоновано десятки нових моделей нейронних мереж (так званих *нейропарадигм*). Їх випробування давали вражаючі результати: нейронні мережі легко навчалися розв'язувати складні задачі прогнозування та розпізнавання образів, які неможливо було ефективно розв'язувати за допомогою звичайних комп'ютерів.

2. Нейрокомп'ютерний бум

Ейфорія від успіху експериментів з новими моделями штучних нейронних мереж привела науковий загал до ідеї про можливість побудови *нейрокомп'ютера* — *ЕОМ нового типу, яка не потребуватиме програмування і буде здатна розв'язувати складні задачі, навчаючись на зразках їх розв'язання*. Ця ідея одержала підтримку DARPA — Агентства з перспективних досліджень міноборони США, яке в 1987 р. розпочало 10-річну програму досліджень зі створення та розгортання виробництва нейро-

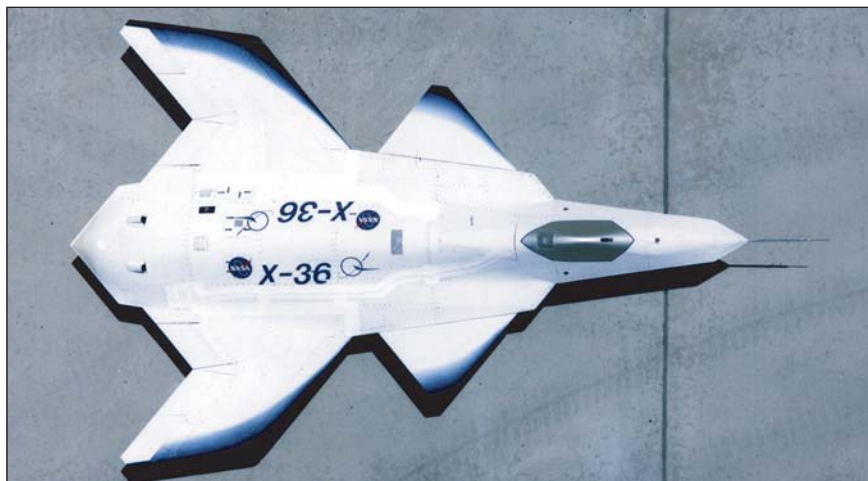


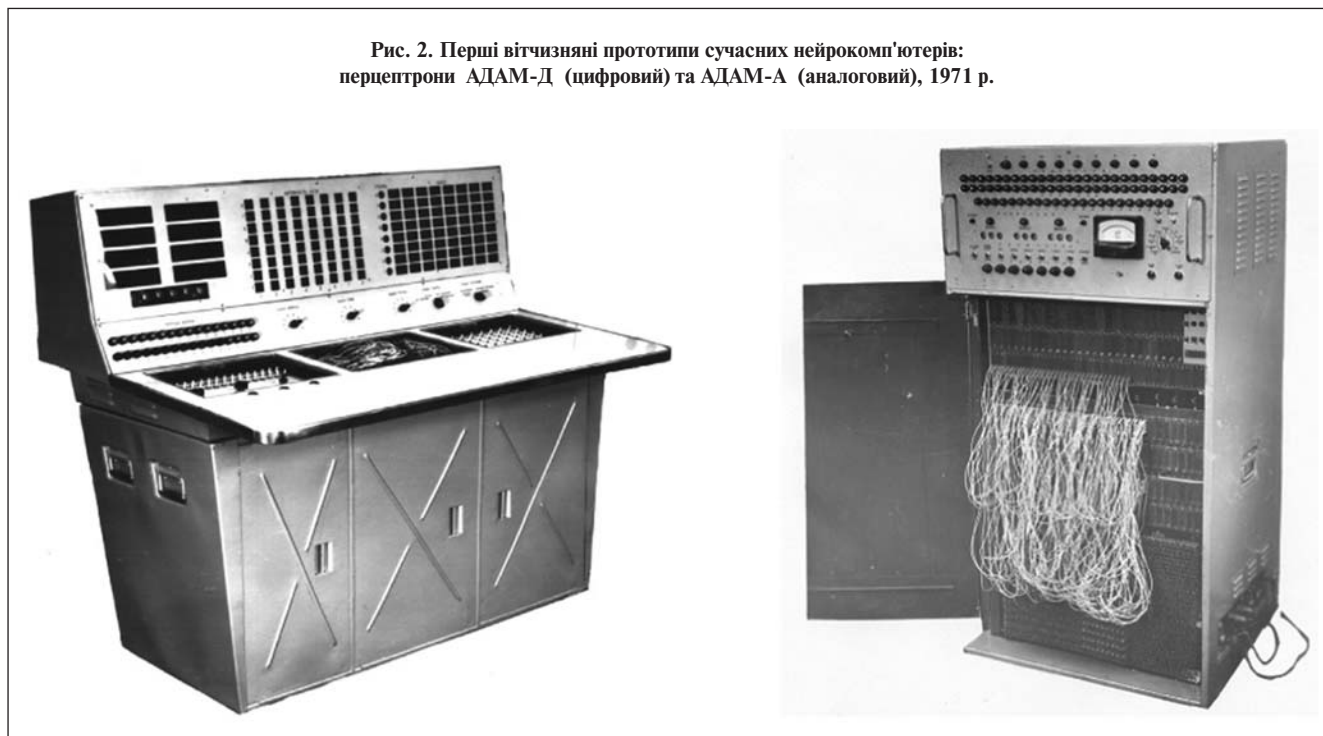
Рис. 1. Гіперзвуковий літак X-36 із нейрокомп'ютерною системою керування (1998 р.)

комп'ютерів. За обсягами фінансування та важливістю цю програму прирівнювали до знаменитого проекту "Манхеттен" зі створення атомної бомби. Згодом аналогічні програми прийняли Японія та країни ЄС. Розпочався *нейрокомп'ютерний бум*. Змагання за першість у створенні нейрокомп'ютера охопило практично всі розвинені країни світу. Вважали, що їхня поява призведе до нової науково-технічної революції, оскільки відпаде потреба в програмованих комп'ютерах, і, як наслідок, почнеться перебудова всіх ланок суспільного виробництва. Але цього не сталося. Через стрімке зростання продуктивності комп'ютерів та удосконалення технології програмування вони виявилися поза конкуренцією. Для створених на початку 1990-х років нейрокомп'ютерів залишилась скромна екологічна

ніша неформалізованих прикладних задач, не вирішуваних за допомогою звичайних комп'ютерів. До того ж, переважна більшість створених нейрокомп'ютерів насправді являли собою спеціалізовані програми, призначені для виконання нейроалгоритмів обробки даних на звичайних комп'ютерах. Не повністю виправданими виявились також очікування, пов'язані з розробкою апаратних нейрокомп'ютерів та нейрочипів, які мали забезпечувати надвисоку продуктивність завдяки паралельній роботі нейронів. Їх масове виробництво розпочалося в середині 1990-х років, але практичне застосування вони знайшли лише в розробках новітніх озброєнь.

Наприкінці 1990-х, коли перспективи нейрокомп'ютерів уже здавались втраченими, інтерес до них почав стрімко зростати.

Рис. 2. Перші вітчизняні прототипи сучасних нейрокомп'ютерів: перцептрони АДАМ-Д (цифровий) та АДАМ-А (аналоговий), 1971 р.



Нейрокомп'ютери стали застосовувати в системах штучного інтелекту для розв'язання таких завдань як обробка експертних оцінок, аналіз текстів природної мови, прийняття рішень в умовах невизначеності. Почалось їх впровадження в промисловості, зокрема рекурентних нейронних мереж, застосовуваних в нових системах автоматичного управління та системах адаптивної обробки даних. Зросла популярність спайкових нейромереж, що є найбільше наближеними до біологічної нервової системи і можуть застосовуватись у медико-біологічних дослідженнях та розробках. В останні роки починається проникнення нейрокомп'ютерів в інформаційний простір Інтернет, де вони здатні діяти як мобільні інтелектуальні агенти, або як засоби інтелектуального інтерфейсу, що може адаптуватись до індивідуальності користувача.

3. Світова нейроіндустрія

Протягом короткого періоду нейрокомп'ютерного буму сформувалась потужна нейроіндустрія, яка стала помітним сектором економіки високорозвинених країн світу, обсяг якого перевищує \$1 мільярд. Нейроіндустрія охоплює сотні промислових фірм, дослідних установ та навчальних закладів. Її продукція містить десятки моделей апаратних та програмних нейрокомп'ютерів, різні типи нейрочипів, нейроакселератори на основі сигнальних процесорів, програмні засоби для підготовки даних, навчальні програми і т.ін. Більша частина цієї нейропродукції орієнтована на сферу досліджень та розробок, зокрема на оновлення продукції самої нейроіндустрії. *Виникла технологія масового виробництва нейропродукції, заснована на копіюванні змісту пам'яті навчених нейрокомп'ютерів у мікропроцесори, призначені для масових виробів.*

Сформувалась нова наукова дисципліна — нейротехнологія, яка вивчає проблеми проектування нейрокомп'ютерів та методи їх використання. Навчальні програми з цієї дисципліни викладають практично в усіх провідних університетах світу. Щороку відбуваються десятки міжнародних конференцій з цієї тематики, видаються сотні книжок та спеціалізованих наукових журналів. Постійно зростає рівень теоретичної бази нейротехнології, відбувається інтенсивний обмін її методами з іншими розділами сучасної комп'ютерної науки — розпізнавання образів, адаптивного керування та оптимізації. З підсилен-

ням теоретичної бази нейротехнології зростає довіра як до її методів так і до створених на їхній основі прикладних нейросистем.

Розвиток нейроіндустрії в світі відбувається вкрай нерівномірно. Безперечним лідером є США, де сконцентровані основні виробники та користувачі нейропродукції. Японія та країни ЄС зберігають високі позиції, але їх уже наздоганяє Китай, де дослідження з нейротехнології мають потужну державну підтримку. *Росія, Україна та інші країни Східної Європи істотно відстають у розвитку цієї галузі.* Державна підтримка дозволяє проводити деякі дослідження та готувати кадри фахівців, але її обсяг недостатній для розробки та виробництва власної нейропродукції. Вчені цих країн, які є фахівцями в нейрокомп'ютерній галузі, здебільшого виконують розробки за грантами або за контрактами з партнерами з США та інших країн-лідерів. Таке співробітництво дає можливість вітчизняним вченим підтримувати свій професійний рівень, але найталановитіші з них часто знаходять собі достойніше місце в провідних наукових центрах. Інтернаціональний склад світових центрів, таких як, наприклад, Стенфордський університет у США, де більшість співробітників та стажерів не є громадянами США, є яскравим свідченням процесу “відпливу мізків”, який лише збільшує технологічний та інтелектуальний відрив країн — лідерів у галузях високих технологій від решти світу.

4. Нейротехнології в Україні

В Україні нейрокомп'ютери ще не набули поширення, але відомі приклади їх використання для прогнозування ризиків кредитування в банках, аналізу даних аерокосмічної розвідки, керування технологічними процесами, обробки зображень і т. ін. Прикладні дослідження та викладання предмету штучних нейронних мереж розпочато в багатьох університетах країни. Найвідомішими центрами таких досліджень є у Києві, Харкові, Львові та Донецьку. Успішною вітчизняною розробкою є створений *Е.М. Куссулем* в 1992 р. *потужний нейрокомп'ютер B512M, що мав понад 60 тис. нейронів* (спільна розробка Інституту кібернетики НАН України та японської фірми WACOM Co., рис. 3).

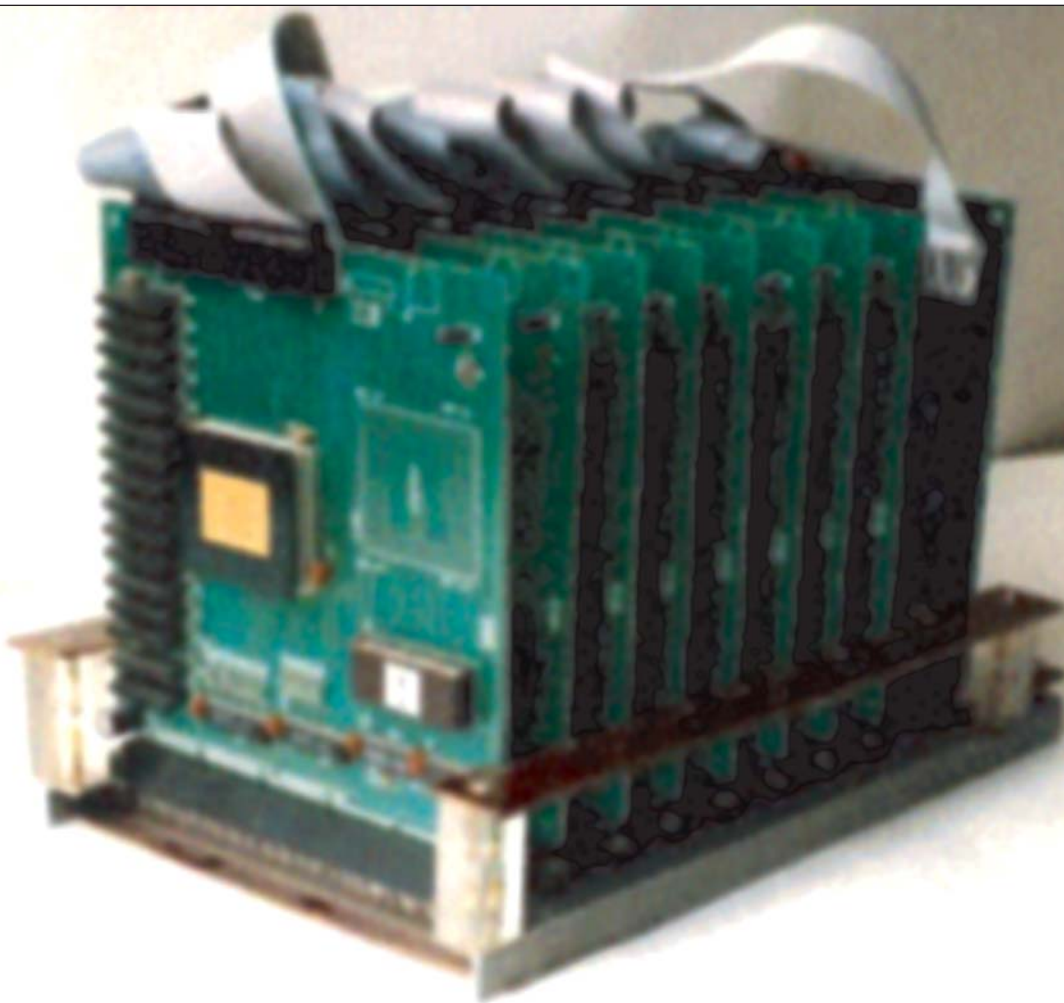
Типовим для сучасної України прикладом наукового колективу, який діє в цій галузі, є відділ нейротехнологій Інституту проблем математичних машин і систем НАН України, органі-

зований близько 20 років тому, в якому зараз працює 11 фахівців, з яких один доктор, 5 кандидатів наук та 3 аспіранти. Відділ проводить фундаментальні та прикладні наукові дослідження, створює сучасні нейрокомп'ютери. Основним науковим напрямком відділу є розробка теорії та практична реалізація нейронної асоціативної пам'яті. Тут створено принципово нові моделі нейронної асоціативної пам'яті для роботи в реальному часі, що в 3-4 рази ефективніші за уже наявні. Розроблено також сучасні потужні нейрокомп'ютери, які не поступаються закордонним аналогам і застосовуються при проведенні прикладних розробок, частина з яких виконується за міжнародними грантами та на замовлення фірм США, Ізраїлю, Південної Кореї.

Зупинимось на деяких із них.

Нейрокомп'ютер для системи захисту пасажирів авто від травм при спрацьовуванні подушок безпеки, створений на замовлення американської фірми АТІ inc. (рис. 4). Система складається з кількох ультразвукових локаторів, розташованих у салоні автомобіля та бортового нейрокомп'ютера, який за сигналами локаторів визначає позу пасажирів і оцінює ризик його травмування подушками безпеки. Якщо у разі аварії цей ризик перевищує заданий рівень, спрацьовування подушок безпеки блокується. Наявні нейрокомп'ютери не забезпечували необхідну точність оцінок, тому фірма-розробник запропонувала нам розробку досконалішого нейрокомп'ютера для цієї системи. Робота тривала 3 роки, упродовж яких було створено потужну багатомодульну нейросистему, що складалася з кількох нейронних мереж, які діяли як колектив експертів. Розроблено також унікальну технологію навчання та оптимізації багатомодульних нейронних мереж та створено автоматизовану систему для їх проектування. Для навчання нейросистеми використовували масив даних, що містив близько мільйона ультразвукових образів пасажирів, для одержання яких було спеціально обладнано кілька автомобілів та залучено десятки статистів різного віку та статури. При тестуванні на незалежних даних створена нейросистема робила менше 2% помилок, що в 5-7 разів менше, ніж при застосуванні інших нейрокомп'ютерів. Нейросистема являла собою комплекс програм для потужного персонального комп'ютера, тому при практичному застосуванні навченої і протестованої нейросистеми її програмний код переписувався в стандартні бортові мікро-

Рис. 3. Потужний асоціативно-проективний нейрокомп'ютер В512М (1992 р.) (спільна розробка Інституту кібернетики НАН України та японської фірми WACOM)



процесори, встановлювані на серійних автомобілях. Таку нейротехнологію застосовано на дорогах моделях автомобіля Jaguar (рис. 4).

Експериментальна нейросистема для прогнозування повеней була створена за ініціативою вчених відділу після катастрофічної повені в регіоні Карпат 2000 р. Для прогнозування рівня води використовували дані гідрометеорологічних спостережень за попередні дні. Навчання нейронної мережі проводилось на матеріалах бага-

торічних спостережень для відповідних річкових басейнів. Розробка проводилась із застосуванням власної системи автоматизованого проектування багатомодульних нейронних мереж. Випробування створеної нейросистеми проводили на завданні прогнозування рівня води в р. Уж в районі міста Ужгород з використанням даних п'яти станцій гідрометеорологічних спостережень у басейні р. Уж за 1996-2000 рр. Дані за 2000 рік використовували тільки для тестування.

Одержана абсолютна величина похибки прогнозу добового приросту рівня води в 95% випадків була меншою за 16 см, тоді як найбільший добовий приріст становив близько 150 см. Було показано, що при скороченні інтервалу спостережень (в експерименті він становив 24 години) похибку прогнозу можна скоротити в кілька разів. Найцікавіший результат одержано при розширенні масиву даних спостережень за р. Уж додаванням аналогічних даних для басейну р. Латориця. Гідро-

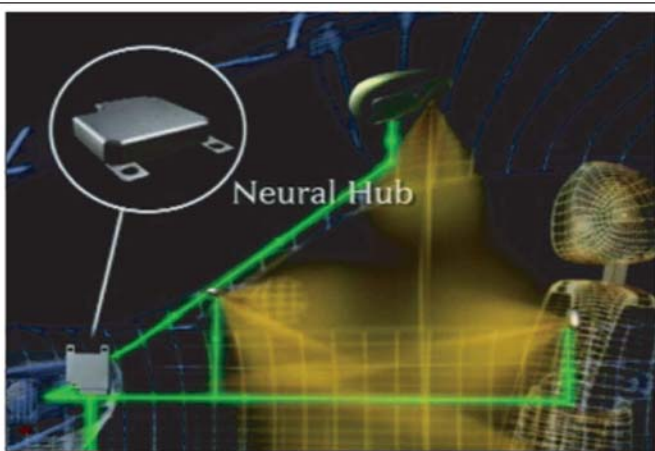


Рис. 4. Автомобіль Jaguar з установленою на ньому нейросистемою безпеки пасажирів (2002 р.).

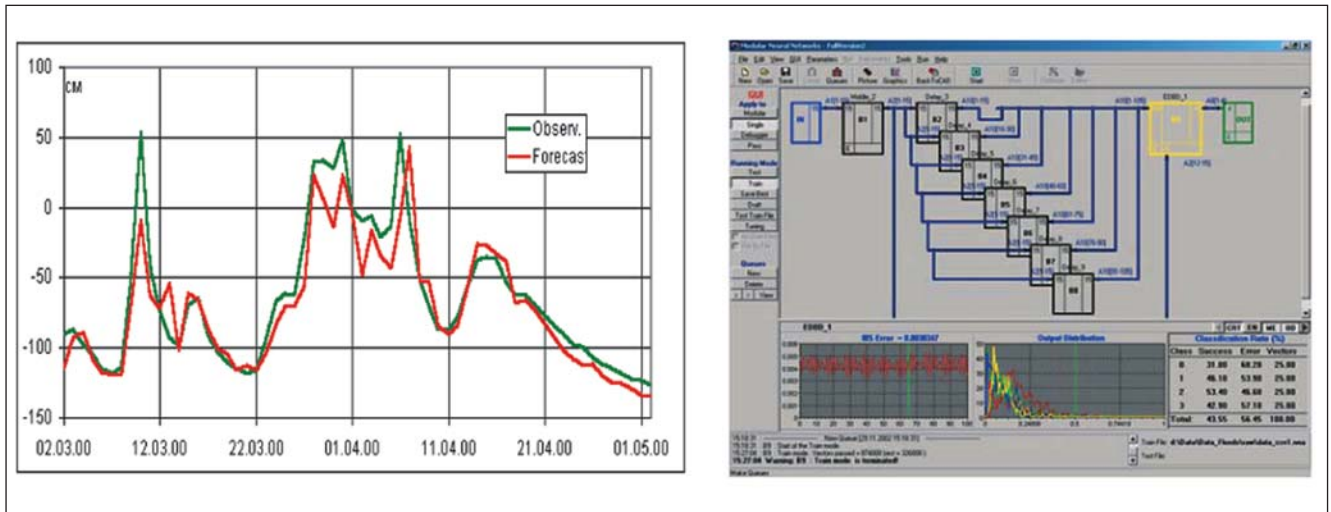


Рис. 5. Нейросистема для прогнозування повеней в регіоні Карпат (прогнозований та реальний рівень води біля Ужгорода в березні-квітні 2000 р.)

логи переконували нас у недоцільності такого поєднання, оскільки між басейнами р. Латориця та р. Уж проходить гірський хребет. Але проведений експеримент показав, що урахування даних басейну р. Латориця майже наполовину скоротило величину похибки прогнозу для р. Уж. Причину такого поліпшення було з'ясовано лише після детального вивчення змін у структурі зв'язків нейромережі. Виявилось, що при навчанні найбільшу вагу отримали зв'язки, за якими в нейромережу надходили дані про інтенсивність опадів у басейні р. Латориця. З цього можна зробити висновок, що нейрокомп'ютер у процесі навчання виявив, що дощі можуть випадати одночасно в обох річкових басейнах, і тому надав перевагу при прогнозуванні даним про опади в басейні р. Латориця (рис. 5).

Експериментальна нейросистема для розпізнавання запахів ("штучний ніс"), створена за грантом міжнародної програми INTAS (рис. 6). У розробці брали участь наукові колективи з України, Італії, Росії та Литви. Відділ нейротехнологій відповідав за розробку нейрокомп'ютера, здатного навчатись розпізнавати ароматичні речовини шляхом аналізу реакції спеціальних сенсорів запаху. Як сенсорні, було використано кварцові резонатори з полімерним покриттям, яке адсорбувало молекули ароматичних речовин, змінюючи цим частоту коливань резонатора. Нейрокомп'ютер одержував дані про зміни резонансних частот і за ними мав визначати типи ароматичних речовин. При розробці нейросистеми використано універсальний нейрокомп'ютер NeuroLand, створений у відділі раніше, та 8 сенсорів за-

паху, розроблених вченими Інституту напівпровідників НАН України. Виконано кілька серій експериментів з різними типами ароматичних речовин — туалетна вода, одеколони, спирти, бензол. У близько 85% випадків нейросистема давала правильні відповіді. Розроблена нейротехнологія розпізнавання запахів використовується в багатьох сучасних промислових газоаналізаторах. На світовому ринку з'являються і побутові моделі, призначені переважно для оцінювання якості харчових продуктів.

5. Нейроінтелект

Незважаючи на серйозні кризові явища, які в останні роки торкнулись і сфери високих технологій, інтенсивність досліджень та розробок у нейрокомп'ютерній галузі не зменшується, що є свідченням потужного внутрішнього потенціалу її розвитку. Витоки цього потенціалу сформувалися ще до початку нейрокомп'ютерного буму, коли в середині 80-х років, став очевидним провал широко розрекламованого проекту інтелектуальної ЕОМ 5-го покоління, яка мала наблизитись до рівня інтелекту пересічної людини. Здатність нейрокомп'ютера шляхом навчання знаходити та засвоювати нові знання розглядалась як альтернатива машинному інтелекту цієї ЕОМ. Перспективи його створення здавались безхмарними, що і дало привід для розгортання світової гонитви за першістю у створенні та впровадженні нейрокомп'ютерів. За першими успіхами у реалізації нейрокомп'ютерної програми не відразу було помічено, що навчання нейронних мереж є набагато складнішою проблемою, ніж



Рис. 6. "Електронний ніс" — лабораторна модель нейросистеми для розпізнавання запахів (2003 р.)

вважалося. Удосконалені методи навчання були ефективними лише для відносно простих прикладних задач, розв'язуваних за допомогою кількох десятків нейронів. При ускладненні задач ефективність нейрокомп'ютерів зменшувалась. Це стало особливо помітним при їх застосуванні до завдань реального часу, таких як розпізнавання звуків або керування динамічними об'єктами. На початку 1990-х років розроблено нові методи навчання, орієнтовані на обробку потоків даних, зокрема метод зворотного поширення похибки в часі, що дозволило збільшити ефективність нейрокомп'ютерів на таких завданнях, але загалом проблема удосконалення їх навчання залишається відкритою.

В останні роки увагу вчених привертає проблема нейроінтелекту, тобто знань, одержуваних нейрокомп'ютером при навчанні. Ці знання представлені як множина параметрів нейронної мережі, яка може мати мільйони величин, які змінюються при навчанні. Це неформалізовані знання. Їх практично неможливо подати у вигляді математичних співвідношень, які можуть бути використані поза нейрокомп'ютером. Тому основний спосіб застосування таких знань полягає у прямому використанні навченого нейрокомп'ютера, або його програмної копії для розв'язання відповідної прикладної задачі. Саме таке розв'язання застосовано у згаданій вище нейросистемі захисту пасажира авто.

Одержані нейрокомп'ютером знання можна використовувати і для вивчення прихованих властивостей тих даних, що використані для його навчання. Таке завдання постало при прогнозуванні поведінки, коли необхідно було з'ясувати, чому дані щодо одного річкового басейну впливали на прогноз в іншому басейні. Відповідь знайшли шляхом вивчення змін параметрів нейронної мережі в процесі навчання. Відомі й інші методи формалізації нейроінтелекту, найпоширенішим із яких є метод скелетизації нейромережі, що полягає у продовженні її навчання з поступовим видаленням найменш значущих нейронів та зв'язків між ними. В результаті формується структура мережі формальних нейронів, яку можна представити логічними формулами. Недоліком цих методів є неточність, пов'язана з частковою втратою інформації при формалізації.

Проблема формалізації нейроінтелекту ускладнюється у разі динамічних нейронних мереж, які застосовуються в системах автоматичного керування для обробки даних у реальному

часі. Такі нейронні мережі при навчанні формують інверсну модель навколишнього середовища, в якій причинно-наслідкові відношення реальних процесів обернені в часі. (Щоб уявити характер інверсної моделі реального процесу, спробуйте послухати магнітофонний запис власного голосу у зворотному напрямку). Методи формалізації для таких мереж непридатні, тому застосовують спеціальні системи нейроуправління, в яких моделювання навколишнього середовища та управління об'єктом виконують різні нейронні мережі. Завдяки такому розподілу система нейроуправління набуває автономності, стає здатною постійно адаптуватись до змін оточення, а також стійкішою до збурень та зовнішніх втручань. Але таку систему практично неможливо контролювати через недоступність неформалізованих знань, які одержують нейронні мережі в процесі адаптації. Практичне застосування таких систем базується на довірі та визнанні досконалості нейроінтелекту.

6. Прихована науково-технічна революція

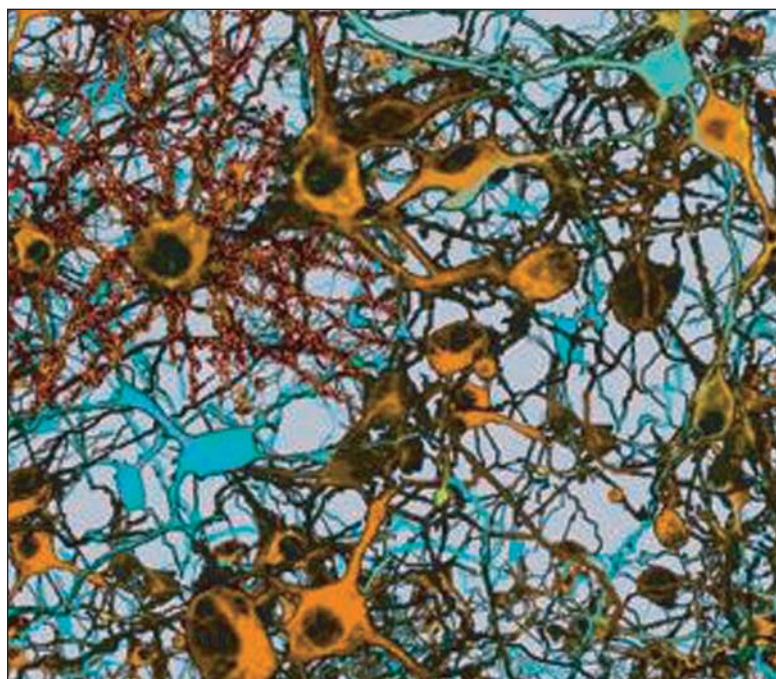
Зараз уже є очевидним, що нейрокомп'ютери — це не просто нові технічні засоби, повністю контрольовані людиною, а якісно нові інтелектуальні об'єкти, здатні навчатись і оволодівати новими знаннями. Їхнє проникнення в різні сфери людського життя є невідворотним процесом, оскільки у людей завжди існуватиме спокуса володарювати, не маючи достатніх для цього знань. Нейрокомп'ютер здатен допо-

могти в цьому. Якщо йому надати необхідні для навчання приклади, то після закінчення навчання він буде діяти як розумний автомат, придатний для використання в подібних ситуаціях, або виконувати функції інтелектуального протезу, компенсуючи прогалини в знаннях користувача.

Не лише людські слабкості та спокуси роблять поширення нейрокомп'ютерів невідворотним. Впровадження нейрокомп'ютерів у промисловості веде до поступової передачі їм основних функцій управління на всіх рівнях виробничого процесу. Аналогічні явища можна спостерігати і в інших сферах людської діяльності. Це є свідченням прихованої науково-технічної революції, яку можна розглядати як відгук революції, що не відбулась у часи нейрокомп'ютерного буму.

Час істотно змінив її цілі та напрями. Замість очікуваної тоді конкуренції між програмованими комп'ютерами та нейрокомп'ютерами спостерігаємо їх симбіоз, а революційні події відбуваються в інтелектуальній сфері, де з'явився новий об'єкт, здатний самостійно здобувати нові знання та користуватись ними.

Проблема нейроінтелекту полягає в тому, що ми не можемо повністю контролювати або використовувати ці знання інакше, як звертаючись до нейрокомп'ютерів. Виробництво та удосконалення нейрокомп'ютерів ще більше збільшує нашу від них залежність. Поки така залежність не становить загрози, але вже розпочате проникнення нейрокомп'ютерів у глобальну мережу Інтернет може радикально змінити ситуацію вже в наступному десятиріччі.



Чисельне моделювання синоптичних зв'язків нейронів (проект "Novel Brain Inspired Learning Paradigms for Large-Scale Neuronal Networks", Інститут теоретичних наук Університету технологій м. Грац, Австрія, <http://whatisartificialintelligence.com/wp-content/uploads/2010/02/synapses.jpg>)