

# Neurokomputery

WŁODZIMIERZ DUCH  
docent, doktor habilitowany,  
Zakład Informatyki Stosowanej  
UMK,  
Toruń

**Zapisana historia cywilizacji to zaledwie 5000 lat. Życie jednostki stanowić może aż 2% tego okresu. Zabiegani w swojej codzienności, rzadko kiedy wybiegamy myślą w przyszłość dalej niż o kilka lat. Postęp nauki jest bardzo szybki, a ludzkość ma przed sobą perspektywę milionów lat — więcej, niż minęło od narodzin Ziemi! Zmiany, które nastąpią dzięki nauce choćby w następnych stu latach, są niewyobrażalne: fizyka dostarczy nam czystej i taniej energii, biologia molekularna stworzy sztuczne białka i poradzi sobie z chorobami, największy jednak wpływ na codzienne życie mieć będzie sztuczne myślenie, a w dalszej perspektywie zrozumienie i bezpośrednia ingerencja w mózg ludzki.**

Mózg. 10 miliardów neuronów połączonych przez 100 tysięcy miliardów połączeń. Niewyobrażalna złożoność? Nawet najbardziej skomplikowane wytwory naszej techniki są setki tysięcy razy prostsze. Zachowanie bardzo złożonych układów jest od niedawna przedmiotem teoretycznych badań matematyków i informatyków. W ciągu 20 lat możemy spodziewać się, że elektroniczne układy osiągną stopień złożoności porównywalny z tą, którą chroni czaszka człowieka. Przeciętny człowiek o mózgu wie zastanawiająco mało, mniej niż o nerkach czy sercu. Dlaczego ignorujemy fakt, że wrażenia zmysłowe, sny, poczucie istnienia, sympatie i antypatie, upadki i uniesienia duchowe, intuicja i logika, wszystko to są wzbudzenia naszego mózgu? Uświadomienie sobie tego faktu stanowić może wspólną płaszczyznę porozumienia całej ludzkości, albowiem, niezależnie od naszych uwarunkowań kulturowych, mózg jest wspólną podstawą biologiczną psychiki człowieka.

Minęły już czasy, kiedy komputery nazywano „sztucznymi mózgami”. Może jednak nie tak bezpowrotnie...

## Mózg i komputery

Modele mózgu w postaci sieci neuronów działających jako elementy logiczne wywodzą się z pracy McCullocha i Pittsa napisanej w 1943 r. Jednak dopiero w latach osiemdziesiątych, a właściwie w ich drugiej połowie, nastąpiła prawdziwa eksplozja. Powołano pismo o sieciach neuronalnych, sprawozdania z licznych konferencji na temat stały się bestsellerami czytanyymi z entuzjazmem przez przedstawicieli różnych dyscyplin naukowych: informatyki, psychologii, fizyki i biologii. Czym są sieci neuronalne i skąd to całe podniecenie?

W odróżnieniu od komputerów, mózg nie pracuje w sposób cyfrowy. Można go raczej porównać do

niezwykle skomplikowanego komputera analogowego, ale o tych rzadko się już obecnie wspomina. Sposób pracy elementarnych komórek sieci nerwowej — neuronów — w niczym nie przypomina pracy komórek pamięci komputera cyfrowego. W układzie nerwowym dochodzi do pewnej chwilowej równowagi napięć w sposób niemożliwy do prześledzenia krok po kroku. W układzie cyfrowym przekłamanie jednego bitu może mieć fatalne skutki. Z układu nerwowego usunąć można znaczną część bez wyraźnego pogorszenia jego własności. W komputerze awaria jednej części doprowadzić może do bezsensownego działania. Pojedynczy neuron otrzymuje impulsy od bardzo wielu neuronów, ma więc wiele wejść, ale tylko jedno wyjście. Połączenia pomiędzy poszczególnymi neuronami są plastyczne, ich sprzężenia zmieniają się w wyniku uczenia się. Jedna komórka nerwowa może utworzyć nawet 10 tysięcy połączeń z innymi komórkami. Elektroniczne komórki łączą się w z góry zaprojektowany sposób z kilkoma innymi elementami. Dokładność obliczeń w urządzeniach cyfrowych jest bardzo duża. Dokładność obliczania przez sieć neuronów niewielka. Trudno o większe przeciwności niż mózg i komputer. Jednak komputery mają w porównaniu z mózgami jedną zaletę: umiemy je konstruować i programować. Dlatego od samego początku ich powstania, pomimo zasadniczego niepodobieństwa ich budowy i funkcjonowania do mózgu, usiłowano nauczyć je podobnych funkcji — zmusić do inteligentnego działania.

## Problemy ze sztuczną inteligencją

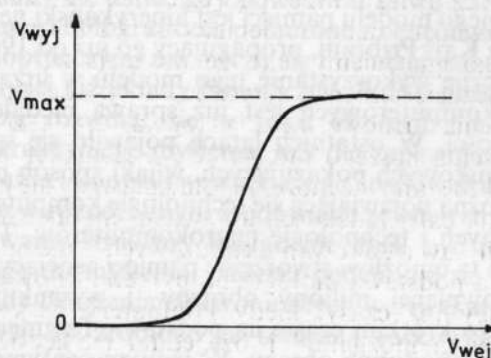
Komputery powoli przenikają do wszystkich dziedzin naszego życia. Spełniają przy tym rolę usługową, znakomicie uzupełniając możliwości człowieka w tych

czynnościach, z którymi ma on trudności: uciążliwych obliczeniach, przeszukiwaniu wielkiej liczby informacji czy rozwiązywaniu zagadnień numerycznych, a więc w pracach umysłowych dających się zmechanizować. Człowiek nie stanowi konkurencji dla komputera w zapamiętywaniu i przetwarzaniu danych, tak jak siła jego mięśni nie stanowi konkurencji dla koparki. Jednocześnie ludzie zachowują niekwestionowaną przewagę nad komputerami w najprostszych czynnościach wymagających zdrowego rozsądku i posługiwania się zmysłami.

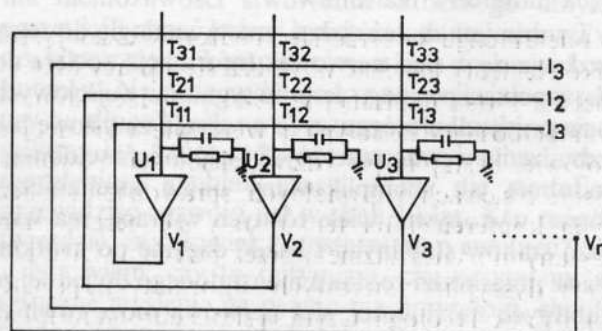
W pierwszym etapie zastosowań komputery pomagały nam wykonywać czynności, które daje się zalgorytmizować, czyli opisać krok po kroku, ze wszystkimi szczegółami. Drugim etapem był rozwój metod heurystycznych stosowanych w zagadnieniach, w których nie znamy co prawda dokładnego przepisu postępowania, ale znamy pewne reguły, których zastosowanie powinno nas doprowadzić do pożądanego wyniku. Wydaje się obecnie, że to podejście również jest ograniczone do stosunkowo prostych, chociaż z praktycznego punktu widzenia bardzo ważnych przypadków, gdy liczba faktów, które należy ze sobą kojarzyć i liczba stosowanych reguł nie są zbyt duże. Początkowe podniecenie towarzyszące wprowadzaniu kolejnych systemów doradczych — programów zawierających wiedzę eksperta o pewnym wąskim wycinku rzeczywistości — uległo niejakiemu zahamowaniu. Systemy takie są bardzo przydatne i rozwija się je intensywnie, są one jednak na etapie technologii, której nieobce są porażki. Umożliwiają grę w szachy na poziomie mistrzowskim, pomagają w analizie danych geologicznych, analizie i syntezie związków chemicznych, lecz postępowanie w tak wydawałoby się prostych zagadnieniach, jak interpretacja pisma ręcznego czy analiza ciągłej mowy i jej zamiana na pisany tekst, jest stosunkowo powolny. W wielu przypadkach nie udaje się znaleźć żadnych reguł. Jak, na przykład, rozpoznajemy twarze? Widząc znajomego w różnym oświetleniu, pod różnym kątem i w różnym humorze, nie mamy wątpliwości, że to ta sama twarz. Próba wyodrębnienia jakichś reguł z procesu rozpoznawania złożonych obrazów kończy się jednak niepowodzeniem — nie udaje się nam zrozumieć, jak to robimy. Czy takie czynności zarezerwowane są dla istot żywych? Czy są one jakąś tajemniczą własnością ludzkiego mózgu? Systemy doradcze mogą nigdy nie dorosnąć do tego typu problemów. Potrzebne jest radykalnie nowe podejście. Wydaje się, że sama konstrukcja komputerów i sposób ich programowania przez określanie czynności, które należy kolejno wykonać, wyklucza możliwość prawdziwie inteligentnego zachowania. Brakuje wówczas miejsca na intuicję i na postrzeganie całości, bez analizy każdego szczegółu. Do tego celu konieczne są:

## Neurokomputery

Kolejny krok w stronę sztucznego mózgu i sztucznego myślenia polega na zrezygnowaniu z klasycznej konstrukcji komputera, a zastąpieniu go prostym modelem sieci nerwowej. Daleko tu jeszcze do prawdziwej symulacji mózgu, ale nawet prymitywne modele mogą dać interesujące rezultaty. Sztuczny neuron jest w zasadzie wzmacniaczem o mocno nieliniowej charakterystyce, tj. prawie skokowej zależności napięcia wyjściowego od napięcia wejściowego (ryc. 1), otrzymanego przez sumowanie napięć pochodzących z wyjść bardzo wielu neuronów. Ponieważ uczenie się jest związane ze zmianą siły połączeń pomiędzy poszczególnymi komórkami nerwowymi, istotną cechą elektronicznych sieci jest ogromna liczba połączeń oraz algorytmy zmiany sprzężeń pomiędzy wejściami a wyjściami sztucznych neuronów. Jest to przykład urządzenia analogowego, w którym poszczególne elementy powiązane są wzajemnie w pozornie chaotyczny sposób (ryc. 2). Wypada wspomnieć, że wiele konstruowanych obecnie sieci nerwowych jest symulacją komputerową: nie na darmo komputery określa się mianem „uniwersalnych”. Taniej jest napisać program symulujący działanie sieci neuronalnej, niż skonstruować odpowiedni sprzęt. Symulować można każdy proces, łatwiej jest wówczas eksperymentować, pod warunkiem że mamy wystarczająco dużo czasu na bardzo szybkim



Ryc. 1. Zależność napięcia wyjściowego od wejściowego dla sztucznych neuronów.



Ryc. 2. Przykład połączeń sieci neuronalnej.  $T_{ij}$  są wagami połączeń i mogą być zarówno ujemne (hamowanie) jak i dodatnie (wzmacnianie). Trójkąty reprezentują sztuczne neurony (wzmacniacze).

komputerze. Realizacja sprzętowa sieci działa nieporównanie szybciej i dlatego kilka firm już oferuje neurokomputery jako urządzenia dołączane do zwykłych komputerów. W rozbudowanych urządzeniach tego typu montuje się dziesiątki tysięcy sztucznych neuronów, a liczba połączeń między nimi sięga miliona. Buduje się też obwody scalone bardzo wysokiej skali integracji (VLSI), stanowiące elementy neurokomputerów.

Co potrafi sieć? Na pewno nie nadaje się do arytmetyki. Na pierwszy rzut oka nie wiadomo, jak zmusić ją do wykonania jakichkolwiek obliczeń. Podobną sytuację mamy jednak w przypadku mózgu. Nie wiemy, w jaki sposób wykonuje on swoje czynności — niestety, o mózgu nie wiemy jeszcze bardzo wiele. Jedną z cech mózgu intensywnie badaną od wielu lat jest zdolność do zapamiętywania informacji. Wydaje się obecnie, że pamięć trwała związana jest ze zmianą połączeń pomiędzy neuronami, aczkolwiek pewną rolę odgrywać mogą substancje biochemiczne. Pamięć ludzka ma kilka niezwykłych cech, odróżniających ją w drastyczny sposób od pamięci komputerowych. Jest to pamięć asocjacyjna, postrzegamy całości, a nie sumę fragmentów, często przypominają się nam ciągi zdarzeń; uszkodzenie części mózgu nie wpływa na utratę pamięci, w tym samym obszarze mózgu przechowywane są zapisy wielu różnych wydarzeń.

Podobne cechy wykazywać mogą pamięci holograficzne i w tym kierunku od lat prowadzi się badania. Najbardziej znanym zwolennikiem holograficznego modelu pamięci jest amerykański neurofizjolog Karl Pribram, propagujący go już od 1969 r. Praktyczne wykorzystanie tego modelu w urządzeniach komputerowych jest już sprawą niedalekiej przyszłości. W ostatnich latach pojawiło się sporo prac naukowych pokazujących, w jaki sposób połączyć można pojawiającą się technologię komputerów optycznych i technologię neurokomputerów. Technologia ta umożliwi stworzenie pamięci asocjacyjnej, przechowującej miliony obrazów i wyszukującej w bardzo krótkim czasie na podstawie fragmentów wszystkie podobne obrazy. W jednym centymetrze sześciennym hologramu objętościowego można zakodować informację o wagach połączeń ponad tysiąc miliardów neuronów.

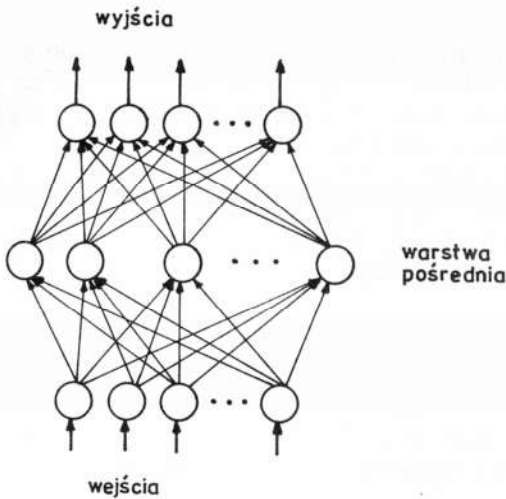
Trudno jest znaleźć jakąś prostą analogię do tego, co dzieje się w sieci nerwowej. Informacja dociera do niej w postaci pewnego zespołu sygnałów wejściowych — w przypadku mózgu są to wrażenia zmysłowe lub wzbudzenia wewnętrzne: myśli i zapamiętane obrazy. Podobnie jak skomplikowany układ mechaniczny potrafi wykonywać wiele różnych wibracji, ma więc dużo stanów stabilnych i każde drganie po krótkim czasie przechodzi ze stanu nieustalonego do jednej ze stabilnych możliwości, sieć nerwowa może również w odpowiedzi na sygnały wejściowe wpadać w różne stany stabilne. Jakże to będą stany, zależy od połączeń elementów sieci. Uczenie się lub zapamiętywanie

informacji przez sieć polegać więc będzie na zmianie tych połączeń. Wzbudzenie sieci przez sygnały wejściowe, częściowo choćby podobne do sygnałów stosowanych w fazie uczenia się sieci, spowoduje wprowadzenie sieci w jeden ze stanów stabilnych; sieć będzie więc rozpoznawać informacje częściowo zniekształcone. Usunięcie kilku neuronów z takiej sieci nie wprowadza większych zmian w jej zdolności do rozpoznawania sygnałów. Co więcej, jak pokazał amerykański fizyk J. Hopfield, sieci tego rodzaju dokonują z matematycznego punktu widzenia minimalizacji pewnej funkcji wielu zmiennych, mogą więc pracować jako rodzaj komputera. Neurokomputer nie jest urządzeniem uniwersalnym, tak jak komputery cyfrowe, ale dla szerokiej klasy problemów reprezentuje radykalnie nowy i bardzo efektywny sposób rozwiązywania zagadnień.

Najprostsze sieci tego typu, oparte na modelu podanym przez J. Hopfielda, zastosowano w wielu zagadnieniach optymalizacji, np. do „Problemu wędrownego sprzedawcy” (znaleźć najkrótszą drogę przez ustalone miasta, odwiedzając każde jeden raz). Rozwiązania takich problemów, znajduwane przez sieć, nie są optymalne, ale nie odbiegają zbyt od najlepszego rozwiązania. Czy i na ile neurosieci konkuruwać mogą ze zwykłymi komputerami, pozostaje jednak sprawą dyskusyjną.

### Sieci wielowarstwowe

Neurokomputery i pamięć asocjacyjna to niewątpliwie osiągnięcia ciekawe, lecz niewystarczające do wywołania tak ogromnej fali zainteresowania neurosieciami (lub też — szerzej — sieciami konekcyjnymi) w szerokich kręgach naukowców. Kolejnym krokiem stała się konstrukcja sieci zdolnych nie tylko do pamiętania, ale i korelacji informacji oraz uczenia się. Pojedyncze warstwy neuronów są zdolne do nauki tylko w bardzo ograniczonym zakresie. Konieczne jest do tego sprzężenie zwrotne, osiągalne za pomocą przynajmniej 3 warstw: wejściowej, pośredniej i wyjściowej (ryc. 3). Sieć taka działa bardzo prosto: połączenia pomiędzy warstwami są początkowo przypadkowe. Podajemy pewien sygnał wejściowy i otrzymujemy jakieś sygnały na wyjściu. Sygnały te porównujemy ze znaną nam odpowiedzią i posługujemy się różnicą pomiędzy odpowiedzią daną przez sieć i odpowiedzią pożądaną, by zmienić połączenie warstwy pośredniej z warstwą wyjściową. Algorytm dokonywania tych zmian, znany pod nazwą „wstecznej propagacji błędów”, równoważny jest dobrze znanej matematykom metodzie gradientowej minimalizacji. Zastosowanie tego algorytmu stało się jednym z głównych powodów postępu w dziedzinie sieci neuropodobnych. Spodziewamy się, że po wytrenowaniu sieci w kilku znanych przypadkach nauki czy ona dać nam sensowne odpowiedzi również w sytuacjach nowych. Jak to wygląda w praktyce?



Ryc. 3. Trzywarstwowa sieć neuropodobnych elementów.

Jednym z pierwszych zastosowań wielowarstwowej sieci neuronalnej była NETtalk, sieć przeznaczona do nauki wymowy tekstów pisanych po angielsku. Dane wejściowe to tekst, wyjściowe to dźwięki produkowane przez głośnik i porównywane z nagranyymi na taśmę odczytanymi tekstami. Początkowo maszyna „gaworzy”, potem wymowa się staje coraz wyraźniejsza, wreszcie sieć opanowuje tajniki mowy angielskiej na tyle, że można dać jej całkiem nowy tekst, a ona odczyta go w zrozumiałym sposób. W ten sposób sieć uczy się na podstawie przykładów. Można ją nauczyć rozpoznawania mowy oraz pisma ręcznego. Szczególnie wiele zastosowań wiąże się z analizą obrazów: tradycyjne techniki są bezradne wobec takich zadań jak próba wyszukania podobieństwa na zdjęciach złożonych obiektów. Trudno wymienić wszystkie zastosowania, jakie znalazły do tej pory sieci nerwowe: uczy się je prowadzenia samochodów, kontroli radarowej i wyszukiwania informacji wśród szumu (niestety, zastosowania wojskowe są bardzo liczne), kontrolowania ruchów robotów, wspomaganie decyzji w takich sprawach jak kontrola lotów czy udzielanie pożyczek w bankach. Demonstracją możliwości neurosieci jest nauka gry w tryktraka, wykorzystująca zapisy partii pomiędzy dobrymi graczami.

Praca z siecią nerwową przypomina pracę eksperymentalną: układ nie powinien być zbyt prosty, bo nie da się go wiele nauczyć, ani zbyt złożony, bo nastąpić może zbyt duża specjalizacja i nie będzie dobrze uogólniać, a więc nie sprawdzi się w nowych sytuacjach, natomiast zapamięta bardzo dobrze wszystkie przykłady podawane w fazie treningu. Próbowano również stosować sieci nerwowe do przewidywania takich zdarzeń, jak zakłady piłkarskie (na podstawie wyników rozgrywek z poprzednich lat) czy wyścigi konne, podobno z bardzo dobrym skutkiem (piszę „podobno” ponieważ są to informacje z pisma „PC Computing”, a nie z literatury naukowej). Należy się spodziewać pojawienia się w ciągu roku powszechnie dostępnych programów kompute-

rowych korzystających z techniki sieci neuropodobnych. Dyskutuje się też możliwości połączenia logicznej, klasycznej techniki sztucznej inteligencji, jaką stosuje się w systemach doradczych, z intuicyjnym podejściem neurosieci.

### Dokąd zmierzamy?

Na skrzyżowaniu fizyki, informatyki, biologii, nauki o mózgu, neurofizjologii rodzi się nowa nauka i nowa technologia. Teoretycy informatyki patrzą na nią z niechęcią, gdyż właściwie nie wiemy, w jaki sposób działają sieci. Nie potrafimy (i nie chcemy) śledzić w szczegółach wszystkich zachodzących w nich zmian ani sformułować algorytmu rozwiązania problemu na podstawie znanych reguł. Paradoksalnie, możemy konstruować urządzenia potrafiące kojarzyć pewne informacje, chociaż nie wiemy, jak one to robią. Algorytmy programowania sieci nie są bowiem algorytmami rozwiązywania konkretnych problemów, a raczej sposobami uczenia się na przykładach. Realizujemy w ten sposób pewną formę intuicji opartą na logicznym myśleniu, lecz wynikającą z doświadczenia. Chociaż wydaje się to zbliżone do sposobu działania mózgu, funkcjonowanie neurosieci ma jednak w bezpośrednim sensie niewiele wspólnego z działaniem ludzkiego mózgu — nie spodziewamy się, by mózg posługiwał się podobnym algorytmem co konstruowane przez nas sieci. Nie znaczy to jednak, by nie można było i na tej drodze osiągnąć inteligencji. Wydaje się, że technika dysponuje znacznie lepszym materiałem niż Przyroda miliony lat temu, gdy powstawał mózg naczelnych. Pamięci holograficzne połączone z neurokomputerami optycznymi nie męczą się i działają miliony razy szybciej niż układy biologiczne. Warto pamiętać, że mózg rozwinął się w toku ewolucji nie w celu abstrakcyjnego myślenia, lecz dla zapewnienia przetrwania i kontroli wewnętrznego środowiska organizmu w różnorodnym środowisku zewnętrznym. Kopowanie struktury mózgu nie musi być najlepszą drogą do myślenia, chociaż podejmuje się również próby tworzenia elektronicznych wersji tkanki mózgowej, np. zrobiono już sztuczną siatkówkę (jest to oczywiście urządzenie analogowe, a nie cyfrowe). Nie znamy żadnego powodu, by maszyny nie mogły myśleć, uczyć się i tworzyć. Liczne próby dowiedzenia niemożliwości stworzenia sztucznego umysłu, nawet jeśli uznać którąś z nich za udaną, odnoszą się do klasycznych komputerów, a nie do neurokomputerów. Na razie myślenie to nasza specjalność. Ale czy na długo? Jeśli wyobrazimy sobie setki, tysiące, miliony lat, które ludzkość ma przed sobą, jest to niezgłębiona otchłań czasu, a my nie potrafimy przewidzieć rozwoju już w skali 10 lat. Kto mógłby twierdzić, że człowiek to ostatni etap ewolucji?

Nie wiem, czy to optymizm, czy pesymizm, ale sztuczne myślenie na pewno ma przyszłość, chociaż trudno przewidzieć, kiedy się pojawi: powstać może w ciągu następnych 10—20 lat. Na razie jesteśmy w początkowej fazie rozwoju neurosieci, jednej z no-

wych dróg w kierunku sztucznego myślenia. Nie sposób przewidzieć, czy dla osiągnięcia tego celu wystarczy neurosieci plus kilka kluczowych pomysłów, czy też konieczne są rozwiązania zupełnie nowe. Gra toczy się jednak o bardzo wielką stawkę. Kraje, które posłużą się technologią sztucznego myślenia, przyspieszą swój rozwój w dotychczas nie spotykanym stopniu. Smutkiem napawa fakt, że w Polsce tak niewiele prowadzi się badań w dziedzinie sztucznej

inteligencji. Chociaż próbuje się podejmować pewne wysiłki w mikroelektronice, to o rozwoju oprogramowania jakoś nie słychać. Nie stać nas może na wysiłek Japończyków (V generacja komputerów) czy skoordynowane działania Europy Zachodniej (np. program ESPRIT, czyli Europejski Strategiczny Plan Badań w Technologii Informatycznej), ale czy stać nas na niedorozwój tak z praktycznego punktu widzenia ważnej dziedziny? □