

# **Wprowadzenie do sieci neuronowych**

**dr hab. inż. Jerzy Balicki, prof. nadzw.**

# **Sztuczne sieci neuronowe**

- **Definicja ANN (ang. Artificial Neural Network)**
- **Dwie podstawowe koncepcje**
- **Rodzaje sieci neuronowych**
- **Możliwości zastosowań**

# Biologiczne sieci neuronowe

Organizmy, mózgi, układy biologiczne – potrafią rozwiązywać interesujące, efektywnie niealgorytmizowalne problemy.

**Układy biologiczne są zbyt skomplikowane, by modelować szczegóły ich działania.**

Istnieje teoria pozwalająca na bardzo szczegółowe symulacje własności pojedynczych neuronów.

**Jedynie ogólne zasady organizacji i sposobu funkcjonowania układów biologicznych neuronów mogą służyć za inspirację.**

Sztuczne sieci neuronowe (ANN, Artificial Neural Networks) nie przypominają zbyt wiele biologicznych.

# Rozwój ANN

- 1938 N. Rashevsky, Neurodynamika
- 1943 W. McCulloch & W. Pitts, Sieci neuronowe jako układy logiczne (progowe)
- 1949 D. Hebb, Uczenie się na poziomie synaptycznym
- 1958 F. Rosenblatt, Perceptron  
J. von Neuman, The computer and the brain
- 1960 B. Widrow, M. Hoff, Adeline
- 1961 E. Caianiello, Teoria procesów myślowych
- 1967 K. Steinbuch, E. Schmitt, Macierze uczące się
- 1969 M. Minsky, S. Papert, książka „Perceptrony”
- 1973 von der Malsburg, Samoorganizacja w układzie nerwowym
- 1976 S. Grossberg, Modele rozwoju postrzegania przez mózg

# Rozwój ANN

- 1977 S-I. Amari, Neuronowa teoria tworzenia się koncepcji
- 1981 J. McClelland, D. Rumelhart, Model interakcyjnej aktywacji
- 1982 J. Hopfield, Model Hopfielda  
T. Kohonen, Samoorganizacja map topograficznych mózgu
- 1983 K. Fukushima, S. Miyake, T. Ito, Neokognitron
- 1984 F. Crick, Sieci i neuronalne podstawy świadomości
- 1985 D. Ackley, G. Hinton, T. Sejnowski, Maszyny Boltzmana
- 1986 D. Rumelhart, G. Hinton, R. Williams, Wsteczna propagacja
- 1987 G. Carpenter, S. Grossberg, Model ART2  
C. Skarda, W. Freeman, Chaos w mózgu  
C. Bachmann, L. Cooper, A. Dembo, O. Zeitouni, Model relaksacyjny pamięci skojarzeniowej
- 1988 B. Kosko, Model BAM  
N. Qian, T. Sejnowski, Białka i Nettek
- 1990 T. Poggio, F. Girosi, Sieci RBF i teoria regularyzacji

# Możliwości modelowania mózgu

- Matematyczne (analityczne) - ograniczone
- Elektroniczne - złożone modele, aktywna dziedzina
- Komputerowe - symulacja, najciekawsze wyniki

**Jaki jest cel modelowania?**

**Neurony: logiczne, wielostanowe, progowe ...**

**ANN – liczne zastosowania techniczne, modele funkcji mózgu, neurony impulsujące lub progowe.**

**PDP (ang. Parallel Data Processing) rozproszone przetwarzanie danych – wszelkie modele sieciowe, niekoniecznie neuronowe.**

**Wiarygodność biologiczna vs. liczba neuronów sieci: im prostsze elementy, tym bardziej złożone sieci można konstruować.**

# Własności modeli neuronowych

Modele neuronowe to:

- podklasa modeli adaptacyjnych (ang. *adaptive systems*);
- podklasa modeli PDP opartych na przetwarzaniu rozproszonym (współbieżnym).

## Sposób uczenia:

- Uczenie „nadzorowane” (*supervised*) skojarzeń par struktur wejściowych i wyjściowych.
- Uczenie się bez nadzoru (*unsupervised learning*), do wykrywania reakcji na „interesujące” sygnały, uczenie indukcyjne – uogólnianie przykładów.
- Uczenie z krytykiem lub wzmocnieniem (*reinforcement learning*), strategii postępowania na podstawie krytyki po dłuższym okresie czasu, uczenie się celowego zachowania na podstawie interakcji ze środowiskiem.

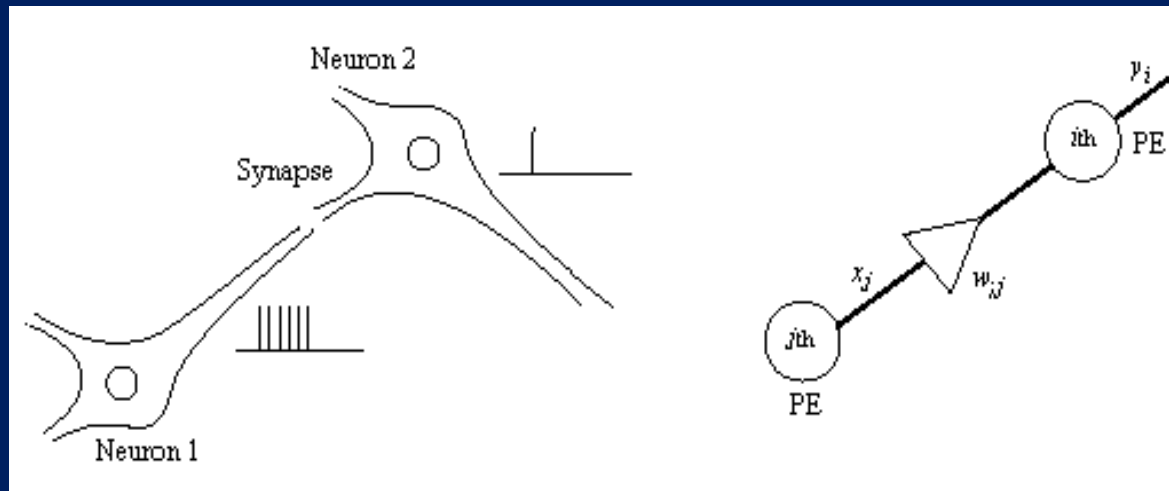
# Inteligentne zachowania ANNs

1. **Autoasocjacja:** struktury przedstawiane są wielokrotnie a system ma je zapamiętać i przypomnieć sobie, gdy przedstawi się im podobne, tj. skojarzyć.
2. **Asocjacja struktur:** struktury przedstawiane są wielokrotnie, parami (X, Y), pojawienie się X ma wywołać Y.
3. **Pamięć adresowalna kontekstowo:** wydobywanie informacji nie przez znajomość miejsca, ale atrybutów informacji.
4. **Klasyfikacja (diagnoza, rozpoznanie):** przypisać do jednej z ustalonych kategorii.
5. **Detektor regularności:** struktury pojawiają się z pewnym prawdopodobieństwem i należy wykryć statystyczne regularności tworząc nowe kategorie. Nie ma nauczyciela, spontaniczne wykrywanie.
6. **Optymalne spełnianie ograniczeń:** wiele hipotez, które na raz nie mogą być prawdziwe; szukanie kompromisu.

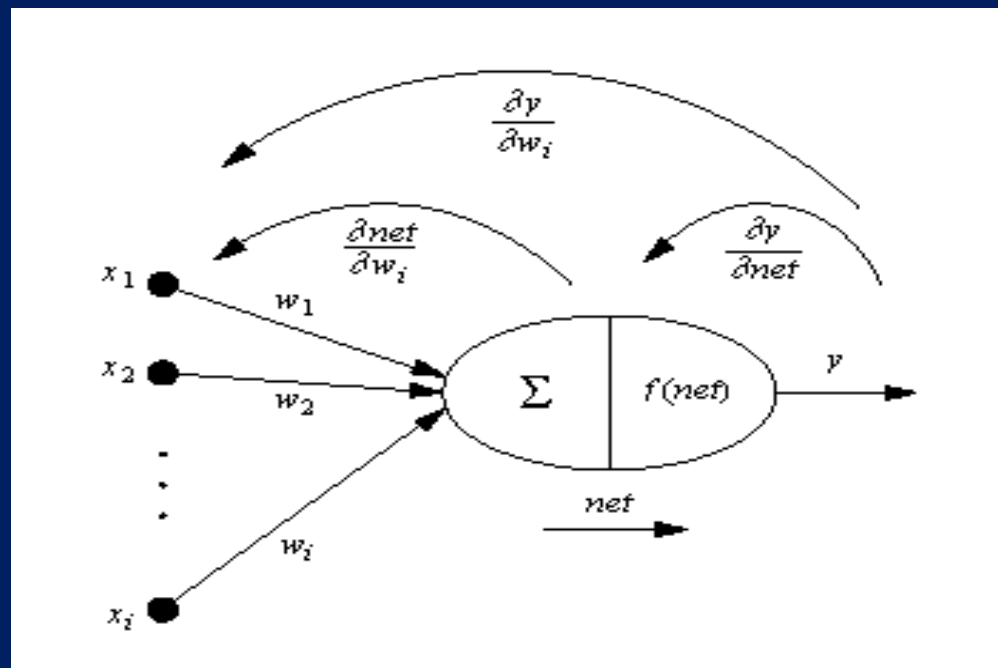


# Główne aspekty modeli neuronowych

1. Sposób modelowania pojedynczego neuronu, zbiór elementów przetwarzających (PE, *processing elements*).



2. Stan aktywacji (wzbudzenia) poszczególnych neuronów.
3. Sposób aktywacji neuronów.
4. Funkcja opisująca sygnał wyjściowy elementu.



## Aspekty NN

5. Sposób propagacji wzbudzeń przez sieć neuronową.
6. Topologia połączeń elementów, czyli architektury sieci.
7. Reguły modyfikacji parametrów opisujących neurony i połączenia pomiędzy nimi (reguły uczenia się).
8. Otoczenie, w którym działa sieć neuronowa.
9. Realizacja techniczna całości.

## Model neuronu

Neuron  $n_i$  zbiera dochodzące do niego sygnały  $o_j$  od neuronów  $n_j$  obliczając sumę ważoną tych sygnałów, mnożąc przez  $W_{ij}$  i tworząc sumaryczny sygnał wejściowy:

$$I_i(t) = \sum_j W_{ij} o_j(t)$$

Sumowanie przestrzenne i czasowe potencjałów zgromadzonych na błonie komórkowej daje całkowitą aktywację elementu:

$$a_i(t) = F(I_i, a_i(t-1))$$

Aktywacja z progiem  $\theta_i$  wzbudzenia, określa sygnał wyjściowy

$$o_i(t) = f_i(a_i, \theta_i)$$

# Uczenie

Wagi synaptyczne  $W_{ij}$  zmieniają się powoli w czasie.

Reguła uczenia Hebba (1949):

$$\Delta W_{ij} = \eta a_i(t) o_j(t)$$

Ogólna reguła uczenia się ( $Y$  - sygnał nagrody):

$$\Delta W_{ij} = g(a_i(t), Y_i(t)) h(o_j, W_{ij}(t))$$

Reguła delta albo reguła Widrowa-Hoffa:

$$\Delta W_{ij} = \eta (Y_i(t) - a_i(t)) o_j(t)$$

Stosowane są także inne reguły.

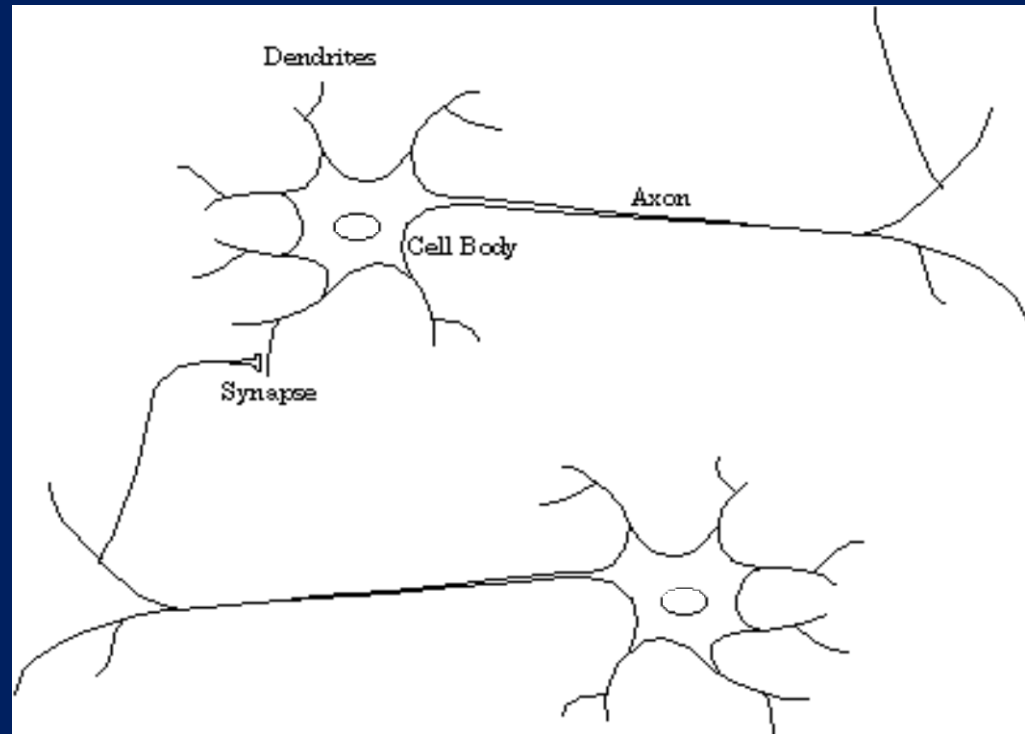


# Reguła Hebba (1949)

„Kiedy akson komórki A jest dostatecznie blisko, by pobudzić komórkę B i wielokrotnie w sposób trwały bierze udział w jej pobudzaniu, procesy wzrostu lub zmian metabolicznych zachodzą w obu komórkach tak, że sprawność neuronu A jako jednej z komórek pobudzających B, wzrasta.”

$$\Delta W_{ij} = \eta a_i(t) o_j(t)$$

Na poziomie molekularnym:  
LTP - Long Term Potentiation  
LTD - Long Term Depression  
E. Kandel, Nobel 2000



# Neurony

**Computational Cognitive Neuroscience – modelowanie pojedynczych neuronów i niewielkich grup tak, by zachować mierzalne parametry.**

**Impulsy wysyłane przez neurony => nieliniowe procesy.**

**Analiza zjawisk nieliniowych – trudna, niewiele ścisłych rezultatów, niskie wymiary zagadnień, a neurony mają interakcje z tysiącami synaps.**

**Metody analityczne są tu mało przydatne.**

**Alternatywy: symulacje komputerowe i elektroniczne układy analogowe.**

**Dokładność symulacji vs. koszty: interesujące zachowania już w najprostszych sieciach neuronowych.**

**Zachowanie neurofizjologicznie wymaga skomplikowanych modeli z impulsującymi neuronami.**

# Modelowanie sieci

## Cel modelowania ANN:

- badanie formalnych własności układów prostych, nieliniowych elementów oddziaływujących ze sobą i wykazujących kooperatywne własności.
- modelowanie funkcji biologicznych neuronów.

Rozważamy uproszczony model neuronu, połączmy wiele takich elementów razem i zbadajmy zachowanie się systemu.

Dodajmy parametry, pozwalające na adaptację układu, sformułujmy regułę uczenia, czyli adaptacji parametrów.

- Pierwszy krok – wybór modelu neuronu.

# Neurobiologia

*Decydującą rolę odgrywa przewodnictwo synaptyczne.*

**Niewiele jest na to bezpośrednich dowodów!**

**Badania Kandela (Nobel 2000) nad ślimakami *Aplysia* i krabami *Limulus*.**

**Pośrednie dowody: ogólny wzrost liczby i wielkości synaps w procesie uczenia się.**

**Dokładny opis wymaga uwzględnienia:**

- różnicy typów synaps,
- neurotransmiterów i neuromodulatorów,
- dynamiki impulsacji, lokalnych obwodów



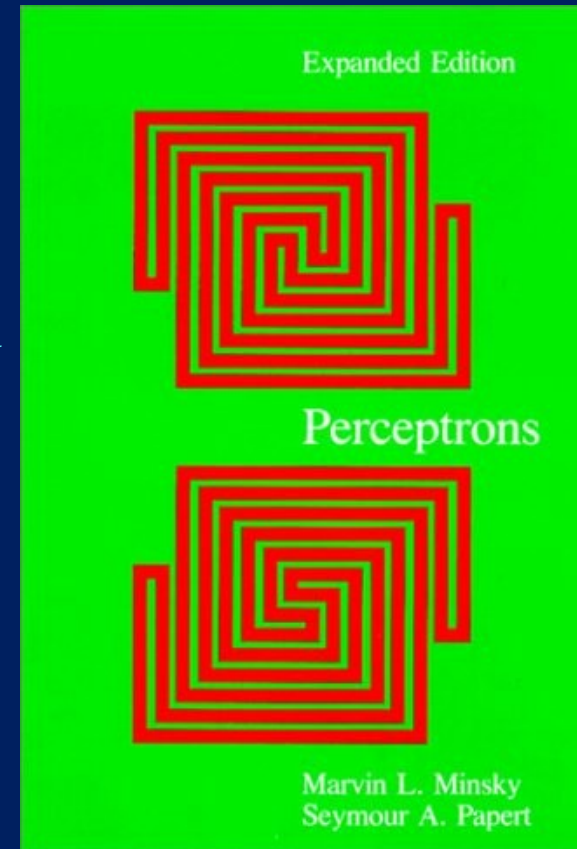
# Możliwości ANN

**Badania możliwości obliczeniowych („klas uniwersalności”) algorytmów ANN.**

- **szybkość uczenia się, pojemność informacyjna – silnie zależy od rodzaju zastosowanych neuronów.**

Są jednak klasy zadań, które wykraczają poza asocjacje, np. problem spójności grafów.

Rozwiązanie za pomocą ANN synchronizujących impulsy jest możliwe.



# Neurony progowe

**McCulloch, Pitts (1943-49):** przetwarzanie informacji w sieciach logicznych.

*Sieć elementów logicznych ma moc automatu Turinga.*

**MacCulloch i Pitts (1943):**

Zdarzenia neuronalne i ich relacje traktowane być mogą za pomocą logiki zdań.

Model logiczny (binarny): zmiana amplitudy, czasu, kształtu impulsu nie gra roli, teoretycznie nie zwiększa mocy obliczeniowej sieci.

**Neurony McCullocha i Pittsa:**

- mogą być tylko w dwóch stanach, aktywne albo nieaktywne;
- każdy neuron ma ustalony próg pobudzenia;
- sygnały dochodzą przez synapsy pobudzające i hamujące;
- wszystkie synapsy mają identyczny wpływ;
- sygnały sumują się w pewnym kwancie czasu;

# **Czym jest Artificial Neural Network? (ANN)**

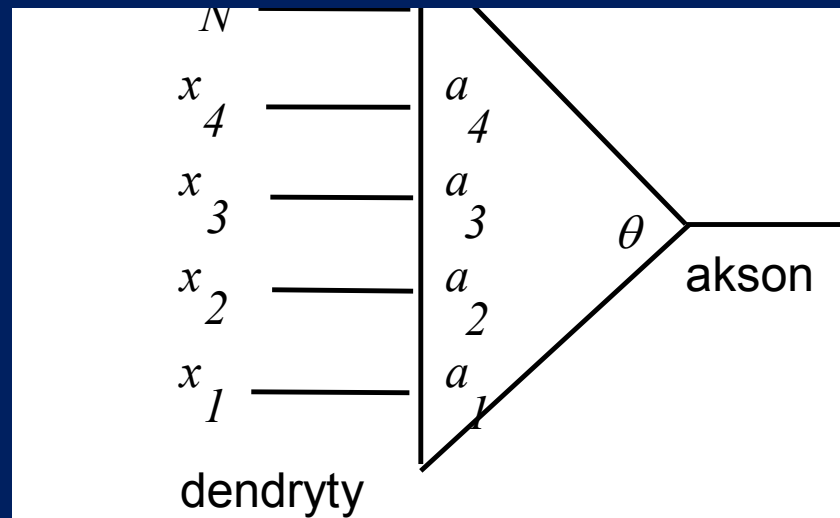
- **ANN jest metodą obliczeniową bazującą na funkcjonowaniu mózgu i systemów nerwowych w organizmach biologicznych**
- **System obliczeniowy zrobiony z wielu prostych wzajemnie połączonych elementów, które przetwarzają dane za pomocą dynamicznej zmiany stanów tych elementów spowodowanej zewnętrznymi wejściami.**

**—R.Hecht-Nielsen (1989)**

# Neuron MC-P

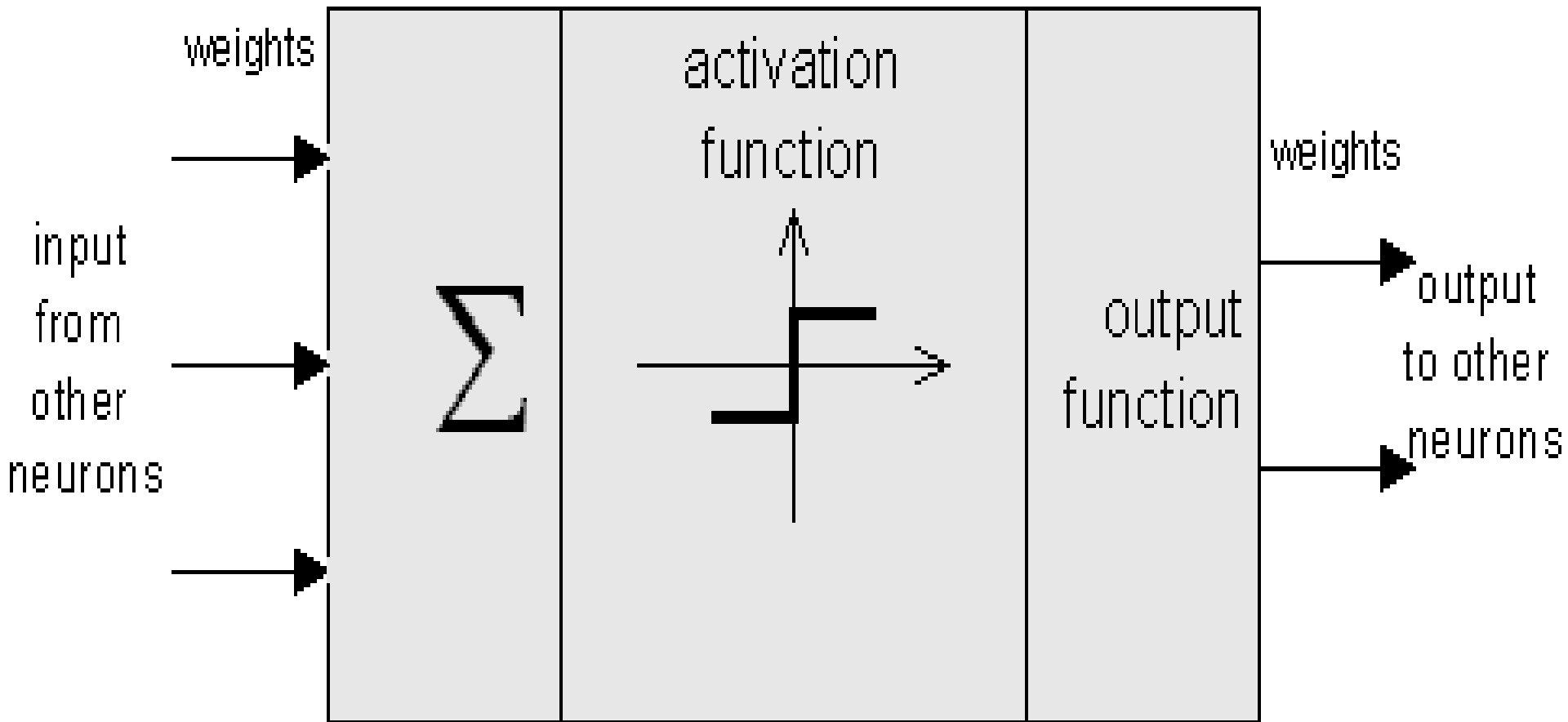
- sygnały wejściowe  $x_i = 0, 1$ ;
- rodzaj pobudzenia  $W_i = \pm 1$  (synapsy pobudzające i hamujące);
- próg wzbudzenia neuronu  $\theta > 0$

Sygnał wyjściowy: **ważone sumowanie**  
w dyskretnych momentach czasu:



$$o(x) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } \sum_{i=1}^N W_i x_i \geq \theta \\ 0 & \text{gdy } \sum_{i=1}^N W_i x_i < \theta \end{cases}$$

# Przykład pojedynczego neuronu



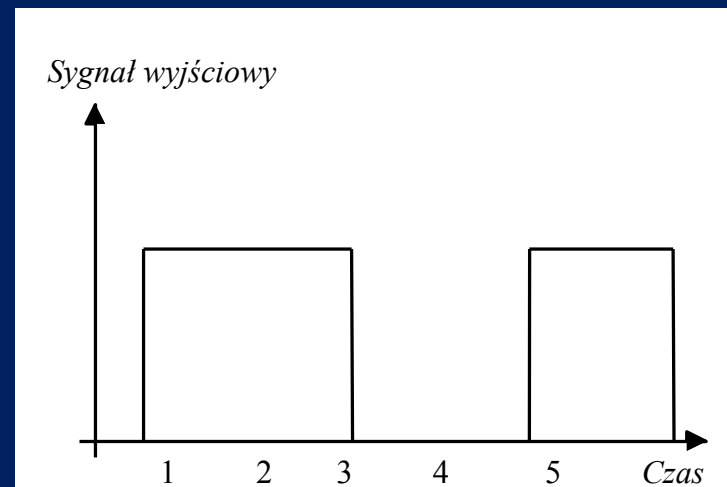
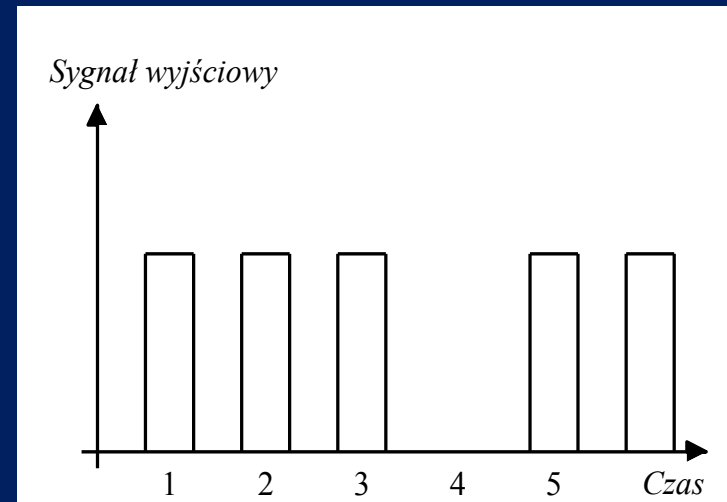
# Sieci MC-P

Po wysłaniu impulsu rzeczywisty neuron przechodzi w stan spoczynku.

ANN: najpierw zbadano procesy niezależne od czasu, potem dynamikę.

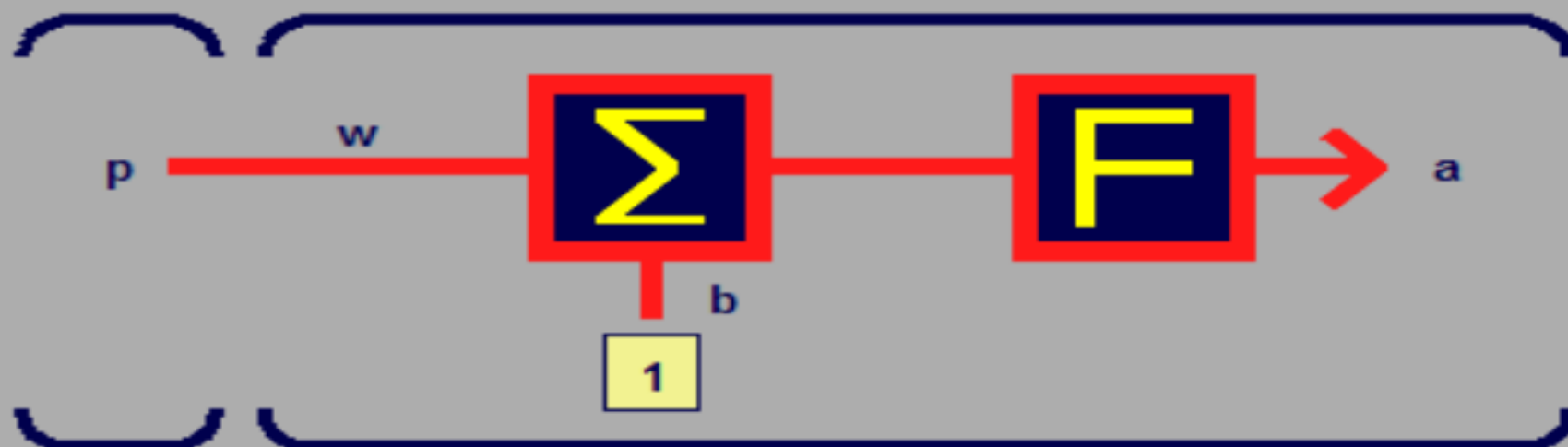
Sieci logiczne z synchronizacją impulsów robią to samo, co sieci bez synchronizacji, jeśli dodamy dodatkowe neurony opóźniające.

Stałą aktywność neuronów w sieciach logicznych łatwo jest zamienić na serię impulsów wprowadzając pomiędzy momentami  $t$ ,  $t+1$  pośredni moment  $t+1/2$  czasu, w którym neurony są w spoczynku.

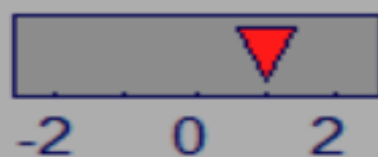


Input

Linear Neuron:  $a = \text{purelin}(w \cdot p + b)$



$w$

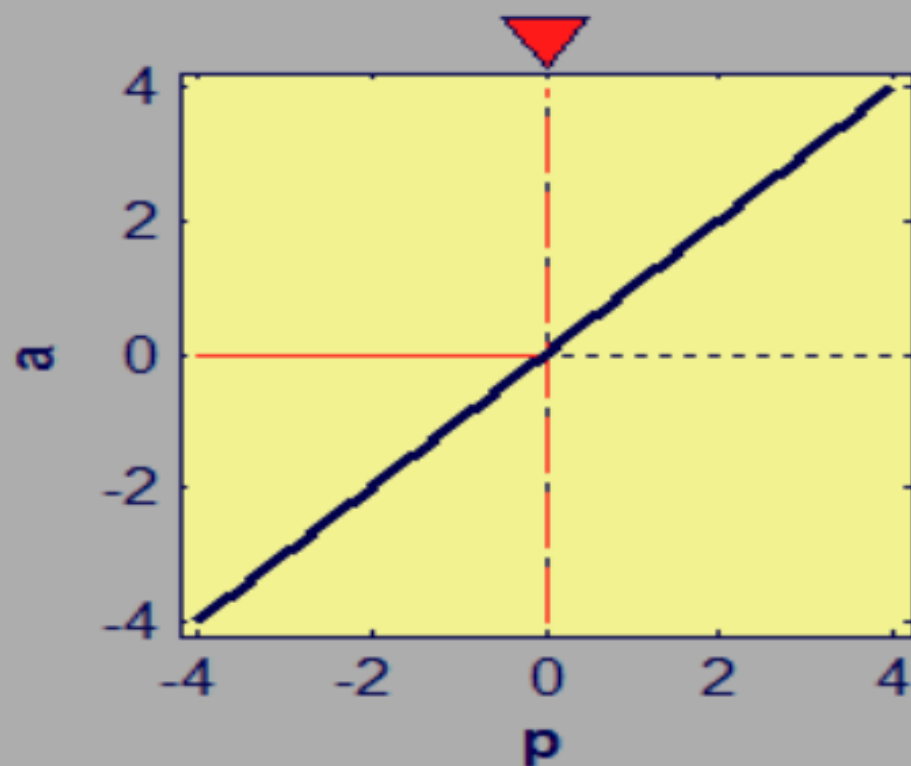


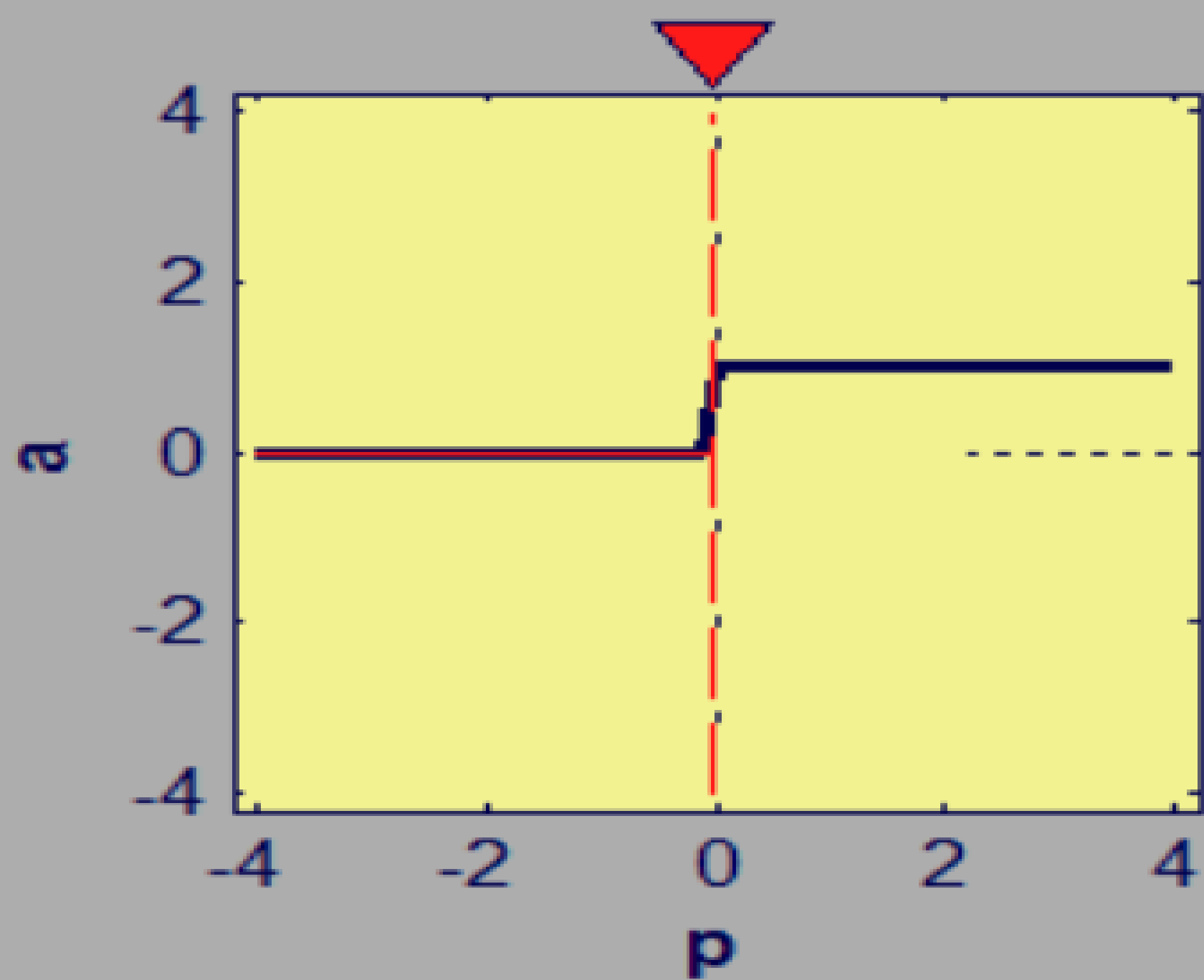
$b$



$F$ :

Purelin







# Sieci logiczne i biologiczne

W sieciach biologicznych miarą aktywności jest częstotliwość + długość (czas trwania) serii impulsów.

**Podejście synchroniczne:**

zakładamy istnienie centralnego zegara, obliczamy w czasie  $t$  stan aktywności wszystkich neuronów jednocześnie.

**Podejście asynchroniczne:**

sumowanie impulsów w okienku czasowym, krótkim w porównaniu z szerokością impulsów (ok. 0.25 ms, czas impulsów 1 ms).

Sieci logicznych neuronów mogą zrealizować dowolne funkcje logiczne.

Ucząc się funkcji logicznych sieci realizują reguły w postaci:

IF  $\theta$  z  $N$  argumentów jest prawdziwych THEN konkluzja.

# Separowalność

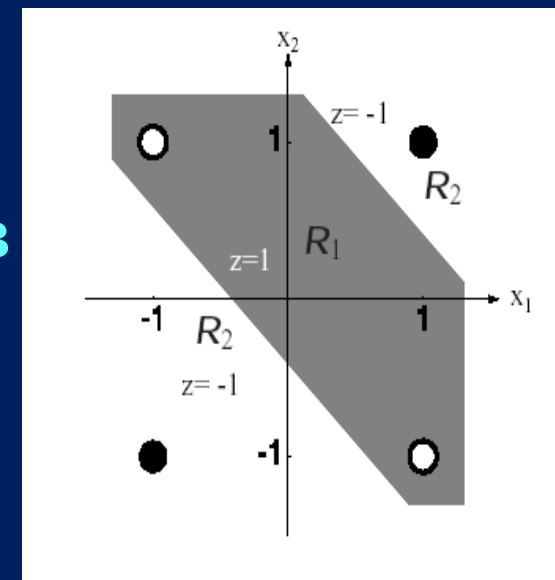
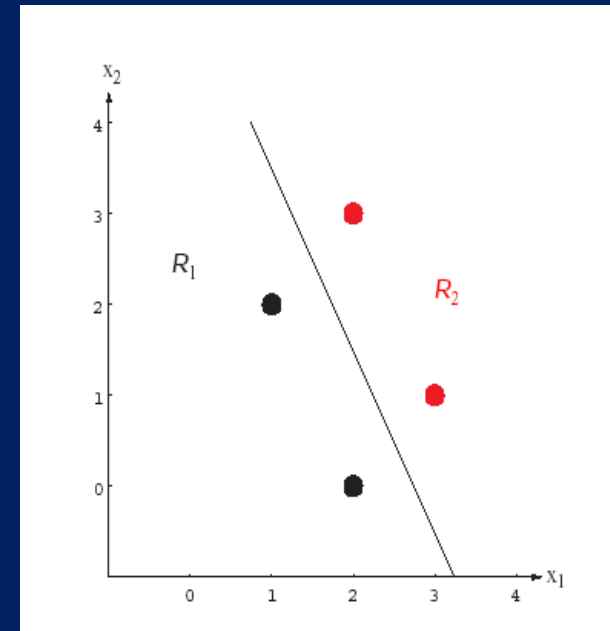
Pojedynczy neuron realizuje tylko funkcje liniowo separowalne, tzn. wartości  $f(x)=T$  można oddzielić od  $f(x)=F$  za pomocą płaszczyzny.

Np: funkcja  $f(A,B) = A.OR.B$  jest separowalna.  
Za to funkcja  $f(A,B) = A.XOR.B$  nie jest liniowo separowalna.

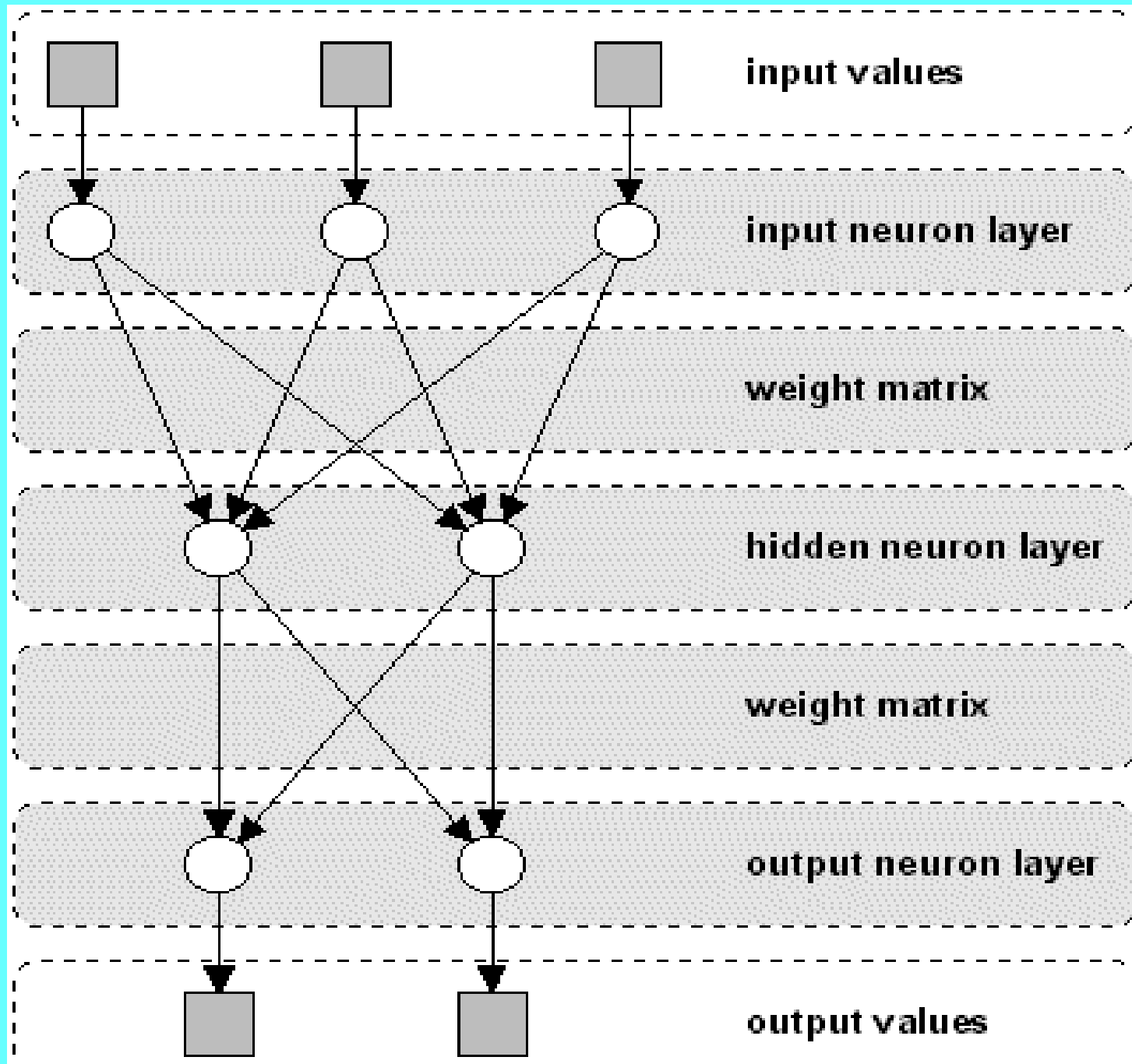
Dodatkowe synapsy hamujące pozwalają na realizację dowolnej funkcji.

Np. wejścia hamujące  $A'=B$  i  $B'=A$  i pobudzające  $A, B$  pozwalają na realizację funkcji XOR.

Mechanizm hamowania presynaptycznego został odkryty przez Johna Ecclesa dopiero po pracach teoretycznych!



# Sieć z trzema warstwami neuronów



# Rodzaje ANN

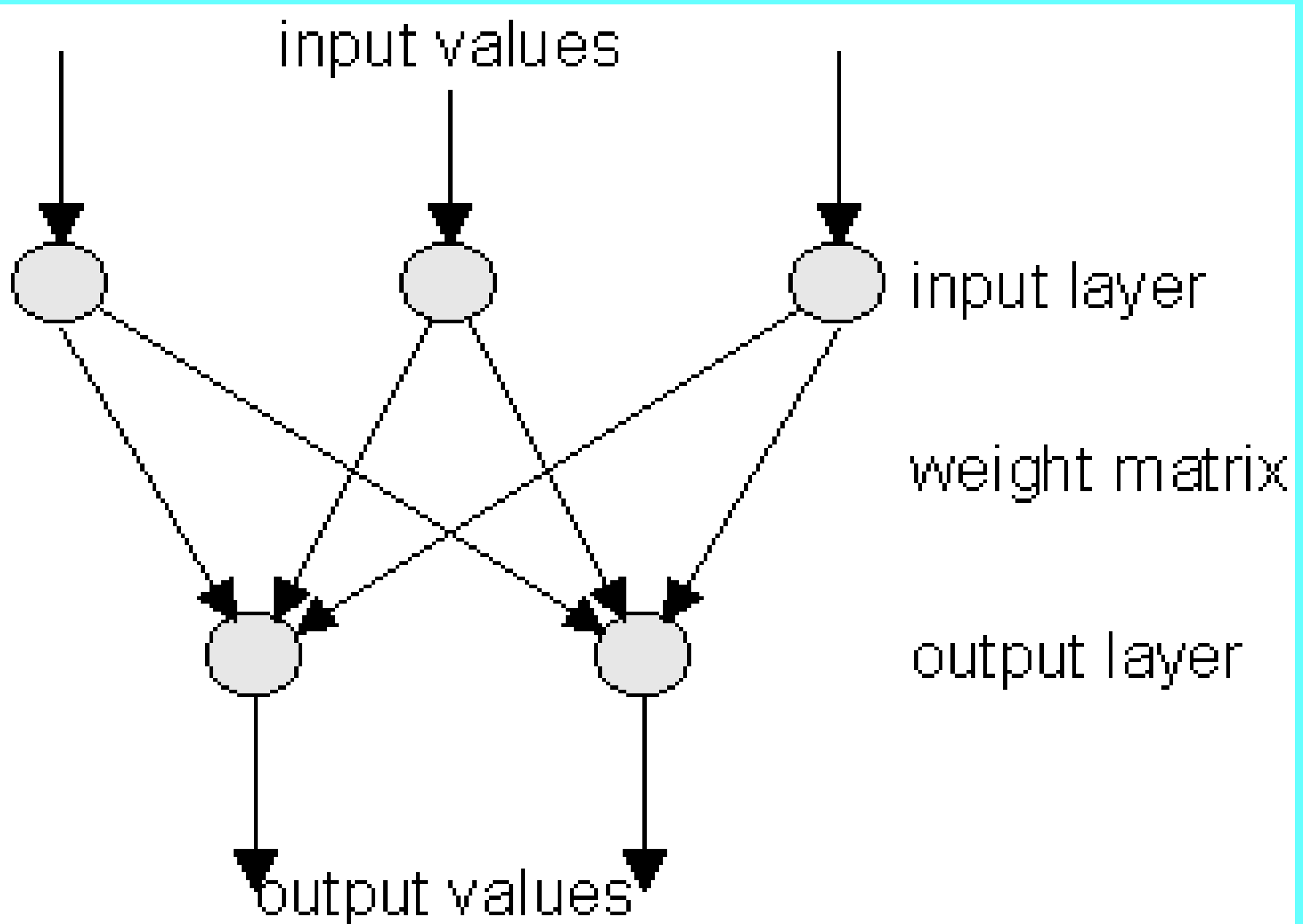
**Mogą być klasyfikowane na podstawie:**

- **typów (feedforward or feedback)**
- **struktury**
- **algorytmu uczenia**

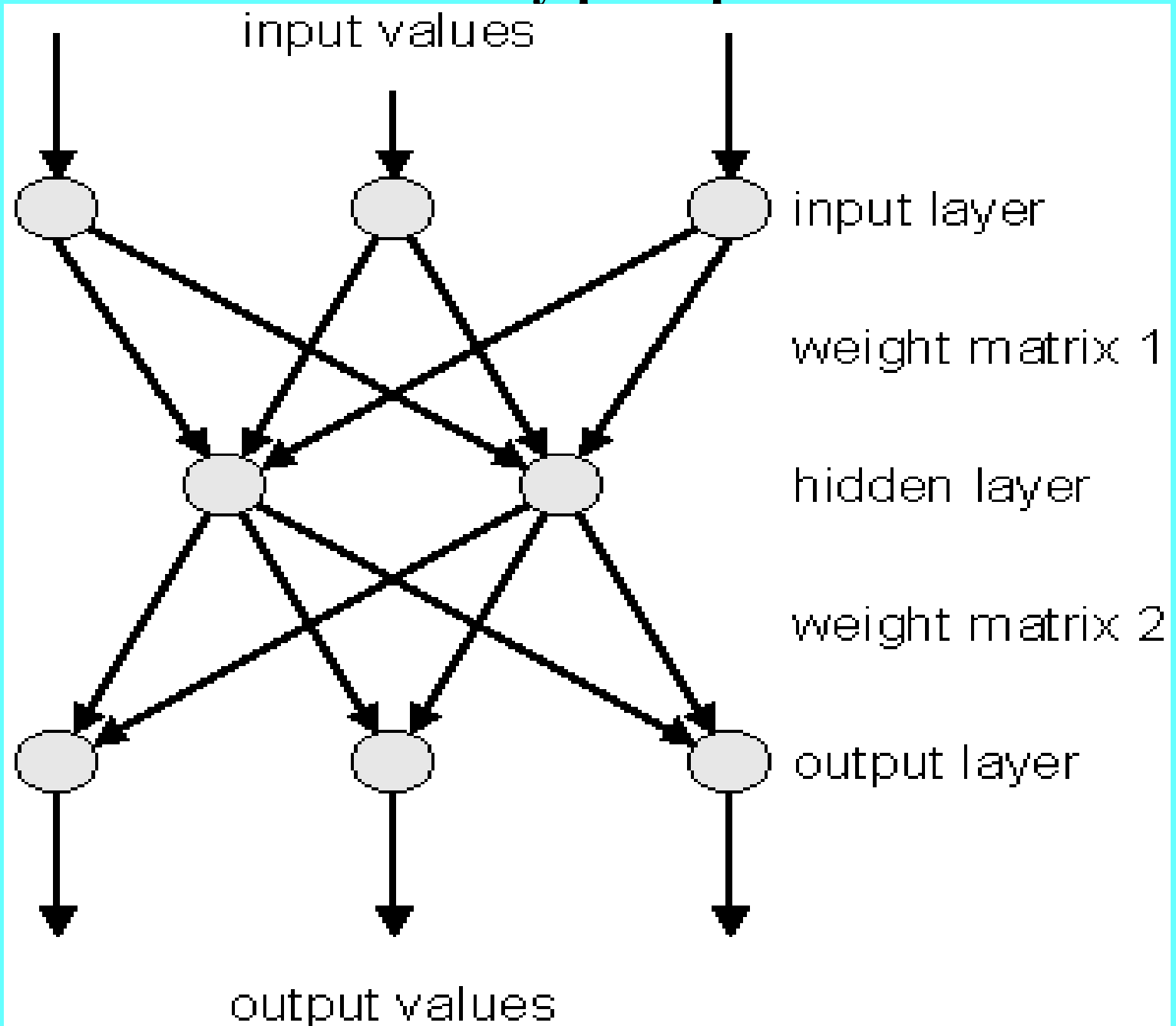
# Wybrane ANN

- **Perceptron**
- **Wielowarstwowy perceptron**
- **Sieci Hopfielda**
- **Mapa cech Kohonena (Kohonen Feature Map)**

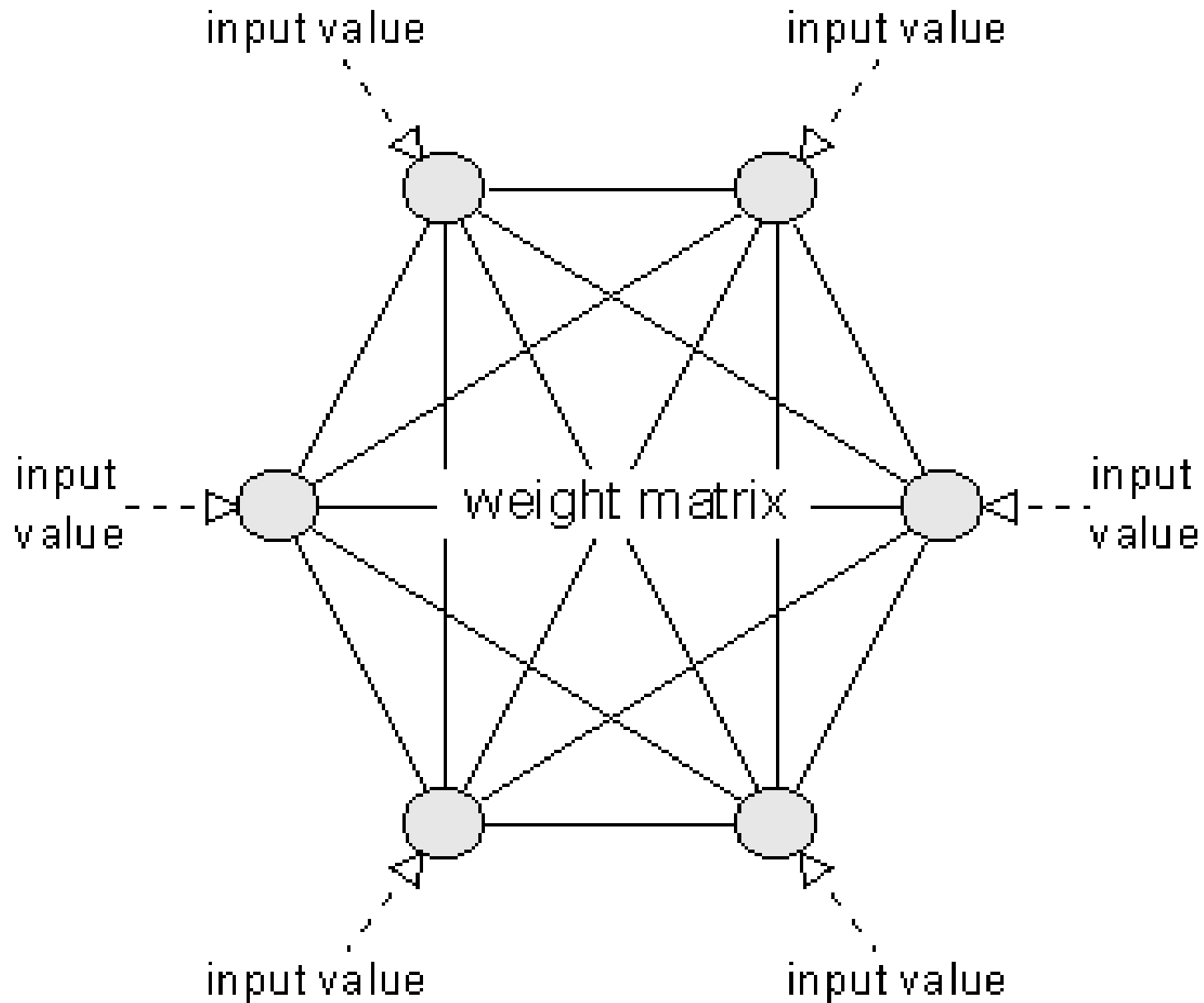
# Perceptron



# Wielowarstwowy perceptron

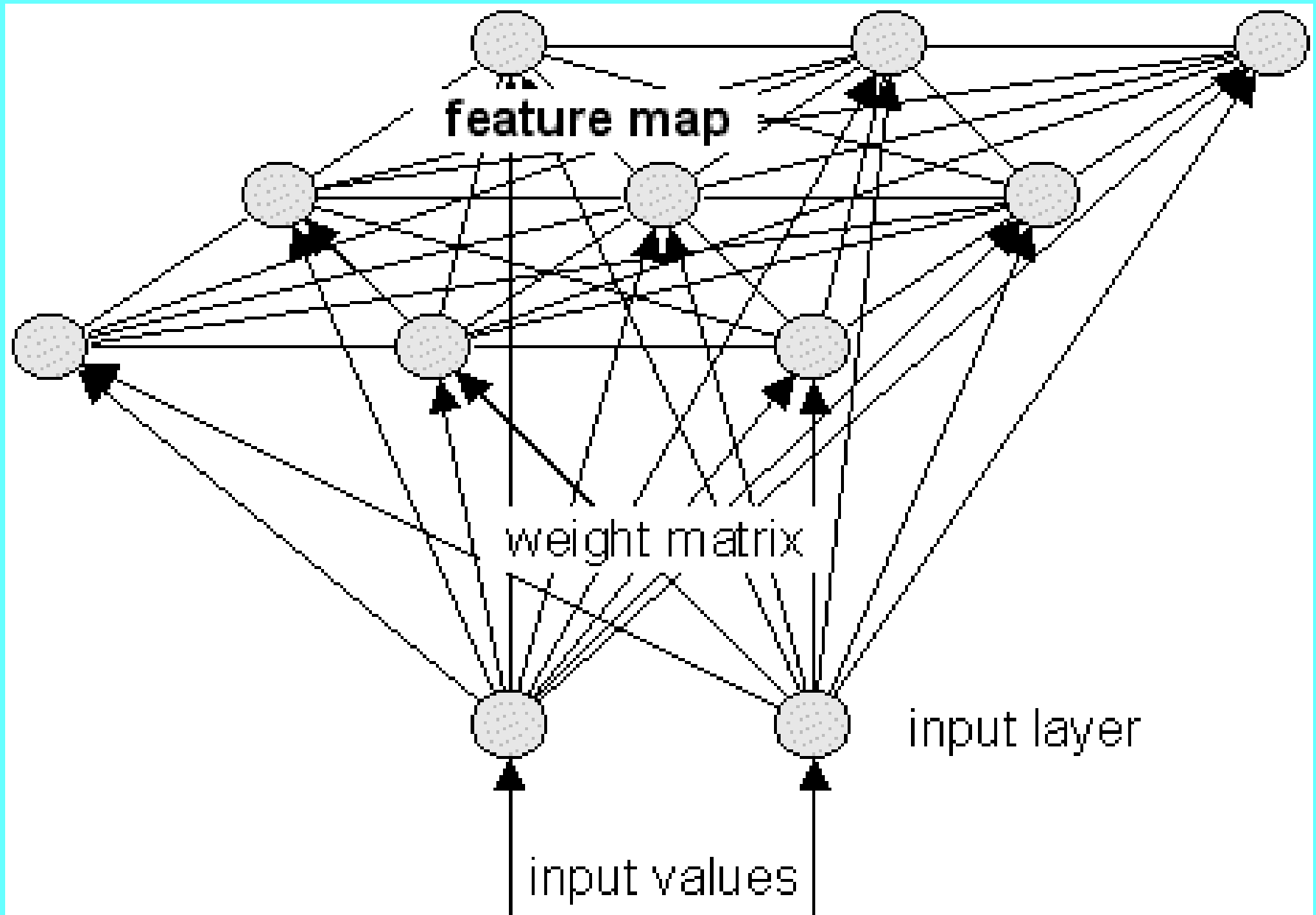


# Sieć Hopfielda





# Mapa cech Kohonena



## **Obszary zastosowań**

- **kojarzenie wzorców**
- **klasyfikacja wzorców**
- **wykrywanie regularności, trendów**
- **przetwarzanie wzorców**
- **rozpoznanie mowy**
- **optymalizacja**
- **sterowanie robotami**
- **przetwarzanie niedokładnej i niekompletnej informacji**
- **zapewnienie jakości**
- **prognoza giełdowa**
- **symulacje**

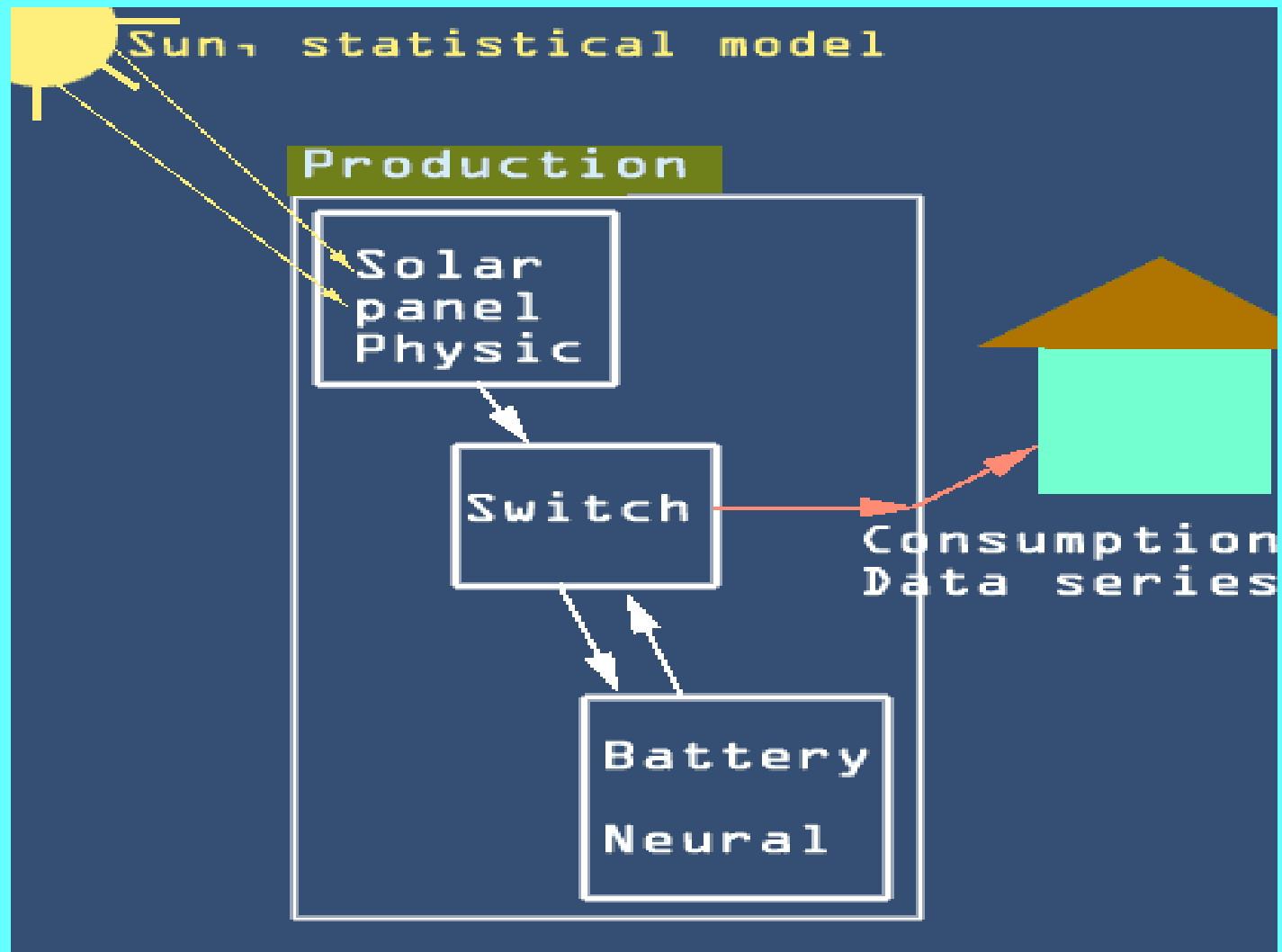
# Ograniczenia ANN

- **Problemy z symulacją współbieżności w ANN**
- **Niewyjaśniony brak stabilności w pewnych sytuacjach**

# Stosowanie ANN

- **Równoczesna symulacja ANN i innego systemu po to, aby uniknąć błędów spowodowanych przez ANN**
- **ANN jako podsystem globalnego modelu w wypadku, gdy występują trudności i niezrozumienie w modelowaniu jakiegoś zjawiska**
- **Adaptacyjne modele, które „potrafią się uczyć”, na podstawie analizy błędów; taki model może być zdolny do uwzględnienia sytuacji, której wcześniej nie rozważano**

# System energii słonecznej



Modele panelu słonecznego, promieniowania słonecznego i zużycia energii są dobrze znane

Baterie słoneczne z ANN działają wydajniej; ANN jako podsystem