

Marcin Klimek*

SIECI HOPFIELDA DLA PROBLEMU KOMIWOJAŻERA

W artykule opisano koncepcję sieci neuronowych typu Hopfielda do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych na przykładzie problemu komiwojażera TSP (Traveling Salesman Problem). Zaimplementowano trzy algorytmy rozwiązujące TSP przy użyciu sieci Hopfielda. Wydajność tych algorytmów zbadano za pomocą eksperymentów, których wyniki są przedstawione w tym artykule. Na ich podstawie można stwierdzić, że sieci Hopfielda nie są dobrym narzędziem do rozwiązywania problemu komiwojażera.

Słowa kluczowe: sieci neuronowe, sieć Hopfielda, problem komiwojażera

HOPFIELD NETWORKS FOR TRAVELING SALESMAN PROBLEM

In article is described an idea Hopfield neural network for solving combinatorial optimization problems, specifically for the Traveling Salesman Problem (TSP). It was implemented three algorithms for solving TSP with Hopfield nets. The performance of these algorithms was examined in simulation study. Results of experiments are described in this work. According to these results, the conclusion is that the Hopfield nets are not applicable for solving TSP.

Keywords: neural networks, Hopfield net, traveling salesman problem

1. WPROWADZENIE

Sieci neuronowe ze sprzężeniami zwrotnymi są wykorzystywane do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych. W artykule zostały przedstawione wyniki zastosowania sieci typu Hopfielda do rozwiązywania problemu komiwojażera.

Problem TSP był stosowany jako pierwotna ilustracja efektywności działania sieci Hopfielda [1] i do dziś jest standardowym problemem testowym dla różnych narzędzi optymalizacyjnych. Zaimplementowano i zbadano efektywność trzech różnych algorytmów rozwiązujących zadanie optymalizacyjne komiwojażera przy wykorzystaniu sieci Hopfielda.

2. OPIS PROBLEMU KOMIWOJAŻERA (TSP)

Problem komiwojażera jest jednym z najbardziej klasycznych problemów optymalizacyjnych. „Komiwojażer” to podróżnik, który musi odwiedzić określoną liczbę miast i wrócić do miasta, z którego wyruszył. Problem komiwojażera sprowadza się do znalezienia takiej trasy, aby przebyty dystans był jak najmniejszy.

* Instytut Informatyki PWSZ Biała Podlaska, doktorant Wydziału Zarządzania AGH w Krakowie

W niniejszym artykule został opracowany najbardziej rozpowszechniony wariant problemu TSP [1–2], w którym każde dwa miasta są połączone drogą o określonej długości (graf pełny, symetryczny, odległości euklidesowe). Problem TSP można wtedy zapisać jako problem optymalizacyjny z ograniczeniami (reprezentacja ta jest użyta przy tworzeniu funkcji energetycznej dla sieci Hopfielda).

Szukane jest minimum funkcji *DROGA*:

$$DROGA = \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n \sum_{i=1}^n d_{xy} \cdot v_{xi} \cdot v_{y,i+1} \quad (1)$$

przy ograniczeniach:

- trasa zaczyna się i kończy w tym samym mieście:

$$(v_{y,n+1} \equiv v_{y1}) \quad (2)$$

- trasa przechodzi dokładnie raz przez każde z pozostałych miast:

$$\sum_{x=1}^n v_{xi} = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n v_{xi} = 1 \quad x = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$v_{xi} \in \{0,1\} \quad x, i = 1, \dots, n \quad (5)$$

gdzie:

- d_{xy} – długość drogi (odległość) między miastami x i y ,
- $v_{xi} = 1$ – miasto x jest i -tym miastem na drodze komiwojażera,
- $v_{xi} = 0$ – miasto x nie jest odwiedzane jako i -te w kolejności.

Szukanie rozwiązań to właściwie przeszukiwanie permutacji zbioru miast $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$. Rozwiązanie problemu komiwojażera to znalezienie takiej permutacji ze zbioru wszystkich permutacji zbioru N -elementowego, dla której wartość funkcji *DROGA* jest minimalna. Przeszukiwanie wyczerpujące jest jednak bardzo czasochłonne i dla problemów TSP złożonych już z kilkudziesięciu miast nie jest możliwe do zastosowania.

Stosując nazewnictwo zaczerpnięte z teorii grafów, problem komiwojażera polega na znalezieniu cyklu Hamiltona (tj. cyklu przechodzącego przez każdy wierzchołek dokładnie jeden raz) o minimalnym koszcie całkowitym w nieorientowanym grafie pełnym o danej symetrycznej macierzy wag krawędzi tego grafu. Wiadomo, że dowolny graf pełny posiada co najmniej jeden cykl Hamiltona. Ponieważ graf ma skończoną liczbę wierzchołków, to w zbiorze cykli Hamiltona istnieje taki cykl (niekoniecznie jeden), który posiada minimalną

sumę wag krawędzi. Z tego wynika, że analizowany wariant problemu TSP jest zawsze rozwiązywalny.

W praktyce jednak jedyną metodą dającą gwarancję uzyskania rozwiązania optymalnego jest wygenerowanie wszystkich permutacji zbioru miast, policzenie długości drogi odpowiadającej każdemu z układów i wybranie najkrótszej z nich (przeszukiwanie wyczerpujące). Przy odpowiednio dużym wymiarze problemu (przy dużej liczbie miast) podejście polegające na przeglądaniu wszystkich możliwości jest nie do przyjęcia ze względu na zbyt długi czas osiągnięcia rozwiązania. Problem komiwojażera należy bowiem do klasy problemów NP. Oznacza to, że zapewnienie uzyskania rozwiązania optymalnego wymaga nakładów czasowych, które wraz ze wzrostem wymiaru problemu rosną szybciej niż wielomian dowolnego, skończonego stopnia względem n .

Problemowi komiwojażera – z uwagi na jego istotne znaczenie praktyczne – poświęcono bardzo wiele uwagi, próbując rozwiązać go zarówno metodami klasycznymi, jak i metodami sztucznej inteligencji (heurystyki, sieci neuronowe, algorytmy genetyczne).

3. KONCEPCJA SIECI HOPFIELDA

Sieć Hopfielda jest siecią rekurencyjną (ze sprzężeniem zwrotnym) [1, 3–5]. Potencjały wyjściowe neuronów podawane są poprzez połączenia zwrotne ponownie jako wejścia sieci. Proces ten jest kontynuowany do momentu spełnienia warunku zatrzymania procesu. Do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych stosuje się model ciągły (z ciągłą funkcją aktywacji).

Model ciągły sieci Hopfielda może być zapisany w postaci:

$$\frac{du_i}{dt} = \sum_{j \neq i} w_{ij} v_j + I_i - \frac{u_i}{\tau} \quad (6)$$

$$v_i = g(u_i)$$

gdzie:

- u_i – potencjał wejściowy (potencjał wewnętrzny) neuronu i ,
- v_i – potencjał wyjściowy (potencjał zewnętrzny) neuronu i ,
- g – funkcja aktywacji neuronu (najczęściej używana sigmoida),
- I_i – wymuszenie zewnętrzne.
- τ – stała czasowa neuronu (najczęściej przyjmuje się $\tau = 1$)

Funkcja E energii w sieci Hopfielda jest opisana przy użyciu funkcji Lapunova:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} v_i v_j w_{ij} - \sum_i v_i I_i \quad (7)$$

Warto zauważyć, że:

$$\frac{du_i}{dt} = -\frac{E}{dv_i} - \frac{u_i}{\tau} \quad (8)$$

Wzór (8) jest szczególnie istotny przy przekształcaniu funkcji energii w problemie TSP. Wszelkie modyfikacje w funkcji energii znajdują odzwierciedlenie w funkcjonowaniu sieci Hopfielda.

Schemat algorytmu z modelem ciągłym sieci Hopfielda przedstawiono poniżej [6]:

1. Ustalenie wartości początkowych.
2. W każdej iteracji:
 - a) ustalenie kolejności modyfikacji neuronów,
 - b) na każdym neuronie obliczenia:

$$\begin{aligned}\frac{du_i}{dt} &= -\frac{E}{dv_i} - \frac{u_i}{\tau} \\ u_i^{t+1} &= u_i^t + \Delta t \left(\frac{du_i}{dt} \right) = u_i^t + \Delta \left(-\frac{E}{dv_i} - \frac{u_i}{\tau} \right) \\ v_i^{t+1} &= f(u_i^{t+1})\end{aligned}\tag{9}$$

3. Sprawdzenie poprawności i jakości rozwiązania.

4. PROBLEMY OPTYMALIZACYJNE W SIECIACH HOPFIELDA

Podstawowe podejście do problemów optymalizacji polega na sprowadzeniu zadania do zagadnienia minimalizacji funkcji energetycznej opisującej pewną sieć rekurencyjną traktowaną jako swoisty układ minimalizujący.

Problem polega na odpowiednim przejściu od zadania minimalizacji funkcji celu dla postawionego problemu optymalizacyjnego (z uwzględnieniem istniejących ograniczeń) do zagadnienia minimalizacji funkcji energetycznej sieci.

Konieczne jest rozwiązanie następujących problemów:

- sposobu reprezentacji problemu przy użyciu sieci neuronowej, aby na podstawie jej stanu końcowego (wartości sygnałów wyjściowych elementów sieci) możliwe było określenie rozwiązania problemu optymalizacyjnego;
- takiego określenie funkcji energetycznej, aby jej minimum odpowiadało optymalnemu rozwiązaniu problemu optymalizacyjnego;
- określenia struktury, wag połączeń oraz wielkości pobudzeń zewnętrznych;
- określenia równań dynamiki poszczególnych elementów, aby zapewnić zmniejszanie się wartości funkcji energetycznej;
- określenia wartości początkowych poszczególnych elementów.

W typowych problemach optymalizacji kombinatorycznej funkcję energetyczną najczęściej wybiera się w postaci:

$$E = \sum_i A_i \cdot F_{ogr_i} + B \cdot F_{celu} \quad (10)$$

gdzie:

A_i, B – dodatnie parametry,

F_{ogr_i} – funkcja gwarantująca spełnienie i -tego ograniczenia,

$\sum_i A_i \cdot F_{ogr_i}$ – element funkcji energetycznej maksymalizujący stopień spełnienia wszystkich ograniczeń,

F_{celu} – właściwa funkcja celu: jej minimalizacja powinna gwarantować rozwiązanie problemu optymalizacyjnego (oczywiście muszą być spełnione wszystkie ograniczenia).

5. SIECI HOPFIELDA DLA PROBLEMU KOMIWOJAŻERA

W klasycznym podejściu Hopfielda i Tanka [1] dla problemu komiwojażera złożonego z n miast stosuje się sieć złożoną z $N = n^2$ neuronów, których potencjały wyjściowe v_{ij} mogą przyjmować wartości ze zbioru $\{0, 1\}$ i tworzą macierz kwadratową V o rozmiarze $n \times n$. Każdy z elementów v_{ij} macierzy V reprezentuje aktualną drogę: $v_{ij} = 1$ oznacza, że miasto o numerze i jest odwiedzane jako j -te w kolejności (kodowanie *miasto-kolejność* [1]). Warunkiem koniecznym i wystarczającym by, macierz V reprezentowała poprawne syntaktycznie rozwiązanie problemu komiwojażera, jest wystąpienie w każdym wierszu i w każdej kolumnie dokładnie jednego elementu o wartości równej 1.

W celu skonstruowania sieci Hopfielda dla problemu TSP tworzymy funkcję energii, zapewniającą minimalizację długości drogi przy równoczesnym zapewnieniu poprawności syntaktycznej rozwiązań.

Przy zastosowaniu wzoru (7) i wzoru (8) ustalamy wartość $\frac{du_i}{dt}$, którą wykorzystujemy do obliczania potencjałów wejściowych neuronów dla kolejnych iteracji:

$$u_i = u_i + \Delta t \cdot \frac{du_i}{dt} \quad (11)$$

gdzie Δt – krok czasowy metody.

5.1. METODA KLASYCZNA

Hopfield i Tank [1] zaproponowali następującą funkcję energii dla problemu komiwojażera:

$$E = \frac{A}{2} \cdot \sum_x \sum_i \sum_{j \neq i} v_{xi} \cdot v_{xj} + \frac{B}{2} \cdot \sum_x \sum_i \sum_{y \neq x} v_{xi} \cdot v_{yi} + \frac{C}{2} \cdot \left(\sum_x \sum_i v_{xi} - n - \delta \right)^2 + \frac{D}{2} \sum_x \sum_{y \neq x} \sum_i d_{xy} \cdot v_{xi} \cdot (v_{y,i+1} + v_{y,i-1}) \quad (12)$$

gdzie:

A, B, C, D – dodatnie stałe,
 δ – stała (najczęściej $\delta = 0$).

Indeksy i, j (dotyczące pozycji w marszrucie) oraz indeksy x, y (dotyczące numeru miasta) liczone są modulo n .

Spełnienie warunków minimalizacji pierwszych trzech składników funkcji energii determinuje poprawność syntaktyczną rozwiązania: w każdym wierszu i w każdej kolumnie będzie dokładnie jeden element równy 1. Minimalizacja ostatniego składnika związanego z optymalizacją długości drogi przyczynia się często do generowania rozwiązań niepoprawnych syntaktycznie.

W celu skorzystania ze wzoru (11) obliczamy wartość $\frac{du_{xi}}{dt}$ za pomocą wzoru (8) – energia E określona przez wzór (12):

$$\begin{aligned} \frac{du_{xi}}{dt} &= -\frac{u_{xi}}{\tau} - \frac{E}{dv_{xi}} = \\ &= -\frac{u_{xi}}{\tau} - A \sum_{j \neq i} v_{xj} - B \sum_{y \neq x} v_{yi} - C \left(\sum_y \sum_j v_{yj} - n - \delta \right) - D \sum_y d_{xy} \cdot (v_{y,i+1} + v_{y,i-1}) \end{aligned} \quad (13)$$

5.2. ZMODYFIKOWANA METODA KLASYCZNA

Sieć Hopfielda z funkcją energii zaproponowaną przez Hopfielda i Tanka (12) ma tendencję do uśredniania potencjałów wyjściowych v_i , co w konsekwencji powoduje generowanie rozwiązań niepoprawnych składniowo. W celu usunięcia tych problemów zastosowano następującą funkcję energetyczną [1]:

$$E = \frac{A}{2} \sum_x \left(\sum_i v_{xi} - 1 \right)^2 + \frac{B}{2} \sum_i \left(\sum_x v_{xi} - 1 \right)^2 + \frac{C}{2} \sum_x \sum_i v_{xi} \cdot (v_{xi} - 1) + \frac{D}{2} \sum_x \sum_{y \neq x} \sum_i d_{xy} v_{xi} (v_{y,i+1} + v_{y,i-1}) \quad (14)$$

Potencjał wejściowy dowolnego neuronu reprezentującego miasto x i pozycję i :

$$\begin{aligned} \frac{du_{xi}}{dt} &= -\frac{u_{xi}}{\tau} - \frac{E}{dv_{xi}} = \\ &= -\frac{u_{xi}}{\tau} - A \left(\sum_j v_{xj} - 1 \right) - B \left(\sum_y v_{yi} - 1 \right) - C \left(v_{xi} - \frac{1}{2} \right) - D \sum_y d_{xy} \cdot (v_{y,i+1} + v_{y,i-1}) \end{aligned} \quad (15)$$

5.3. METODA ANSARI I HOU

Ansari i Hou [6] w celu zapewnienia większej liczby rozwiązań poprawnych syntaktycznie zmodyfikowali sposób obliczania $\frac{du_{xi}}{dt}$. Zaproponowali następujący sposób obliczania wag:

$$\begin{aligned} w_{xi,yj} &= -A\delta_{xy}(1-\delta_{ij}) - A\delta_{ij}(1-\delta_{xy}) - 2B\delta_{xy}\delta_{ij} - C + \\ &+ \frac{2(AN-A+B)}{N^2} - Dd_{xy}(\delta_{j,i+1} + \delta_{j,i-1}) \end{aligned} \quad (16)$$

Zastosowali również uproszczoną metodę obliczania $\frac{du_{xi}}{dt}$ (por. wzór (16)):

$$\begin{aligned} \frac{du_{xi}}{dt} &= \sum_{j \neq i} w_{xi,yj} v_{yj} + I_i = \{\text{korzystając ze wzoru (16)}\} \\ &= -A \left(\sum_j v_{xj} + \sum_y v_{yi} \right) - 2B \cdot v_{xi} - \sum_y \sum_j v_{yj} \cdot \left(C - \frac{A}{n} + \frac{A}{n^2} - \frac{B}{n^2} \right) - \\ &\quad - D \sum_y d_{xy} \cdot (v_{y,i+1} + v_{y,i-1}) + CN \end{aligned} \quad (17)$$

W metodzie tej nie ma bezpośredniego odwzorowania ograniczeń w funkcję energetyczną tylko narzucenie sposobu aktualizacji potencjałów wewnętrznych.

5.4. PARAMETRY WOLNE I USTALENIE ICH WARTOŚCI

Ilość parametrów wolnych (potencjały wejściowe $u_{initial}$, współczynniki $A, B, C, D, \delta, \alpha$) jest bardzo duża i ich ustalenie nie jest rzeczą prostą [1]. Duża wrażliwość modelu na dobór parametrów i brak efektywnych metod ich doboru w ogólnym przypadku to największe niedogodności przy wykorzystaniu sieci Hopfielda dla problemu komiwojażera.

Do ustalenia początkowych potencjałów wejściowych neuronów $u_{initial}$, Hopfield i Tank zaproponowali następujące rozwiązanie (to rozwiązanie jest również użyte w artykule):

$$\forall_{1 \leq x, i \leq n} \quad v_{xi}(0) \approx \frac{1}{n} \quad (18)$$

Takie wartości potencjałów wyjściowych w stanie początkowym nie faworyzowałyby żadnego z neuronów. Dodatkowo suma aktywacji wszystkich neuronów na starcie działania sieci byłaby w przybliżeniu równa sumie aktywacji neuronów dla rozwiązania poprawnego syntaktycznie.

Zachodzą równości $v_{xi} = g(u_{xi})$, $u_{xi} = g^{-1}(v_{xi})$. Spełnienie warunku (18) będzie możliwe, gdy potencjały wejściowe neuronów będą miały następujące wartości:

$$\forall_{1 \leq x, i \leq n} u_{xi}(0) = g^{-1}(v_{xi}(0)) = g^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) = -\frac{\ln(n-1)}{2\alpha} \quad (19)$$

dla sigmoidalnej funkcji aktywacji g :

$$g(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha \cdot x}}, \quad \alpha > 0 \quad (20)$$

funkcja odwrotna:

$$g^{-1}(x) = \frac{-\ln\left(\frac{1}{x} - 1\right)}{\alpha} \quad (21)$$

Gdy wszystkie neurony posiadają te same potencjały wejściowe (21) na starcie działania sieci, sieć jest całkowicie symetryczna i nie jest w stanie wyjść ze swojego stanu początkowego. W celu destabilizacji tej równowagi dynamicznej sieci Hopfield i Tank wprowadzili małe zaburzenia losowe δ_{xi} potencjałów wejściowych u_{xi} :

$$\forall_{1 \leq x, i \leq n} u_{xi}(0) = -\frac{\ln(n-1)}{2\alpha} + \delta_{xi} \quad (22)$$

gdzie

$$\delta_{xi} = \text{random}\left(-\frac{1}{10\alpha}, \frac{1}{10\alpha}\right) \quad \text{czyli} \quad -\frac{1}{10\alpha} \leq \delta_{xi} \leq \frac{1}{10\alpha} \quad (23)$$

Parametr α należy tak dobierać, by potencjały wyjściowe przyjmowały wartości zbliżone do wartości binarnych. Na dobór pozostałych parametrów nie ma ściśle określonych reguł.

6. WYNIKI EKSPERYMENTÓW

W kolejnych eksperymentach testowano różne konfiguracje parametrów dla metod rozwiązujących problem podróżyującego akwizytora przy wykorzystaniu sieci Hopfielda. Doświadczenia przeprowadzano dla trzech zbiorów (Z1, Z2, Z3) miast zawierających po 10

miast. Celem tych badań było znalezienie najlepszej sieci Hopfielda i ustalenie optymalnych wartości parametrów.

Parametry przeprowadzonych doświadczeń, dobrane podczas wcześniejszych eksperymentów, przyjmują następujące wartości:

- $\delta = 5$,
- funkcja aktywacji: tangens hiperboliczny $\alpha = 50$,
- maksymalna liczba iteracji 500 (dla 500 iteracji potencjały wyjściowe się stabilizują),
- krok czasowy 0,005.

Neurony w każdym kroku czasowym modyfikuje się w losowej kolejności. Dla każdego zestawu stałych A, B, C, D wykonano 100 eksperymentów (prób). Ustalano parametry A, B, C i modyfikowano parametr D aż do uzyskania najlepszych wyników. Aby mieć pewność, że otrzymana droga jest najkrótsza, porównawczo przeprowadzano przeszukiwanie wyczerpujące.

Rezultaty uzyskane przez sieci Hopfielda nie są zadowalające. Porównując wyniki otrzymane dla poszczególnych metod (tab. 1–3), można stwierdzić, że najlepszą z metod okazała się metoda Ansari i Hou (tab. 3). Mimo stosunkowo niskiej liczby poprawnych składniowo rozwiązań, doprowadziła w jednej konfiguracji parametrów ($D = 500$) do otrzymania kilku optymalnych dróg (dla zbiorów Z2 i Z3). W przypadku zbioru Z1 znaleziona droga jest rozwiązaniem suboptymalnym (1% błędu). Trzeba jednak podkreślić, że rezultaty nie są do końca zadowalające. Konieczne byłoby przeprowadzenie dla każdego przypadku większej liczby eksperymentów (np. 1000), żeby otrzymać optymalne rozwiązanie z większym prawdopodobieństwem.

Nie ma reguł ustalania najlepszych parametrów, a dochodzenie do optymalnej konfiguracji sieci jest bardzo czasochłonne.

Tabela 1

Wyniki dla metody klasycznej A = 500, B = 500, C = 100

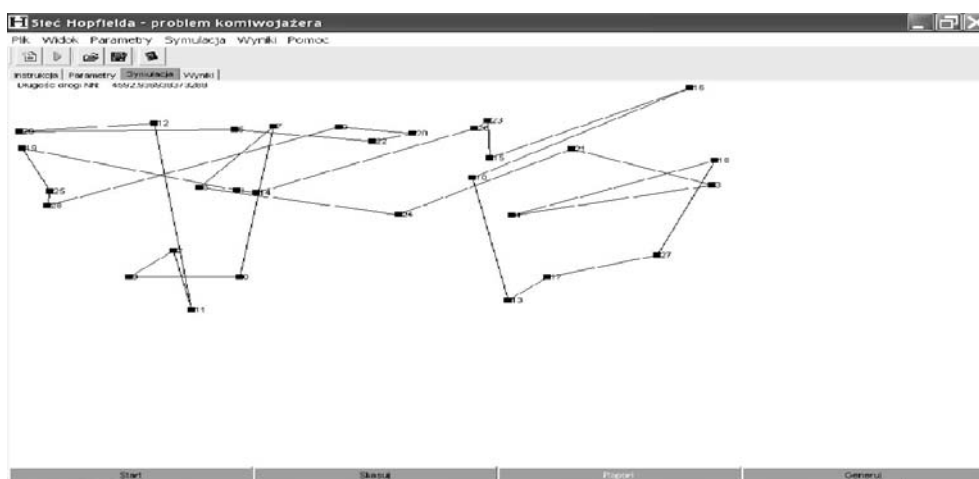
Konfiguracja parametrów	Liczba rozwiązań poprawnych syntaktycznie [%]			Liczba rozwiązań optymalnych			Błąd w stosunku do rozwiązania optymalnego [%]		
	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
$D = 300$	92	88	90	0	0	0	17,2	12,9	11,1
$D = 350$	79	69	74	0	0	0	15,1	13,4	12,8
$D = 400$	66	62	69	0	0	0	4,8	2,9	2,1
$D = 450$	42	45	56	0	0	0	7,1	7,2	7,1
$D = 500$	30	34	27	0	0	0	10,2	15,4	6,1

Tabela 2Wyniki dla zmodyfikowanej metody klasycznej $A = 500$, $B = 400$, $C = 200$

Konfiguracja parametrów	Liczba rozwiązań poprawnych syntaktycznie [%]			Liczba rozwiązań optymalnych			Błąd w stosunku do rozwiązania optymalnego [%]		
	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
$D = 250$	96	98	95	0	0	0	27,2	22,9	21,1
$D = 300$	86	92	94	0	0	0	24,8	21,9	18,1
$D = 350$	74	68	72	0	0	0	11,5	12,4	14,2
$D = 400$	65	59	62	0	0	0	21,4	8,9	12,9
$D = 450$	25	28	22	0	0	0	25,6	23,6	24,9

Tabela 3Wyniki dla metody Ansari i Hou $A = 500$, $B = 300$, $C = 200$

Konfiguracja parametrów	Liczba rozwiązań poprawnych syntaktycznie [%]			Liczba rozwiązań optymalnych			Błąd w stosunku do rozwiązania optymalnego [%]		
	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
$D = 400$	82	80	81	0	0	0	5,1	2,5	2,5
$D = 450$	64	62	59	0	0	0	1,2	1,0	3,1
$D = 500$	62	56	45	0	4	3	1,0	0	0
$D = 550$	36	36	38	0	4	0	6,1	0	9,1
$D = 600$	16	27	21	3	0	0	0	7,0	9,2
$D = 650$	17	17	15	4	0	0	0	4,6	11,6

**Rys. 1.** Droga komiwojażera dla 30 miast (sieć Hopfielda)

Rozwiązanie siecią Hopfielda problemu TSP dla 30 miast znacznie odbiega od optymalnego i jest rozwiązaniem słabym, co można stwierdzić, patrząc na wizualizację drogi (rys. 1).

7. PODSUMOWANIE

Tematem pracy było opisanie koncepcji sieci Hopfielda dla problemu komiwojażera. Właściwym celem artykułu było zbadanie efektywności sieci neuronowych w tym zastosowaniu. Do przeprowadzenia testów zbudowano aplikację, w której zaimplementowano trzy metody symulujące działanie sieci Hopfielda.

Wyniki badań pozwoliły na stwierdzenie, że rozwiązywanie problemu TSP przy wykorzystaniu sieci Hopfielda jest mało efektywne. Spośród metod wykorzystujących sieci Hopfielda najlepsze rezultaty przy rozwiązywaniu zadania komiwojażera daje metoda Ansari i Hou. Metoda klasyczna i zmodyfikowana metoda klasyczna są znacznie mniej efektywne. Skuteczność najefektywniejszej sieci (dobrej doświadczalnie) dla 10 miast nie jest zadowalająca (ok. 2% optymalnych rozwiązań). Poza tym złożoność obliczeniowa rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem liczby miast a wyniki uzyskiwane dla problemu TSP rzędu kilkudziesięciu miast są bardzo odbiegające od wyników uzyskiwanych przez np. algorytmy genetyczne.

Poza słabą skutecznością działania sieci Hopfielda nie są zbyt wygodne w stosowaniu. Nie ma reguł ustalania najlepszych parametrów (liczba parametrów jest znaczna) i dochodzenie do optymalnej konfiguracji sieci jest bardzo czasochłonne. Sama implementacja sieci Hopfielda też jest nie trywialna (dużo skomplikowanych wzorów).

Mimo dość słabych wyników uzyskanych w eksperymentach należy stwierdzić, że sam pomysł rozwiązywania problemu TSP za pomocą sieci neuronowych jest bardzo ciekawy. Sieci Hopfielda mogą znaleźć zastosowanie w wielu problemach optymalizacyjnych.

Literatura

- [1] Mańdziuk J.: *Sieci neuronowe typu Hopfielda*. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT 2000
- [2] Michalewicz Z.: *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programowanie ewolucyjne*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1996
- [3] Tadeusiewicz R.: *Sieci neuronowe*. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza RM 1993
- [4] Grabska-Chrzastowska J., Macnar M.: *Odtwarzanie zniekształconych znaków przy pomocy sieci Hopfielda*. Słok k/Bełchatowa, Seminarium „Przetwarzanie i analiza sygnałów w systemach wizji i sterowania”, 2002
- [5] Osowski S.: *Sieci neuronowe*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1994
- [6] Ansari N., Hou E.: *Computational Intelligence for Optimization*. Boston, Kluwer Academic Publishers 1997