

Bogusław Filipowicz*, Joanna Kwiecień*

Zastosowanie sztucznych systemów immunologicznych do rozwiązania problemu *flow shop*

1. Wprowadzenie

Problemy szeregowania (harmonogramowania) zadań są działem programowania dyskretnego, w którym główną rolę odgrywają zagadnienia kombinatoryczne na skończonym zbiorze elementów. Ustalanie harmonogramów polega na znalezieniu optymalnej kolejności wykonywania zadań na maszynach przy zachowaniu pewnych ograniczeń, przy czym każde zadanie jest skończoną sekwencją operacji uporządkowaną według pewnych ograniczeń kolejnościowych. Każda operacja wykonywana jest w ciągu określonego interwału czasu wyłącznie przez jedną konkretną maszynę ze skończonego zbioru maszyn [1].

Istnieje kilka modeli szeregowania zadań, np.:

- *job shop* (dla każdego zadania mamy dane przyporządkowanie maszyn operacjom oraz wymaganą kolejność),
- *flow shop* (operacje każdego zadania są wykonywane przez maszyny w tej samej kolejności wyznaczonej przez numery maszyn),
- *open shop* (dowolna kolejność wykonania operacji w obrębie zadań).

W literaturze jest opisanych wiele sposobów rozwiązywania problemów szeregowania zadań. Wśród metod, które pozwalają na rozwiązanie tego typu problemów, wymienić należy m.in. [3–5]:

- tabu search [2], symulowane wyżarzanie,
- algorytmy genetyczne.

2. Problem *flow shop*

Problem szeregowania *flow shop* jest jednym z najbardziej znanych problemów w dziedzinie szeregowania procesów. Polega on na ustaleniu kolejności wykonywania N różnych zadań złożonych ze skończonej sekwencji operacji na M maszynach tak, aby zmi-

* Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie; filip@ia.agh.edu.pl; kwiecień@ia.agh.edu.pl

nimalizować m.in. długość uszeregowania (tj. czas od momentu rozpoczęcia obsługi pierwszego zadania na pierwszej maszynie do momentu zakończenia obsługi ostatniego zadania na ostatniej maszynie – *makespan*), czas przestoju maszyn. Czas wykonywania zadań na poszczególnych maszynach (czas każdej operacji) jest znany. Założono również, że nie są możliwe przerwania przetwarzania zadań na maszynach (rozpoczęta operacja nie może zostać przerwana). Każda maszyna może przetwarzać równocześnie tylko jedno zadanie. Żadne dwie operacje należące do tego samego zadania nie mogą być przetwarzane równocześnie. Przetwarzanie zadania na każdej maszynie zostaje rozpoczęte natychmiast po dostarczeniu do danej maszyny (jeżeli ta maszyna jest wolna). Zadanie kończy się wraz z wykonaniem swej najpóźniejszej operacji [3–4].

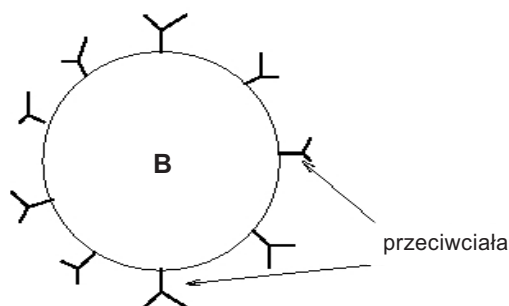
W pracy długość uszeregowania przyjęto jako kryterium kosztu harmonogramu, przy jednakowych wagach (priorytetach) poszczególnych zadań. Położenie zadania w gotowym harmonogramie określamy m.in. przez moment zakończenia zadania C_i . Długość uszeregowania C_{max} jest najpóźniejszym momentem zakończenia zadania j ($j = 1, \dots, N$).

3. Zagadnienie sztucznych systemów immunologicznych

W ostatnich latach wśród metod sztucznej inteligencji coraz większą popularnością cieszą się sztuczne systemy immunologiczne (AIS). Natura układu immunologicznego (m.in. selekcja klonalna, zdolność uczenia, pamięć immunologiczna, odporność i samoorganizacja) czyni sztuczne systemy immunologiczne przydatne do rozwiązywania problemów szeregowania zadań.

Obiektami systemu immunologicznego są:

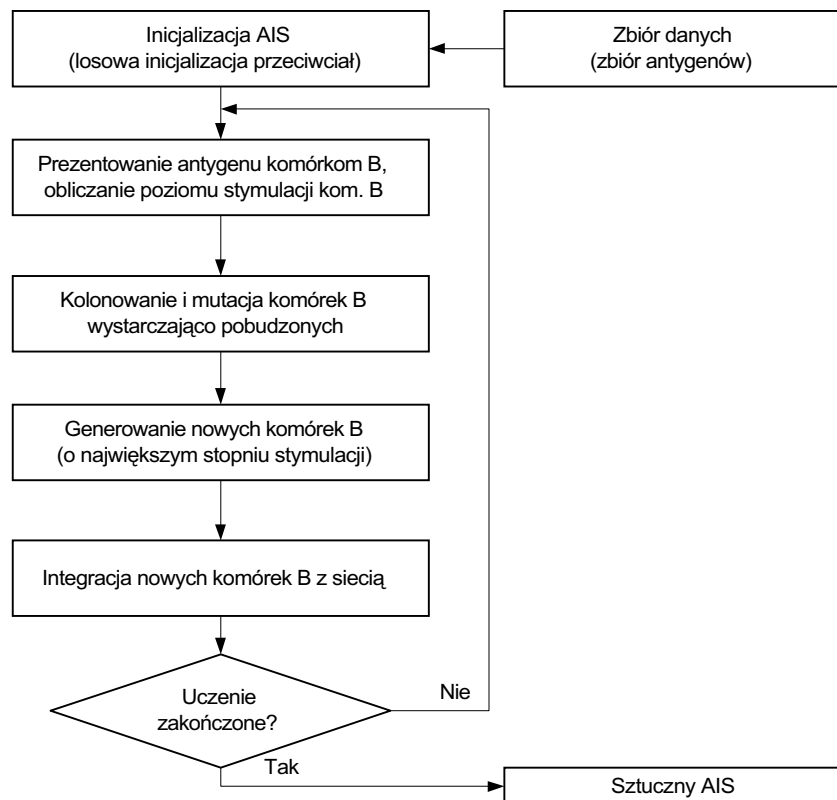
- limfocyty typu T, wspomagające i wykorzystywane m.in. w detekcji anomalii,
- limfocyty typu B (rys. 1), przeciwciała wykorzystywane w systemach analizy danych, zdolne do rozpoznawania antygenów i reagowania na nich.



Rys. 1. Schemat limfocytu typu B

Limfocyty reagując na określony antygen, wychwytyują istotne właściwości antygeny. Pobudzone limfocyty typu B są intensywnie klonowane w celu wychwycenia wszystkich antygenów (selekcja klonalna). Klony podlegają mutacji, dzięki której możliwe jest rów-

niez wychwylenie antygenów podobnych. W AIS przeciwciała tworzą wzorce danych klasyfikowanych (antygenów). Przeciwciała pogrupowane na zasadzie podobieństwa tworzą sieć idiotypową modyfikowaną wraz z rozpoznawaniem kolejnych antygenów (rys. 2). W przypadku braku przeciwciał odpowiadających antygenowi produkowana jest nowa komórka na wzór antygeny, która zostaje wprowadzona w sąsiedztwo przeciwciał do niego podobnych [6].



Rys. 2. Tworzenie sztucznych systemów immunologicznych

4. Zastosowanie AIS do zagadnienia *flow shop*

W niniejszej pracy rozwiązaniem problemu *flow shop* są permutacje zbioru zadań, odpowiadające kolejności ich wykonywania. Możliwe harmonogramy można przedstawić w postaci ciągów całkowitoliczbowych o długości równej liczbie zadań. Antygenem jest konkretne zadanie kombinatoryczne, natomiast przeciwciała stanowią rozwiązanie problemu *flow shop*. Dzięki ewolucji przeciwciał opartej na selekcji klonalnej i dojrzewaniu swoistości (mutacji i eliminacji najgorszych przeciwciał) AIS mogą znaleźć rozwiązanie, które

pozwała zminimalizować długość uszeregowania. Algorytm sztucznych systemów immunologicznych do rozwiązania szeregowania zadań można przedstawić następująco:

utwórz populację początkową przeciwciał
dla każdej generacji:
 oblicz długość uszeregowania przeciwciał (makespan);
 wyznacz prawdopodobieństwo selekcji (współczynnik klonowania);
 klonuj:
 dla każdego klonu
 mutacja „odwrotna” (odwrócenie sekwencji pomiędzy 2 wybranymi
 pozycjami wraz z tymi pozycjami);
 oblicz makespan;
 jeśli makespan zmutowanego lepszy od makespan klonu → zastąp;
 w przeciwnym wypadku → przełącz klon do następnej generacji;
 wyeliminuj część przeciwciał o najdłuższym makespan;
 utwórz losowo brakujące przeciwciała;

Dla każdego przeciwciała obliczana jest funkcja dopasowania F_s jako różnica maksymalnej długości uszeregowania C_{MAX} i długości uszeregowania danego przeciwciała C_s . Prawdopodobieństwo selekcji danego przeciwciała p_s wyliczane jest ze wzoru

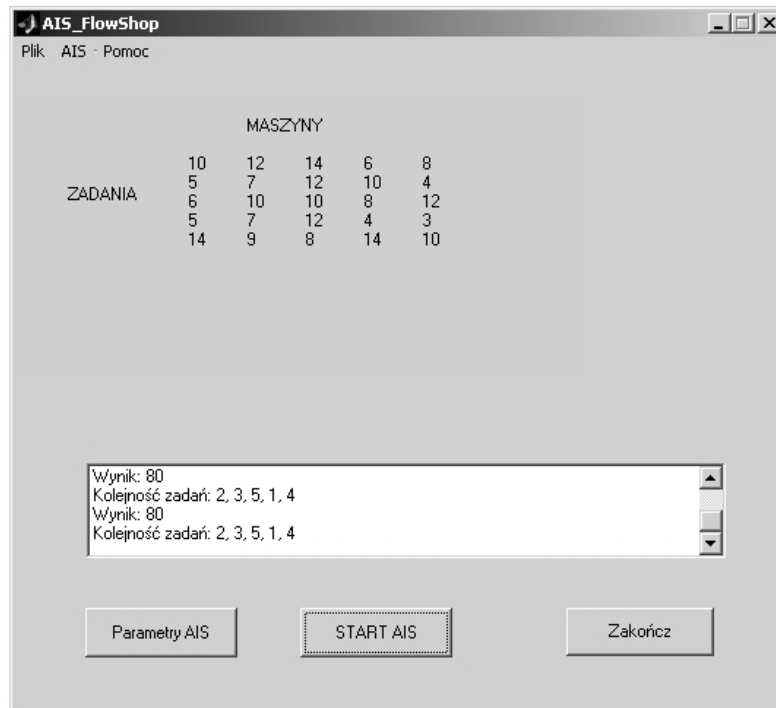
$$p_s = \frac{F_s}{\sum_{s=1}^K F_s} \quad (1)$$

W prezentowanym algorytmie liczba przeciwciał w populacji jest ustalona, generowany zbiór klonów ma taki sam rozmiar jak populacja przeciwciał. Wartość dopasowania każdego harmonogramu (przeciwciała) wynika z odpowiadającej mu długości uszeregowania. Mutacji podlegają wszystkie klony.

5. Implementacja

Program służący do rozwiązania zagadnienia szeregowania zadań *flow shop* za pomocą sztucznych systemów immunologicznych zaimplementowano w środowisku Matlab 6.5. W programie istnieje możliwość wyboru liczby maszyn, liczby zadań oraz parametrów sztucznych systemów immunologicznych takich, jak: liczba generacji, rozmiar populacji oraz współczynnik eliminacji (procent eliminacji przeciwciał o najgorszej długości uszeregowania).

Rozpatrzono kilka przypadków dla różnej liczby zadań i maszyn. Przykładowe rozwiązanie problemu *flow shop* o parametrach zadań umieszczonych w [1] pokazano na rysunku 3. Przy testowaniu programu wykorzystano m.in. dane umieszczone w [7]. Maksymalne liczby zadań i maszyn w testowanych problemach wynosiły 20. Wykonano po 10 testów dla każdego przypadku.



Rys. 3. Wygląd okna programu z zadanymi parametrami zadań

Skuteczność sztucznych systemów immunologicznych zastosowanych do rozwiązania problemów *flow shop* o różnym stopniu złożoności pokazano w tabeli 1. W przypadku najbardziej złożonych testowanych problemów sztuczne systemy immunologiczne potrafiły w 7 przypadkach znaleźć prawidłowe rozwiązanie.

Tabela 1
Procent prawidłowych rozwiązań w zależności od złożoności problemu
(n – liczba zadań, m – liczba maszyn)

Problem	% prawidłowych rozwiązań
$n3\ m3$	100
$n5\ m5$	100
$n10\ m5$	100
$n15\ m5$	90
$n20\ m5$	90
$n20\ m10$	80
$n20\ m20$	70

6. Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono rozwiązanie problemu szeregowania zadań *flow shop* za pomocą jednej z metod sztucznej inteligencji – AIS, która w ostatnich latach nabiera szczególnego znaczenia w rozwiązaniu problemów optymalizacji kombinatorycznej. Proponowany algorytm sztucznych systemów immunologicznych opiera się na selekcji klonalnej, mutacji sterowanej i eliminacji części przeciwciał. Problemy szeregowania zadań prezentowane w literaturze zostały przetestowane w programie. Wyniki uzyskane sztucznymi systemami immunologicznymi są satysfakcjonujące. Oczywiście, by dobrze ocenić skuteczność tej metody w rozwiązywaniu problemów *flow shop*, należałoby porównać wyniki tej metody z wynikami skuteczności innych metod. Analizując sztuczne systemy immunologiczne, można zauważyć pewne istotne cechy odróżniające te metody od algorytmów genetycznych, takie jak: możliwość douczania tych systemów poprzez prezentowanie nowych danych i zapamiętywanie wyuczonych wzorców, o zmianach „gatunkowej różnorodności” w systemach immunologicznych decyduje selekcja klonalna i mutacja (w AG selekcja, krzyżowanie i mutacja).

Literatura

- [1] Filipowicz B.: *Badania operacyjne. Wybrane metody obliczeniowe i algorytmy. Część I.* Kraków, F.H.U. Poldex 1999
- [2] Grabowski J., Pempera J.: *Sequencing of jobs in some production system.* Europ. J. Opnl Res. 2000, 125, 535
- [3] Murata T., Ishibuchi H., Tanaka H.: *Genetic algorithms for flowshop scheduling problems.* Computers ind. Engng. 1996, 30, 1061
- [4] Chen Ch.L., Vempati V.S., Aljaber N.: *An application of genetic algorithms for flow shop problems.* Europ. J. Opnl Res. 1995, 80, 389
- [5] Croce F.D., Tadeis R., Volta G.: *A genetic algorithm for the job shop problem.* Computers Ops. Res. 1995, 22, 15
- [6] Wierzchoń S.T.: *Sztuczne systemy immunologiczne. Teoria i zastosowania.* Warszawa, Akademia Oficyna Wydawnicza EXIT 2001
- [7] Taillard E.: <http://ina.eivd.ch/collaborateurs/etd/problemes.dir/ordonnancement.dir/ordonnancement.html>