

Bogna Mrówczyńska

Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katedra Logistyki i Transportu Przemysłowego

ZASTOSOWANIE SZTUCZNEGO SYSTEMU IMMUNOLOGICZNEGO DO ROZWIĄZANIA WIELOKRYTERIALNEGO PROBLEMU DYSTRYBUCJI DOSTAW

Rękopis dostarczono: m-c rok

Streszczenie: W artykule przedstawiono rozwiązanie problemu znanego jako zadanie komiwojażera. Prezentowany problem polega na minimalizacji kosztów dystrybucji dostaw do wielu odbiorców obsługiwanych przez flotę pojazdów. W rozwiązaniu tego zadania bierze się pod uwagę całkowitą długość drogi, czas przejazdu i wielkości ładunku. W obliczeniach zastosowano dwie metody rozwiązania. W pierwszej z nich wyznaczono trasy wszystkich pojazdów dostawczych biorących udział w bieżącej dostawie, uwzględniając przy tym kryteria na minimum długości drogi i czasu przejazdu oraz obsługi przy ograniczeniu na ładowność pojazdów. W drugiej z metod przeprowadzono najpierw klasteryzację punktów dostaw ze względu na minimum długości drogi i ograniczenie ładowności pojazdu przeznaczanego do obsługi danego klastra dla zadanej liczby i ładowności pojazdów. Następnie dla każdego pojazdu wyznaczono najkrótszą i najszybszą drogę przez wszystkie punkty klastra, do którego był przydzielony. We wszystkich opisanych tu obliczeniach zastosowano algorytmy sztucznych systemów immunologicznych. Problemy wielokryterialne zostały rozwiązane metodą kryteriów ważonych i optymalności Pareto.

Słowa kluczowe: sztuczny system immunologiczny, zadanie komiwojażera, problem wielokryterialny

1. WPROWADZENIE

Od kilkunastu lat w Polsce działają sieci sklepów typu „convenience store”, tzn. sieci małych sklepów samoobsługowych dostarczających swoim klientom produkty codziennego użytku, głównie spożywcze. Sklepy działają przy osiedlach mieszkaniowych, blisko swoich klientów. Są też sieci, które działają przy całonocnych stacjach benzynowych. W Polsce najpopularniejsze są sklepy sieci ABC i Żabka.

Istotną częścią działalności takich sieci są dostawy towaru z hurtowni. Małe sklepy osiedlowe nie mają z reguły miejsca na duży magazyn przy sklepie. Dlatego niezwykle ważne są regularne dostawy towaru. Sprawnie zorganizowany transport jest gwarancją ciągłej sprzedaży produktów. Okres od zamówienia towaru, który się kończy, do jego dostawy powinien być minimalny. W artykule przedstawiono metodę projektowania tras

samochodów dostawczych do sklepów jednej z sieci typu „convenience” na Górnym Śląsku. Do rozwiązania zastosowano sztuczne systemy immunologiczne.

2. PROBLEM DOSTAW DO SIECI SKLEPÓW

2.1. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

W artykule rozwiązanie problemu przedstawiono na przykładzie dostaw wykonanych jednego dnia do 50 sklepów w Katowicach z magazynu mieszczącego się na terenach przemysłowych w Tychach. Z magazynu do każdego punktu należało dostarczyć od 1 do 3 palet towaru, zgodnie z zamówieniem sklepu. Transport towaru odbywał się samochodem chłodnią DAF LF45.220 furgon. Palety były układane w samochodzie w jednej warstwie, po dwie obok siebie, dłuższym bokiem do kabiny kierowcy. W opisywanym pojeździe mieściło się 20 palet o wymiarach 1200 x 800 x 1900 mm³. Kolejność załadunku była odwrotna do kolejności przyjazdu do punktów odbioru.

2.2. MODEL MATEMATYCZNY

W sensie matematycznym zadanie wyznaczenia najkrótszej trasy przez zadaną liczbę punktów sprowadza się do problemu komiwojażera. Kierowca pojazdu wyjeżdża z magazynu, odwiedza wszystkich odbiorców z przydzielonej mu listy i wraca do magazynu po kolejną partię towaru lub zjeżdża do bazy. Kolejność odwiedzania poszczególnych klientów jest dowolna, jednak celem kierowcy jest przejazd taką trasą, aby była ona jak najkrótsza i jak najszybsza. Średni czas obsługi klienta w punkcie odbioru wynosi od 11 do 23 min. W tabeli 1 zestawiono listę punktów, do których w rozważanym dniu ma być dostarczony towar. Dla każdego punktu podano liczbę dostarczanych palet i oczekiwany czas obsługi.

Każda trasa samochodu dostawczego zaczyna się z magazynu, który ma przypisany numer 0. Punkty odbioru towaru zostały ponumerowane od 1 do n. Trasę można opisać przy pomocy ciągu:

$$\{0, k_1, k_2, \dots, k_n, 0\} \quad (1)$$

przy czym $\{k_1, k_2, \dots, k_n\} \in S_n$, gdzie S_n – grupa permutacji zbioru $\{1, 2, \dots, n\}$.

Długość proponowanej trasy przejazdu s przez n punktów odbiorczych, z magazynem w węźle 0, można wyliczyć następująco:

$$s = (s_{0k_1} + \sum_{i=1}^{n-1} s_{k_i k_{i+1}} + s_{k_n 0}) \quad (3)$$

gdzie s_{ij} – odległość od węzła i do j [m], a czas przejazdu t :

$$t = (t_{0k_1} + \sum_{i=1}^{n-1} t_{k_i k_{i+1}} + t_{k_n 0}) \quad (4)$$

gdzie t_{ij} – czas przejazdu od węzła i do j [min] po drodze s_{ij} .

Kryterium ważne na minimum długości drogi i czasu przejazdu oraz obsługi z uwzględnieniem ograniczenia na ładowność pojazdów w postaci funkcji kary można wyrazić następująco:

$$F_c = w_0 \frac{s}{s_{\max}} + w_1 \frac{t}{t_{\max}} + w_2 \sum_{j=1}^m (\hat{V}_j - V_j) \quad (5)$$

gdzie funkcje s i t są opisane odpowiednio wzorami (3) i (4), a pozostałe:

$$s_{\max} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n s_{ij} \quad (6)$$

$$t_{\max} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n t_{ij} \quad (7)$$

oraz

\hat{V}_j – dopuszczalna ładowność j -tego pojazdu,

V_j – wielkość ładunku przypadająca na j -ty pojazd,

m – liczba pojazdów,

w_0, w_1, w_2 – współczynniki wagowe, $w_0 \geq 0, w_1 \geq 0,$

$$\hat{V}_j > V_j \Rightarrow w_2 > 0 \quad (8)$$

$$\hat{V}_j < V_j \Rightarrow w_2 = 0 \quad (9)$$

Dla $w_1 = 0$ kryterium (5) zastosowano przy klasteryzacji punktów dostaw. Po podziale na klastry każdy pojazd jest przyporządkowany do swojego klastra, gdzie już nie ma niebezpieczeństwa przeładowania pojazdu. Wtedy do wyznaczenia optymalnej trasy po klastrze przyjmuje się kryterium ważne (5) z $w_2 = 0$. W tym przypadku dla porównania przeprowadzono również minimalizację ze względu na drogę i czas stosując kryterium optymalności Pareto, w którym poszukuje się par rozwiązań (s^*, t^*) tworzących front Pareto, czyli takich, że

$$\forall (s, t) \in \mathbb{R}^2 s^* \leq s, t^* \leq t \wedge (\exists s' \in \mathbb{R}: s^* < s' \vee \exists t' \in \mathbb{R}: t^* < t') \quad (10)$$

W metodzie wyznaczania tras dla samochodów dostawczych bez podziału na klastry przyjęto również kryterium ważne (5) z $w_2 = 0$. Ograniczenie nie dopuszczające przekroczenia ładowności samochodu nie jest wyrażone przez funkcję kary. Problem

rozwiązany jest w samym algorytmie optymalizacji, gdzie w każdym kroku wyznaczania trasy sprawdza się, czy dany pojazd nie zostanie przeładowany. Jeśli tak, podstawia się kolejny pojazd. Dodatkową zaletą takiego rozwiązania problemu ograniczeń ładowności jest, że minimalizacji podlega również ilość samochodów uczestniczących w dostawie.

3.METODY ROZWIĄZANIA

Dla małej liczby odwiedzanych punktów rozwiązanie można otrzymać metodami ścisłymi. Można do nich zaliczyć m.in. metody programowania całkowitoliczbowego, metody podziału i ograniczeń [3]. Do rozwiązania większych zadań często stosuje się metody heurystyczne oraz metody sztucznej inteligencji. Z tych ostatnich najbardziej popularne to algorytmy genetyczne i ewolucyjne [5, 6], symulowane wyżarzanie, metoda najbliższego sąsiada [4], sztuczne systemy immunologiczne [2, 7] i inne. Te metody nie gwarantują co prawda uzyskania rozwiązań ścisłych, ale nawet jeśli wyniki są przybliżone, to otrzymanywane rezultaty na pewno są lepsze od rozwiązań intuicyjnych.

Problem dostaw opisane w artykule rozwiązano stosując sztuczny system immunologiczny [1]. Metoda ta należy do metod sztucznej inteligencji. Naśladuje działanie naturalnego systemu odpornościowego organizmu ssaka [8].

3.1. NATURALNY SYSTEM OBRONNY SSAKA

Naturalny system immunologiczny reaguje na ataki na organizm obcych ciał zwanych antygenami. Organizm jest wyposażony w różne mechanizmy obronne. Do takich należy skóra, która, gdy nie jest uszkodzona, chroni ciało przed wnikaniem antygenów do środka ciała. Na skórze działają też chemicznie: pot, enzymy. Podobną rolę pełnią łyzy, śluz (np. na śluzówkach nosa), ślina.

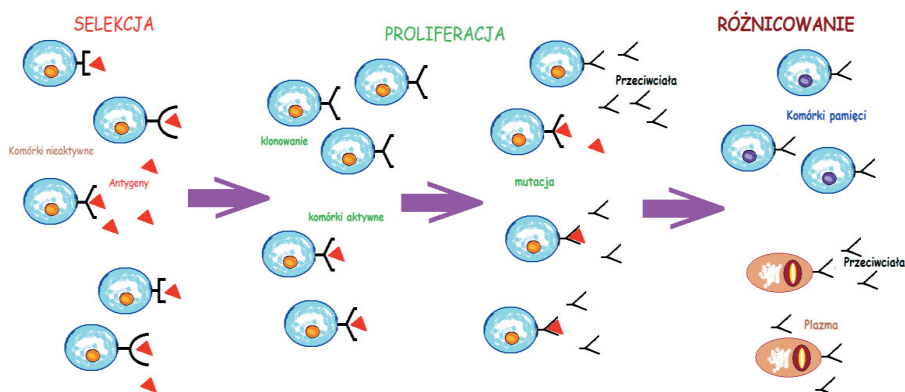
Gdy te bariery zawiodą, obronę przejmuje system immunologiczny. Jest skomplikowany, ale niezwykle skuteczny. Jest cały czas w gotowości do obrony. Potrafi rozpoznawać ciała obce od własnych komórek organizmu. Jeżeli w chwili ataku przez antygeny organizm się już zetknął z nimi, reakcja następuje natychmiast. Jeżeli nie, rozpoczyna się proces selekcji klonalnej (rys.1). Limfocyty, które rozpoznają antygen, są klonowane w dużej ilości. Po zwalczeniu antygenów następuje supresja. Liczba przeciwciał skierowanych przeciwko konkretnemu antygenowi zmniejsza się znacznie. W organizmie pozostają nieliczne przeciwciała swobodnie poruszające się w krwioobiegu i komórki pamięci.

3.2. SZTUCZNE SYSTEMY IMMUNOLOGICZNE

Prezentowane w pracy obliczenia z użyciem sztucznego systemu immunologicznego wykorzystują paradygmat selekcji klonalnej. W modelu zastosowanym do rozwiązania przedstawionych problemów, przeciwciałem jest ciąg liczb (2) reprezentujących kolejność przebycia wierzchołków grafu, który reprezentuje sieć dróg i punktów odbioru [8]. Miarą dopasowania jest funkcja równa odwrotności funkcji celu (5):

$$f = \frac{1}{F_c} \quad (11)$$

Dopasowanie będzie miało tym wyższą wartość, im wartość funkcji celu F_c będzie mniejsza.



Rys.1. Selekcja klonalna

Algorytm selekcji klonalnej w sztucznym systemie immunologicznym ma następujący przebieg:

1. Inicjalizacja

Ciągi liczb (1) są generowane losowo, a następnie wylicza się ich dopasowanie (11).

2. Proliferacja

Najlepiej dopasowane rozwiązania są wielokrotnie klonowane.

3. Mutacja

Część klonów poddanych jest mutacji.

4. Supresja

Liczbę limfocytów z przeciwciałami zmniejsza się do liczebności podstawowej populacji. Odbywa się to przez selekcję limfocytów z najbardziej podobnymi do siebie przeciwciałami, co wpływa na różnorodność rozwiązań.

Kroki 2 - 4 są powtarzane, aż do uzyskania oczekiwanych efektów.

4. OBLICZENIA NUMERYCZNE

W artykule przeprowadzono obliczenia dwoma metodami. W obu rozwiązaniach uzyskano metodami sztucznego systemu immunologicznego. W pierwszej metodzie obliczenia wykonano w sposób bezpośredni, tzn. wyznaczono trasy wszystkich samochodów dostawczych, które miały dostarczyć towar do klientów z zaplanowanej listy. W obliczeniach uwzględniono kryteria na minimum długości drogi i czasu przejazdu oraz ograniczenia na ładowność pojazdów. Zastosowano wzór (10) i (5). W drugiej z metod przeprowadzono najpierw klasteryzację punktów dostaw ze względu na minimum długości drogi i nie przekraczanie dopuszczalnej ładowności pojazdu. Podział odbył się na zadaną ilość klastrow, odpowiadająca liczbie samochodów potrzebnych do przewozu towaru.

Po uzyskaniu podziału punktów odbioru na klastry, w których było nie więcej towaru, niż mógł przewieźć przypisany do klastra samochód, optymalizacja odbywa się już tylko ze względu na minimum drogi i czasu. W obliczeniach, w których użyto kryterium ważone, do wzoru (11) podstawia się wzór (5) z $w_2 = 0$. Następnie dla każdego pojazdu wyznaczono najkrótszą i najszybszą drogę przez wszystkie punkty klastra, do którego był przydzielony. Dla porównania wykonano również obliczenia, w których zastosowano kryterium optymalności Pareto. Przy tym kryterium przeprowadza się osobno optymalizację ze względu na drogę i na czas, a zbiór pary (s^*, t^*) spełniające warunek (10) tworzy front Pareto rozwiązań postawionego problemu. Szczegóły zastosowanego tu algorytmu przedstawiono w [7].

4.1. DANE DO OBLICZEŃ

Obliczenia przeprowadzono przy założeniach podanych już w rozdziale 2.1. Wielkość dostarczanego do każdego punktu towaru i czas rozładunku przedstawiono w tabelicy 1.

Tabela 1

Punkty odbioru, wielkość dostawy i czas obsługi

Nr punktu odbioru	Czas rozładunku	Liczba palet	Nr punktu odbioru	Czas rozładunku	Liczba palet	Nr punktu odbioru	Czas rozładunku	Liczba palet	Nr punktu odbioru	Czas rozładunku	Liczba palet	Nr punktu odbioru	Czas rozładunku	Liczba palet
1	15	2	11	15	2	21	15	2	31	15	2	41	11	1
2	15	2	12	11	1	22	15	2	32	15	2	42	15	2
3	19	3	13	15	2	23	15	2	33	15	2	43	15	2
4	15	2	14	15	2	24	15	2	34	15	2	44	15	2
5	15	2	15	15	2	25	15	2	35	15	2	45	15	2
6	15	2	16	15	2	26	15	2	36	19	3	46	23	4
7	15	2	17	15	2	27	19	3	37	15	2	47	23	4
8	23	4	18	15	2	28	19	3	38	15	2	48	15	2
9	15	2	19	15	2	29	11	1	39	11	1	49	19	3
10	15	2	20	23	4	30	15	2	40	11	1	50	15	2

4.2. WYNIKI OBLICZEŃ

Tablica 2 zawiera wyniki obliczeń metodą bezpośrednią. Obliczenia przeprowadzono dla 6 pojazdów. Dla każdego z tych pojazdów wyznaczono trasę, wyliczono jej długość, policzono ilość dostarczanych palet z towarem, czas przejazdu, rozładowania palety i innych czynności związanych z dostawą. Wszystkie obliczenia przeprowadzono kilkakrotnie. W tabeli znajdują się najlepsze spośród uzyskanych wyników. Czas uzyskania wyników nie przekraczał kilku minut.

Tablica 2

Wyniki minimalizacja długości drogi i czasu pracy pojazdu metodą bezpośrednią

Kryteria optymalizacji	Nr pojazdu	Wielkość dostawy [palety]	Czas przejazdu i obsługi [min]	Długość drogi [km]	Kolejność obsługi punktów odbioru
Minimalizacja długości drogi i czasu pracy pojazdu przy ograniczeniu na ładowność metodą kryteriów ważonych	1	20	237	55,64	34 19 50 37 21 26 38 41 2 11 29
	2	20	233	61,39	10 48 47 39 30 40 45 6 32 5
	3	20	211	63,00	27 18 8 1 14 12 13 46
	4	19	207	54,65	7 35 43 28 20 17 24 33
	5	20	221	53,85	15 49 31 4 42 23 36 16 25
	6	9	134	54,80	44 9 3 22
Podsumowanie		108	1243	343,33	

Tablica 3 zawiera wyniki klasteryzacji punktów odbioru. Podział na klastry przeprowadzono ze względu na minimalne odległości drogowe punktów w klastrach, przy ograniczeniu dostarczanego towaru do ładowności przydzielonego do klastra samochodu. Czasów przejazdów pomiędzy punktami nie uwzględnia się.

Tablica 3

Wyniki klasteryzacji punktów odbioru

Nr centroidy	Wielkość dostawy [palety]	Długość drogi [km]	Czas obsługi [min]	Lokalne indeksy punktów odbioru w klastrach											Numeracja globalna		
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11	
4	11	11,9	79	0	4	15	31	42	49								
13	20	18,9	157	0	1	6	9	12	13	14	32	38	41	44	45		
17	20	6,0	143	0	10	17	22	24	26	33	34	47	48				
18	19	11,0	125	0	7	8	18	27	35	43	46						
20	18	3,9	121	0	3	19	20	21	28	37	50						
29	20	16,0	157	0	2	5	11	16	23	25	29	30	36	39	40		
Σ =	108	67,7	782														

W tablicy 3 są m.in. podane lokalne indeksy przypisane numerom węzłów, gdyż wyniki kolejnych obliczeń (tablica 4) podają opis tras w numeracji lokalnej.

Trasy pojazdów obsługujących poszczególne klastry wyznaczano w odrębnych obliczeniach dla każdego klastra (tablica 4). Przeprowadzano minimalizację długości dróg oraz czasu dojazdu i rozładowania. Dla każdego klastra rozwiązywano to zadanie metodą kryteriów ważonych i z kryterium optymalności Pareto. W przypadku klastrów o centroidzie 4 i 13 uzyskano tylko jedno optymalne rozwiązanie. W pozostałych przypadkach front Pareto składał się z większej liczby rozwiązań, z których przedstawiono po dwa.

Tablica 4

Wyniki minimalizacja długości drogi i czasu pracy pojazdu w klastrach

	Nr centroidy	Wielkość dostawy [palety]	Długość drogi [km]	Czas przejazdu [min]	Czas obsługi [min]	Kolejność obsługi punktów odbioru	
Kryteria ważne	4	11	50,9	66	79	0 2 5 3 1 4 0	
	13	20	62,4	101	157	0 7 11 2 3 1 10 6 4 5 8 9 0	
	17	20	51,1	76	143	0 1 8 9 7 5 2 4 6 3 0	
	18	19	64,6	76	125	0 4 2 3 5 6 7 1 0	
	20	18	53,8	68	121	0 5 1 2 3 7 6 4 0	
	29	20	54,8	88	157	0 9 5 6 4 1 3 8 11 10 7 2 0	
	□ =	108	337,5	475	782		
	Czas obsługi i przejazdu [min]		=		1257	Kolejność obsługi punktów odbioru	
Kryterium optymalności Pareto	4	11	50,9	66	79	0 2 5 3 1 4 0	
	13	20	62,4	101	157	0 7 11 2 3 1 10 6 4 5 8 9 0	
	17	20	51,1	76	143	0 1 8 9 7 5 2 4 6 3 0	
	18	19	64,6	76	125	0 4 2 3 5 6 7 1 0	
	20	18	53,8	68	121	0 5 1 2 3 7 6 4 0	
	29	20	54,8	88	157	0 9 5 6 4 1 3 8 11 10 7 2 0	
	□ =	108	337,5	475	782		
		Czas obsługi i przejazdu [min]		=		1257,0	Kolejność obsługi punktów odbioru
	4	11	50,9	66	79	0 2 5 3 1 4 0	
	13	20	62,9	100	157	0 7 11 2 3 10 1 4 6 5 8 9 0	
	17	20	51,2	73	143	0 1 9 8 7 5 2 4 6 3 0	
	18	19	64,6	76	125	0 4 2 3 5 6 7 1 0	
	20	18	53,8	68	121	0 4 6 7 3 2 1 5 0	
29	20	54,9	86	157	0 9 5 6 4 1 3 8 10 11 7 2 0		
□ =	108	338,2	469,0	782			
	Czas obsługi i przejazdu [min]		=		1251,0		

W przypadku rozwiązania bezpośredniego łącznie samochody dostawcze pokonały trasę 343,33 km w łącznym czasie przejazdu i obsługi 20 godzin i 43 minut. Droga poszczególnych samochodów mieściła się w granicach od 53,85 km do 63 km, a czas przejazdu i obsługi od 1 godz. 14 min. do 3 godz. 57 min..

W przypadku obliczeń z klasteryzacją uzyskano takie same rozwiązania dla obu kryteriów obliczeń. I tak samochody dostawcze pokonały łącznie trasę 337,5 km w czasie przejazdu i obsługi 20 godzin i 57 minut. Droga poszczególnych samochodów mieściła się w granicach od 50,09 km do 64,6 km, a czas przejazdu i obsługi od 2 godz. 25 minut do 4 godz. 18 minut.

Jak widać wyniki obliczeń są bardzo podobne. Być może wynika to ze stosunkowo niewielkiej ilości punktów odbioru. Metoda z klasteryzacją daje nadzieje na skuteczne zastosowanie do rozwiązywania rzeczywiste dużych problemów marszrutyzacji. Z kolei metoda optymalności Pareto dostarcza cały zbiór optymalnych rozwiązań i pozwala w ostatecznym wyborze kierować się innymi, niemierzalnymi kryteriami.

Otrzymane rozwiązania nie są optymalne w ścisłe matematycznym sensie, ale wystarczająco bliskie optymalnych i satysfakcjonująco lepsze od intuicyjnych. Niewątpliwą zaletą tych metod jest szybkość uzyskania rozwiązania. Każde z przedstawionych tu rozwiązań zostało uzyskane w trakcie obliczeń trwających od kilku do kilkunastu minut.

5. WNIOSKI

- Opracowanie optymalnych tras pojazdów dostawczych uwzględniających długość drogi, czas przejazdu i obsługi klienta, wielkość dostarczanego ładunku i kolejność jego ułożenia w naczepie jest zadaniem złożonym i powinno być wspomagane narzędziem numerycznym.
- Metoda sztucznego systemu immunologicznego jest szybka i efektywna do rozwiązywania tak złożonych zadań marszrutyzacji.
- Zastosowanie sztucznych systemów immunologicznych do klasteryzacji punktów odbioru umożliwia rozwiązywanie dowolnie dużych problemów komiwojżera.
- Metodą bezpośrednią i z klasteryzacją uzyskano podobne wyniki.
- Zastosowanie kryterium optymalności Pareto pozwala na wybranie z otrzymanego frontu Pareto rozwiązań spełniających również inne, niż tylko zawarte w stosowanym kryterium warunki. Również subiektywne i niemierzalne.
- Osiągnięcie rozwiązań optymalnych lub bliskich optymalnym jest równoważne wyznaczeniu tras o najkrótszej odległości, najkrótszym czasie przejazdu i ładunku nie przekraczającym dopuszczalnej ładowności pojazdu.
- Dalsze prace nad zastosowaniem algorytmu do podobnych zadań przy różnych założeniach i ograniczeniach trwają

Bibliografia

1. Castro L.N., Zuben F.J. 1999. Artificial Immune Systems, Part I – Basic Theory and Applications, Technical Report, TR – DCA 01, School of Computing and Electrical Engineering, State University of Campinas, Brazil.
2. Cieśla M., Mrówczyńska B., Problem of Medicines Distribution on the Example of Pharmaceutical Wholesale, Graph-based modelling in engineering. Eds.: Stanisław Zawiaślak, Jacek Rysiński. Switzerland : Springer, 2017, s. 51-65, (Mechanisms and Machine Science ; vol. 42 2211-0984)
3. Karaoglana I., & Altiparmak F., & Karac I.,& Dengiz B. (2011). A branch and cut algorithm for the location-routing problem with simultaneous pickup and delivery, European Journal of Operational Research 211, 2, 318 – 322 Nazwisko I.: Tytuł publikacji. Wydawnictwo, Warszawa 2003.
4. Kytöjokka J. & Nuortio T. & Bräsya O. & Gendreau M. (2007). An efficient variable neighborhood search heuristic for very large scale vehicle routing problems. Computers & Operations Research 34 2743 – 2757

5. Michalewicz Z., Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Springer, 1996.
6. Aleksander Król, Piotr Nowakowski, Bogna Mrówczyńska: How to improve WEEE management? Novel approach in mobile collection with application of artificial intelligence. Waste Manage. 2016 vol.50, s.222-233, IF 3,829, PMNiSW 35
7. Mrówczyńska B.: Comparison of Pareto efficiency and weighted objectives method to solve the multi-criteria vehicle routing problem using the artificial immune system, 2016, Applied Computer Science, vol. 12, no. 4, pp. 78–87
8. Poteralski A.: Optymalizacja immunologiczna układów mechanicznych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.

THE USE OF ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEM TO SOLVE THE MULTIOBJECTIVE PROBLEM OF DISTRIBUTION OF SUPPLIES

Summary: In the paper the solution of the issue known as a traveling salesman problems (TSP) is presented. A minimizing of costs of distributing supplies to multiple recipients supported by a fleet of vehicles is considered. the total path length, the driving time and the volumes of cargo is taken into account in the solution of the task . An artificial immune system is used to solve it. This multi-criteria problem has been solved using objectives weighted method and Pareto efficiency. Results were compared.

Keywords: an artificial immune system, a travelling salesman problem, multi-criteria problem