

PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA ALGORYTMU MRÓWKOWEGO DO USPRAWNIENIA PROCESU DYSTRYBUCJI PRODUKTÓW SZYBKO PSUJĄCYCH

Transport towarów do klientów jest istotnym elementem działalności przedsiębiorstw produkcyjnych. Optymalnie zarządzana sieć dystrybucyjna oraz flota pojazdów to kluczowe czynniki pozwalające na znaczne obniżenie kosztów dostaw. Wyraźne widoczne efekty zmniejszenia kosztów transportu można uzyskać poprzez właściwe zaplanowanie trasy, m.in. kolejności obsługi poszczególnych odbiorców. Celem artykułu jest przedstawienie sposobu znalezienia rozwiązania pozwalającego na usprawnienie procesu dystrybucji produktów szybko psujących się do wielu odbiorców na przykładzie jednej z tras obsługiwanych przez przykładową firmę. W znalezieniu optymalnego rozwiązania wykorzystano narzędzia oparte na problemie optymalizacyjnym zwanym „problemem komiwojażera” (z ang. TSP – Travelling Salesman Problem). Opisano narzędzia ułatwiające lepsze zaplanowanie trasy dostaw do odbiorców przy wykorzystaniu jednego środka transportu. Przedstawiono algorytm pozwalający na optymalizację wykorzystania środka transportu przy jednoczesnym obniżeniu kosztów transportów oraz zwiększeniu efektywności pracy poprzez minimalizację czasu realizacji usługi transportowej.

WSTĘP

Branża FMCG (z ang. Fast-Moving Consumer Goods) charakteryzują się szybką rotacją produktów, regularnym spożyciem przez konsumentów w celu zaspokojenia codziennych potrzeb (produkty spożywcze, środki czystości, kosmetyki, papierosy, alkohole) [13,26]. Ze względu na konieczność zminimalizowania ryzyka opóźnień w transporcie artykułów spożywczych stosuje się najczęściej transport drogowy. Ten rodzaj transportu jest najbardziej elastyczny, funkcjonalny i łatwy w organizacji. Odpowiednia organizacja przewozów pozwala na dostosowanie floty oraz trasy przewozu tak, aby optymalnie wykorzystać zasoby przewoźnika [1,2,8,17,18,21,23,24,28]. Takich możliwości nie stwarza np. transport lotniczy, który jest szybszy, jednak wymaga wielu działań organizacyjnych, ani transport morski, gdyż jest zbyt czasochłonny. Również transport kolejowy jest rzadko wykorzystywany do przewozu żywności.

Stosunkowo niewielkie wartości produktów FMCG i silna konkurencja wymuszają na producentach niskie marże przy zachowaniu wysokiej jakości. Kluczowym elementem jest aktywne zarządzanie łańcuchem dostaw oraz nieustanne poszukiwanie nowych rozwiązań dostosowanych do potrzeb klientów. Przypadkiem szczególnie wymagającym jest transport świeżych soków niepasteryzowanych. Produkty te charakteryzują się krótkim terminem przydatności do spożycia (24 - 96 godzin), co wymusza codzienną dystrybucję. Kolejnym istotnym czynnikiem jest obowiązek przechowywania i transportu w obniżonej temperaturze. W celu zachowania najwyższej jakości produktów zakres temperatury przechowywania i przewozu to 2°C - 6°C. Wymaga to od przewoźników stosowania specjalistycznych środków transportu jakimi są samochody typu chłodnie, wyposażone w zabudowę izotermiczną oraz agregat chłodniczy.

Równocześnie nie należy zapominać, że bardzo istotną kwestią jest odpowiednia niezawodność i diagnostyka pojazdów, w tym poszczególnych elementów ich budowy [5-7,11,12,14,15,20,

25,27,29-31, 36-38, 42] oraz algorytmizacja przemieszczeń z wykorzystaniem gotowych planerów transportu [39-41].

Warunki transportu oraz niezbędne wyposażenie pojazdów przeznaczonych do przewozu szybko psujących się artykułów spożywczych regulują przepisy prawa:

- Ustawa o transporcie drogowym (Dz. U. z 2001 nr 125 poz. 1371);
- Umowa ATP;
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia (Dz. U. Nr 63, poz. 634 i Nr 128, poz. 1408 oraz z 2002 r. Nr 135, poz. 1145 i Nr 166, poz. 1362).

1. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań jest przykładowa firma produkcyjna działająca w branży produktów spożywczych szybko psujących się. Posiada ona kilka oddziałów w całej Polsce. W każdym z oddziałów znajduje się magazyn – chłodnia, gdzie towar jest kompletowany według zamówienia i oczekuje na załadunek. Po upływie kilku godzin towar zostaje załadowany na samochody dostawcze wyposażone w zabudowę izotermiczną oraz agregat chłodzący. Załadunek odbywa się ręcznie, po uprzednim sprawdzeniu przez kierowcę zgodności ilościowej towaru z dokumentami.

Towar znajduje się w opakowaniach, które stanowią skrzynki transportowe wykonane z tworzywa, o standardowych wymiarach zewnętrznych 300 mm x 400 mm.

Z przykładowego magazynu znajdującego się w Katowicach towar rozwożony jest przez 30 pojazdów. Na tym etapie łańcucha dostaw stosowane są pojazdy o różnych ładownościach oraz przestroniach ładunkowych, jednakże wszystkie należą do kategorii pojazdów ciężarowych o dopuszczalnej masie całkowitej nieprzekraczającej 3,5 tony. Ładowność wykorzystywanych pojazdów pozwala na zabranie całego przewidzianego na dystrybucję w danym dniu towaru – nie ma potrzeby powrotu na magazyn i ponownego załadunku. Firma prowadzi obsługę zwrotów. Kierowca po wykonaniu dostawy odbiera od klienta puste skrzynki oraz nie-

sprzedane towary. Każdy z pojazdów jest przydzielony do stałego rejonu oraz do tych samych odbiorców. Dystrybucja do sklepów, hurtowni i innych punktów odbioru to ostatnie ogniwo łańcucha dostaw.

Firma wprowadziła jednolity dla całego przedsiębiorstwa system ERP. Utworzono jedną bazę danych, wspólną dla wszystkich działów firmy. Schemat działania jednej, zintegrowanej bazy danych dla wszystkich działów w przedsiębiorstwie przedstawia rysunku 1.



Rys. 1. Schemat zintegrowanej bazy danych ERP [32]

Zamówienia nie są już składane przez dostawców. Wykorzystano zaawansowany algorytm prognozujący sprzedaż i na jego podstawie oparty jest aktualnie proces generowania zamówień. Dane niezbędne do obliczeń są wprowadzane do systemu przez kierowców z wykorzystaniem kolektorów danych.

Na każdym produkcie umieszczony jest kod 2D, który po zeskanowaniu zostaje przekształcony na zapis w bazie danych. Przykład takiego kodu umieszczonego na zakrętkie butelki pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Kody 2D

Kierowca skanuje kody ze wszystkich zwracanych produktów. System odczytuje z nich jaki to produkt oraz jego datę przydatności do spożycia. Dzięki tym danym w następnym tygodniu dystrybucji następuje zmiana wielkości dostawy – w przypadku małej liczby zwrotów lub ich braku dostawa zostaje zwiększona, natomiast jeśli liczba zwróconych produktów była znaczna to system wygeneruje mniejsze zamówienie. Wprowadzenie takiego rozwiązania pozwoliło wyeliminować błędy spowodowane czynnikiem ludzkim – zamówienia składane zbyt późno lub niewłaściwej wielkości. Obecnie zadaniem kierowcy jest dostarczenie produktów do klienta zgodnie ze specyfikacją systemową, odbiór niesprzedanego towaru oraz pu-

stych pojemników, a także odbiór dokumentów potwierdzających przyjęcie dostawy przez klienta.

2. WYZWANIA WYNIKAJĄCE Z DYSTRYBUCJI ANALIZOWANYCH TOWARÓW

Kluczowym zadaniem dla przewoźnika świadczącego usługi przewozowe dla wybranej firmy jest dotarcie do jak największej liczby klientów w jak najkrótszym czasie. Czas w tym przypadku ma szczególnie istotne znaczenie – im szybciej kierowca dotrze do sklepu z towarem, tym większa szansa, że produkt się sprzeda. Dystrybucja rozpoczyna się od wczesnych godzin porannych (wyjazd z magazynu następuje pomiędzy godziną 3.00 a 4.30). Obsługiwane punkty odbioru to w większości przypadków rejon centrów miast, dlatego wczesna godzina rozpoczęcia pracy pozwala uniknąć kongestii w mieście spowodowanej porannym szczytem komunikacyjnym. W nocy oraz we wczesnych godzinach porannych temperatura otoczenia jest znacznie niższa – mniejsza różnica temperatur ułatwia utrzymanie niskiej temperatury wewnątrz ładowni.

W przypadku dystrybucji do wielu odbiorców, zlokalizowanych czasem kilkaset metrów od siebie utrzymanie przez cały proces transportu wymaganej temperatury jest bardzo utrudnione. Częste zatrzymania i otwieranie drzwi ładowni powoduje dostanie się do przestrzeni ładunkowej ciepłego powietrza. To z kolei prowadzi do wzrostu temperatury przewożonych produktów, co grozi przerwaniem ciągu chłodniczego w łańcuchu dostaw. Ciągami chłodniczym określa się szereg działań mających na celu zachowanie prawidłowej temperatury od wytworzenia produktu aż do jego finalnego zużycia (spożycia). Utrzymanie prawidłowych warunków temperatury zapewnia bezpieczeństwo bakteriologiczne produktu, a także zapobiega niekorzystnym zmianom smakowo-zapachowym i konsystencji produktu. Zgodnie z regułą Van't Hoffa wzrost temperatury o 10 K powoduje nawet czterokrotny wzrost szybkości reakcji biochemicznych i fizykochemicznych. Dlatego tak ważny jest szybko i sprawnie przeprowadzony proces dystrybucji, aby nie dopuścić do zepsucia towaru jeszcze w transporcie.

Nie są możliwe jakiegokolwiek przestoje, towar nie jest magazynowany, a jedynie „przejeżdża” przez magazyn, gdzie zostaje skompletowany i przygotowany do załadunku. Nie ma możliwości przesunięcia dostawy, gdyż ze względu na krótki termin ważności (24 godziny), towar następnego dnia należy poddać utylizacji. Te wszystkie specyficzne właściwości towarów o bardzo krótkim terminie przydatności do spożycia oraz szczególne warunki transportu, wymagane dla zachowania najwyższej jakości produktów, stawiają wysokie wymagania przed osobami odpowiedzialnymi za zarządzanie transportem.

Przed operatorami logistycznymi powstaje trudny do rozwiązania problem decyzyjny dotyczący ustalenia właściwej (optymalnej) kolejności obsługi odbiorców [1,2,8,17,18,21,23, 24,28]. Podejmowanie decyzji w przedsiębiorstwie jest procesem rozwiązywania złożonych problemów, z których większość to logistyczne zagadnienia optymalizacyjne. Od decydentów oczekuje się, że każda decyzja powinna powodować maksymalizację korzyści. W związku z dużą złożonością obliczeniową te zagadnienia zalicza się do problemów klasy NP.-trudnych. Problemy NP.-trudne to takie, których nie da się rozwiązać w czasie wielomianowym. Czas wielomianowy algorytmu może przesądzać o jego możliwości zastosowania w praktyce.

W przypadku, gdy przedsiębiorstwo posiada tylko jedno centrum dystrybucyjne (w rozpatrywanym przypadku tak jest, magazynów na terenie kraju jest 9, ale do każdego jest przypisany stały obsługiwany rejon), z którego realizuje dostawy na rynek, optymalizacja planu dystrybucji polega na znalezieniu najkrótszej drogi

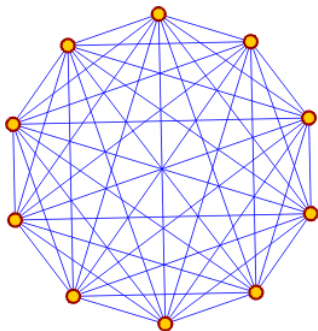
między poszczególnymi nabywcami towaru. Transporty odbywają się przy użyciu jednorodnych środków transportu. Oznacza to, że posiadają one jednakową ładowność i generują jednakowe koszty na danej trasie.

3. PROBLEM KOMIWOJAZERA

Powszechnie znane metody wyznaczania optymalnej trasy pomiędzy odbiorcami towaru funkcjonują w literaturze pod nazwą „problem komiwojażera” (ang. Travelling Salesman Problem – TSP). W przypadku zaopatrywania odbiorców z jednego centrum dystrybucyjnego metody te dają rozwiązanie.

Problem komiwojażera to jeden z najstarszych problemów optymalizacyjnych w działalności transportowej [3,4,9,10,16,19,22]. W teorii sieci problem TSP opiera się na znalezieniu najkrótszego cyklu Hamiltona w n -wierzchołkowej sieci pełnej. W terminologii grafów miasta stanowią wierzchołki grafów, a trasy pomiędzy nimi to krawędzie z wagami. Wagi krawędzi mogą odpowiadać odległościom pomiędzy punktami odbiorów, kosztom przejazdu lub czasowi podróży. Trasa komiwojażera jest cyklem Hamiltona, gdyż jest cyklem przechodzącym przez każdy wierzchołek grafu dokładnie jeden raz. Znalezienie właściwego cyklu Hamiltona należy do zadań NP-trudnych.

Przykładowy graf zupełny (graf, w którym każdy wierzchołek jest połączony z każdym) o dziesięciu wierzchołkach został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Graf zupełny o dziesięciu wierzchołkach [33]

Przedstawiony graf zawiera 362 880 różnych cykli Hamiltona. Obierając dowolny punkt jako punkt startowy, można wybrać pierwszą krawędź cyklu na 9 różnych sposobów, ponieważ każdy wierzchołek grafu jest połączony krawędzią z pozostałymi dziewięcioma. Po wybraniu pierwszej krawędzi pozostaje 8 możliwych wyborów. Następnie 7, 6, 5 ... 1.

Zatem liczbę cykli Hamiltona w przedstawionym grafie można zapisać w postaci:

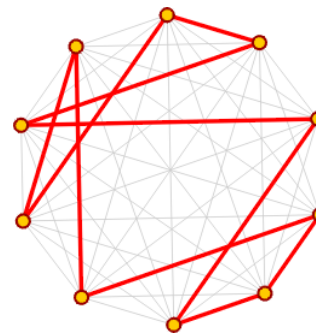
$$L_H = 9 * 8 * 7 * 6 * 5 * 4 * 3 * 2 * 1 = 9! = 362\ 880$$

Dla dowolnej liczby n wierzchołków wzór ma postać:

$$L_H = (n - 1) * (n - 2) * \dots * 3 * 2 * 1 = (n - 1)!$$

Na przykładzie podanych wzorów można zauważyć, jak skomplikowany obliczeniowo jest to problem. Rozszerzenie grafu o tylko jeden dodatkowy wierzchołek powoduje zwiększenie liczby możliwych kombinacji do 3 628 800. Wynika z tego, że liczba cykli lub ścieżek do przebadania rośnie wykładniczo. Problemy takie traktuje się jako nierozwiązywalne dla dużej liczby zmiennych.

Przykładowy cykl przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przykładowy cykl dla grafu zupełnego [33]

Optymalnym cyklem jest cykl o najmniejszej sumie wag. Najmniejsza suma wag nie zawsze musi odpowiadać najkrótszym długościom krawędzi. Grafy odpowiadające rzeczywistym sieciom połączeń zazwyczaj nie są zupełne – nieekonomiczne byłoby tworzenie dróg pomiędzy każdą parą miast. Zazwyczaj drogi przebiegają od jednego miasta do drugiego, a w niektórych się rozchodzą. Jeśli liczba wierzchołków w grafie jest niewielka (ok. 20) i graf nie jest grafem zupełnym, to problem komiwojażera można rozwiązać algorytmem, który wyznaczy wszystkie cykle Hamiltona, obliczy sumę wag krawędzi i zwróci cykl o najmniejszej sumie wag. Zaletą tego rozwiązania jest zawsze wynik optymalny, a nie przybliżony. Wadą jest wykładnicza złożoność obliczeniowa – uniemożliwia to analizę większych grafów.

Każdy komiwojażer tylko raz wyrusza z bazy i po dostarczeniu towaru do odbiorców musi powrócić do tej samej bazy. Każdy z punktów może być odwiedzony tylko raz. Zakłada się, że znane są lokalizacje dostawcy i odbiorców. Znane są także odległości pomiędzy poszczególnymi odbiorcami oraz czas potrzebny na przejazd między nimi. Pozwala to wyznaczyć zbiór potencjalnych tras dostaw, które będą się charakteryzowały ograniczonym czasem przejazdu i odległością. Poza kosztami transportu brane są też pod uwagę koszty załadunku i rozładunku dóbr. Zmienne części tych kosztów są pomijane (zależne np. od wielkości ładunku). Uwzględnia się natomiast część stałą tych kosztów, niezależną od rozmiaru ładunku a związaną z samym faktem wystąpienia załadunku oraz rozładunku. Z każdym kursem wiąże się jeden załadunek u dostawcy, więc stałe koszty załadunku należy dodać do kosztów transportu. Przyjmuje się, że koszty rozładunku mogą być różne u każdego odbiorcy. Problem decyzyjny opiera się na takim wyborze trasy, żeby można było dostarczyć nimi żądane ilości dóbr odbiorcom przy zachowaniu minimalnych kosztów transportu, załadunku i rozładunku. Optymalne rozwiązanie problemu, ze względu na złożoność zagadnienia jest zadaniem bardzo trudnym. W związku z tym nie poszukuje się rozwiązań optymalnych, gdyż czas poświęcony na przeprowadzenie obliczeń jest zbyt długi, a próbuje się znaleźć rozwiązania przybliżone, bliskie optymalnym. Osłabienie warunku optymalności prowadzi do redukcji czasu obliczeń z wykładniczego do wielomianowego, przy niewielkiej utracie optymalności. Przybliżone algorytmy stanowią jedyny realistyczny sposób rozwiązywania obliczeniowo trudnych problemów dużych rozmiarów. W rzeczywistości występują dodatkowe ograniczenia nieuwzględniane w typowych algorytmach, jak np. narzucony termin dostawy, okna czasowe, w których musi nastąpić dostawa, pojemność środka transportu, wielkość jednostek ładunkowych.

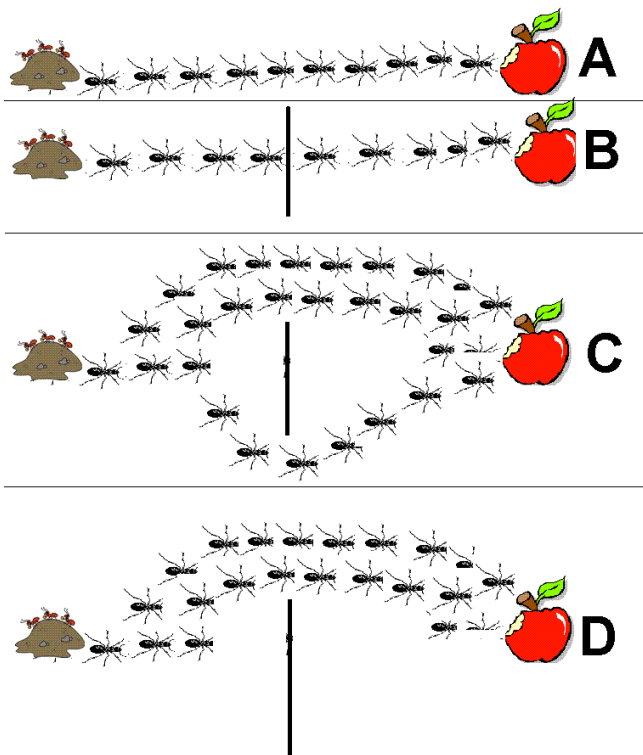
4. ALGORYTM MRÓWKOWY

Algorytm mrówkowy zaliczany jest do tzw. algorytmów metaheurystycznych. Pojęcie metaheurystyki zostało po raz pierwszy użyte przez Freda Glovera w 1986 r. Określenie powstało z połą-

czenia słów „meta” („nad”) oraz „heurystyka”, co w języku greckim oznacza „szukać”. Algorytmy tego typu nie rozwiązują żadnego problemu, jedynie podają sposób na utworzenie odpowiedniego algorytmu [3,4,9,10,16,19,22].

Cechą charakterystyczną algorytmów metaheurystycznych jest to, że są inspirowane procesami zachodzącymi w rzeczywistości (np. procesy biologiczne lub fizyczne). Przykładem takiego algorytmu umożliwiającego rozwiązanie trudnego problemu komiwojażera jest algorytm mrówkowy. Jego działanie zostało oparte na prawdziwych zachowaniach mrówek żyjących w koloniach. Ich przeżycie jest uzależnione od wspólnego działania. Ich zadaniem jest poszukiwanie pożywienia oraz budowa mrowiska. Pojedyncza mrówka nie jest w stanie tego dokonać. Mrówki przejawiają inteligentne zachowania działając w grupach. Aby przetrwać, niezbędna jest współpraca między wszystkimi mrówkami. W przypadku wystąpienia przeszkody na drodze mrówek do pożywienia, owady po pewnym czasie znajdują najkrótszą drogę do celu. Chwilę po pojawieniu się przeszkody ich ruch jest chaotyczny, jednak z biegiem czasu odnajdują najkrótszą drogę. Dzieje się to za sprawą komunikacji za pomocą feromonów, czyli związków infochemicznych wydzielanych do środowiska.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy sposób zachowania mrówek w sytuacji wystąpienia na ich drodze przeszkody.



Rys. 5. Przykład komunikacji mrówek przy pomocy feromonów – odnajdywanie najkrótszej drogi [3]

W poszukiwaniu pożywienia wędrujące mrówki wybierają losowe trasy. Po znalezieniu pokarmu, wracając z nim mrówka do mrowiska na całej trasie wydziela feromon. Dzięki zdolności wyczuwania feromonów kolejne mrówki podążają tą drogą, którą przeszło najwięcej mrówek, które również pozostawiły po sobie ślad zapachowy. Tego typu zachowanie przedstawia na rysunku 5 – sekcja A. W momencie, gdy na drodze pojawia się przeszkoda, mrówki mu-

szą wybrać drogę w prawo lub w lewo. Prawdopodobieństwo wyboru jednej z tras jest jednakowe (sekcja B). Owady, które przypadkowo wybrały krótszą drogę utralają na niej ślad feromonowy – mniejsza ilość feromonów zdążyła wyparować niż na ścieżce dłuższej. Wynika z tego, że feromon szybciej osiada się na krótszej ścieżce – sekcja C. W rezultacie, krótszą drogę wybierają wszystkie mrówki ponieważ podążając szlakiem feromonowym w stronę pożywienia dokładają również swój feromon do już istniejącego. Wysoki poziom zapachu na tej drodze sprawia, że podąża nią cała kolonia (sekcja D). Gdy źródło pożywienia się wyczerpie feromony z czasem wyparują i ścieżka zniknie. Szczegółowym badaniem naukowców zostały poddane złożone zachowania społeczne mrówek. Ich wzorce zachowania mogą dostarczyć modele rozwiązywania trudnych problemów kombinatorycznych. Próba poszukiwania optymalnych rozwiązań przy pomocy algorytmów inspirowanych zachowaniem kolonii mrówek została nazwana techniką Optymalizacji Kolonii Mrówek (ang. Ant Colony Optimization). Kluczowym elementem algorytmu ACO jest współpraca mrówek. Każda z nich znajduje rozwiązanie, jednak dopiero grupa jest w stanie wypracować rozwiązanie optymalne. Systemy mrówkowe mają zastosowanie w wielu dziedzinach, m.in. do rozwoju i syntezy związków chemicznych, do planowania przestrzennego, do planowania produkcji czy do problemu lokalizacji przystanków autobusowych. Najpopularniejszym zastosowaniem wymienionego algorytmu jest problem komiwojażera.

Aby móc zastosować algorytm ACO niezbędne jest poczynienie kilku założeń. Przykładowe z nich to:

- każdy osobnik pozostawia ślad feromonowy na krawędziach pomiędzy miastami w wielkości odwrotności długości trasy, którą pokonał;
- w pierwszym cyklu drogi wybierane są losowo, natomiast w kolejnych cyklach na wybraną trasę wpływa prawdopodobieństwo będące funkcją pozostawionego feromonu na krawędziach oraz odległości między miastami;
- każdy osobnik może odwiedzić dane miasto tylko raz w jednym cyklu;
- należy uwzględnić naturalne odparowywanie feromonu, dzięki temu unika się kumulowania zapachu na gorszych trasach, mniej uczęszczanych, a eksponuje się trasy lepsze, częściej używane.

Przy dobrze dobranych współczynnikach mrówki znajdują coraz lepsze rozwiązania. Początkowo poruszają się losowo, jednak z czasem są przyciągane przez lepsze ścieżki, więc rezygnują ze ścieżek mniej obiecujących.

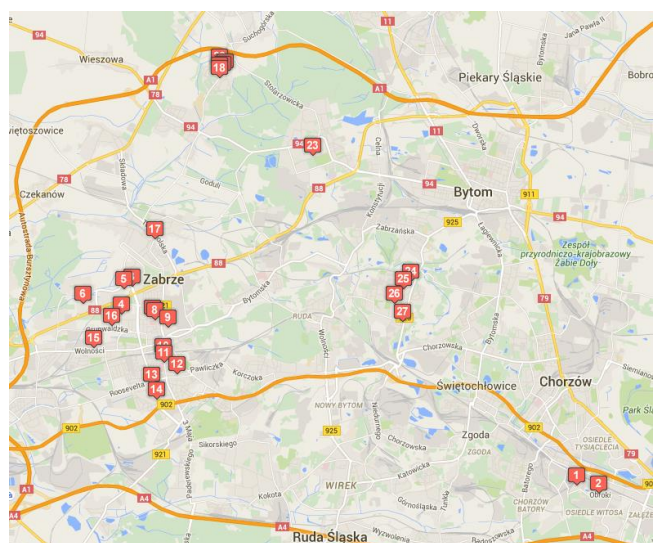
5. CHARAKTERYSTYKA WYBRANEJ DO ANALIZY TRASY

Analizie poddano jedną wybraną trasę, która obsługuje głównie odbiorców zlokalizowanych w mieście Zabrze. Załadunek odbywa się z magazynu znajdującego się w Katowicach. Wyjazd z magazynu następuje o godzinie 4.30. Dotychczasową kolejność punktów rozładunku przedstawiono w tabeli 1.

Przedstawiona trasa nie była nigdy optymalizowana przy pomocy znanych narzędzi służących minimalizowaniu kosztów. Wyznaczona kolejność opiera się na doświadczeniach praktycznych kierowcy oraz znajomości topografii miasta. Lokalizację obsługiwanych punktów przedstawiono na rysunku 6.

Tab. 1. Lista punktów obsługiwanych w dotychczasowej kolejności rozładunku

Lp.	Akronim	Adres
1	Punkt 1	Katowice, Obroki 130
2	Punkt 2	Katowice, Obroki 69
3	Punkt 3	Zabrze, Korfańtego 4
4	Punkt 4	Zabrze, Franciszkańska 21
5	Punkt 5	Zabrze, Korfańtego 17
6	Punkt 6	Zabrze, Plutonowego R. Szkubacza 1
7	Punkt 7	Zabrze, M. Curie-Skłodowskiej 10b
8	Punkt 8	Zabrze M. Curie-Skłodowskiej 9
9	Punkt 9	Zabrze, Plac Teatralny 13
10	Punkt 10	Zabrze, Szczęść Boże 2
11	Punkt 11	Zabrze, 3 Maja 13
12	Punkt 12	Zabrze, Ks. P. Pośpiecha 23a
13	Punkt 13	Zabrze, Gen. C. De Gaulle'a 75
14	Punkt 14	Zabrze, Gen. C. De Gaulle'a 111
15	Punkt 15	Zabrze, Wolności 118
16	Punkt 16	Zabrze, W. Tatariewiczza 1
17	Punkt 17	Zabrze, F. Chopina 28
18	Punkt 18	Zabrze, H. Jordana 80
19	Punkt 19	Zabrze, H. Jordana 75
20	Punkt 20	Zabrze, H. Jordana 86
21	Punkt 21	Zabrze, L. Kruczkowskiego 39a
22	Punkt 22	Zabrze, L. Kruczkowskiego 31
23	Punkt 23	Bytom, J. Dzierżonia 19
24	Punkt 24	Ruda Śląska, K. Goduli 45
25	Punkt 25	Ruda Śląska, W. Fojkisa 16
26	Punkt 26	Ruda Śląska, Podlas 32
27	Punkt 27	Ruda Śląska, K. Goduli 13



Rys. 6. Mapa z zaznaczonymi obsługiwanymi punktami odbioru [34]

Na rysunku widać, że większość punktów znajduje się w bliskiej odległości od siebie i skupia się głównie w dzielnicach Centrum Północ oraz Centrum Południe.

Dystrybucja rozpoczyna się od ulicy Korfańtego, a więc wjeżdżając do miasta (wjazd od drogi DW 902) omijane są niektóre sklepy, pomimo, że kierowca obok nich przejeżdża. Powodem takiego zachowania, jest fakt, że sklepy są jeszcze nieczynne. Z punktu widzenia minimalizacji kosztów transportu takie działanie jest nieekonomiczne, ponieważ pojazd pokonuje niepotrzebnie większą liczbę kilometrów przejeżdżając obok niektórych sklepów więcej niż jeden raz w ciągu dnia. Z punktu widzenia skrócenia czasu dystrybucji (a dokładnie zakończenia jej całkowicie o możliwie najwcześniejszej godzinie) takie ułożenie trasy znajduje uzasadnienie, ponieważ wykorzystuje się okna czasowe odbiorców.

W pierwszej kolejności obsługiwani są odbiorcy u których ta możliwość występuje najwcześniej. Z drugiej strony lepsze ułożenie

trasy być może pozwoli zmniejszyć liczbę kilometrów do pokonania, a tym samym pozwoli skrócić czas poświęcony na dojazdy do klientów.

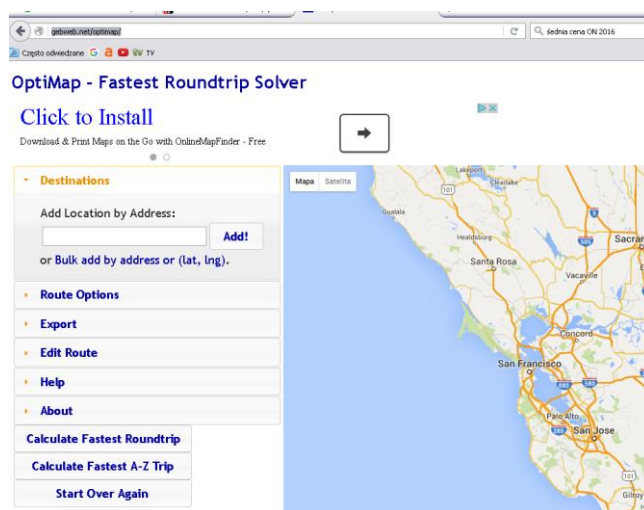
Kolejnym miejscem, które skupia kilku odbiorców jest dzielnica Helenka, gdzie punkty zlokalizowane są głównie wzdłuż ulicy Jordana. Na końcu trasy znajdują się 4 sklepy w Rudzie Śląskiej w dzielnicy Godula.

Pokonanie całej trasy wymaga przebycia 75 km (liczonych od magazynu do ostatniego klienta). Czas potrzebny do wykonania dostaw do przedstawionych 26 klientów wynosi ok. 5 godzin i 30 minut – nie uwzględniając czasu potrzebnego na załadunek w magazynie.

6. WYZNACZENIE ROZWIĄZANIA

W celu znalezienia lepszego rozwiązania niż stosowane dotychczas, użyto narzędzia on-line rozwiązującego problem komiwojażera w oparciu o algorytm mrówkowy. Skorzystano przy tym ze strony internetowej dostępnej pod adresem: <http://qebweb.net/optimap/> (rys. 7).

Narzędzie to uwzględnia niesymetryczność kosztów transportu (koszt/czas przejechania trasy z punktu A do punktu B nie musi być równy kosztowi/czasowi przejechania z punktu B do punktu A). Niesymetryczność wynika np. z układu ulic jednokierunkowych lub z faktu, iż łatwiej jest skręcić w prawo niż w lewo na skrzyżowaniu. Narzędzie, poza wyznaczeniem trasy dla przejazdu samochodem, umożliwi również wyznaczenie rozwiązania dla ruchu pieszego lub rowerowego. Posiada także możliwość wyznaczenia trasy unikającej autostrad i dróg płatnych.



Rys. 7. OptiMap – Fastest Roundtrip Solver [35]

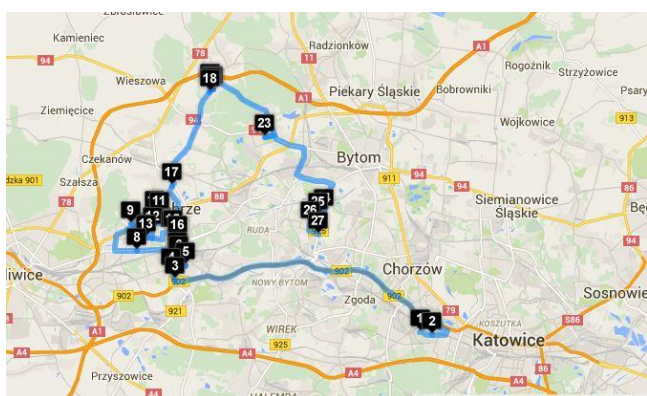
Pierwszą częścią rozwiązania problemu jest określenie go. Narzędzie odnajduje kolejność węzłów, zaczynając i kończąc na węźle nr 1, które odwiedza każdą lokalizację dokładnie jeden raz. Ta kolejność powinna zminimalizować całkowity czas potrzebny do przebycia trasy.

Pierwszym krokiem w celu wyznaczenia lepszego rozwiązania jest wprowadzenie danych do programu. Dane mogą być wprowadzone w formie adresów (ulica, nr, miasto) lub w formie współrzędnych geograficznych. Maksymalna liczba lokalizacji jakie można wprowadzić to 100. Pierwszy punkt staje się punktem bazowym – komiwojażer zawsze będzie do niego wracał. Kolejne punkty zostają uszeregowane według sugerowanej (bliskiej optymalnej) trasy przejazdu. Narzędzie jest darmowe i bardzo proste w obsłudze – wymaga jedynie podania listy adresów potrzebnych do wyznaczenia trasy. Kalkulacja trasy jest możliwa na dwa sposoby:

- trasa zostaje ułożona „w kółko” – od bazy (pierwszego punktu) wszystkie punkty są odwiedzone tylko raz, kierowca powraca do bazy,
- trasa zostaje ułożona „od A do Z” – od bazy (pierwszego punktu) do ostatniego klienta.

Po przeprowadzeniu obliczeń program umożliwia wyświetlenie wyników w formie listy adresów w kolejności odwiedzania lub w formie współrzędnych geograficznych. Narzędzie umożliwia także eksport gotowej trasy do popularnych urządzeń nawigacyjnych (np. Garmin, TomTom).

Dla analizowanej trasy zawierającej 26 klientów obliczenie trasy przejazdu zajmuje kilka minut. Mapę z wyznaczoną trasą przejazdu przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Zoptymalizowana trasa przejazdu [34]

Główne różnice pomiędzy dotychczas pokonywaną trasą, a trasą po zastosowaniu narzędzia optymalizacyjnego występują w dzielnicy Centrum. Różnice zostały przedstawione w tabeli 2 kolorem zielonym. Kolejność obsługiwanego reszty klientów pozostała bez zmian.

Tab. 2. Lista punktów obsługiwanych w zmienionej kolejności rozładunku

Lp.	Akronim	Adres
1	Punkt 1	Katowice, Obroki 130
2	Punkt 2	Katowice, Obroki 69
3	Punkt 14	Zabrze, Gen. C. De Gaulle'a 111
4	Punkt 13	Zabrze, Gen. C. De Gaulle'a 75
5	Punkt 12	Zabrze, Ks. P. Pośpiecha 23a
6	Punkt 11	Zabrze, 3 Maja 13
7	Punkt 10	Zabrze, Szczęść Boże 2
8	Punkt 15	Zabrze, Wolności 118
9	Punkt 16	Zabrze, W. Tatariewiczza 1
10	Punkt 4	Zabrze, Franciszkańska 21
11	Punkt 7	Zabrze, M. Curie-Skłodowskiej 10b
12	Punkt 8	Zabrze M. Curie-Skłodowskiej 9
13	Punkt 9	Zabrze, Plac Teatralny 13
14	Punkt 5	Zabrze, Korfańskiego 17
15	Punkt 3	Zabrze, Korfańskiego 4
16	Punkt 6	Zabrze, Plutonowego R. Szkubacza 1
17	Punkt 17	Zabrze, F. Chopina 28
18	Punkt 18	Zabrze, H. Jordana 80
19	Punkt 19	Zabrze, H. Jordana 75
20	Punkt 20	Zabrze, H. Jordana 86
21	Punkt 21	Zabrze, L. Kruczkowskiego 39a
22	Punkt 22	Zabrze, L. Kruczkowskiego 31
23	Punkt 23	Bytom, J. Dzierżonia 19
24	Punkt 24	Ruda Śląska, K. Goduli 45
25	Punkt 25	Ruda Śląska, W. Fojkisa 16
26	Punkt 26	Ruda Śląska, Podlas 32
27	Punkt 27	Ruda Śląska, K. Goduli 13

Według przedstawionej mapy trasa została skrócona o 18 kilometrów (z 75 do 57 km), co stanowi zredukowanie dystansu trasy o 24%. Biorąc pod uwagę konieczność codziennego pokonywania tej trasy, w skali roku daje to wymierne oszczędności. Dla samochodu Renault Master, który obsługuje trasę średnie spalanie wynosi 10,74 l/100 km (wynik został podany na podstawie obliczeń własnych – średnia z ponad 80 000 km).

Tabela 3 przedstawia porównanie kosztów ponoszonych przy aktualnym układzie trasy oraz potencjalny zysk po zastosowaniu się do nowego zaproponowanego układu trasy.

Tab. 3. Porównanie kosztów przed optymalizacją i po procesie „optymalizacji”

Parametr	Przed „optymalizacją”	Po „optymalizacji”	Różnica
Dzienny przebieg	75	57	18 km
Średnia cena 1 litra oleju napędowego w złotych	4,10	4,10	n/d
Średnie spalanie na 100 kilometrów	10,47	10,47	n/d
Dzienny koszt paliwa w złotych	32,20	24,47	7,73
Miesięczny przebieg w kilometrach (26 dni)	1950	1482	468
Miesięczny koszt paliwa w złotych (26 dni)	837,08	636,18	200,90
Roczny koszt paliwa w złotych	10 044,92	7 634,14	2 410,78

Dzięki zastosowaniu się do wskazówek otrzymanych w wyniku działania algorytmu mrówkowego, skrócenie trasy dziennie o 18 kilometrów wiąże się z redukcją kosztów ponoszonych na zakup paliwa. Miesięczna oszczędność to ok. 201 zł, co przekłada się na roczny zysk w kwocie ok. 2 411 zł.

Zmiana kolejności obsługiwanych klientów w centrum miasta wymusiła konieczność późniejszego rozpoczynania procesu dystrybucji. Wynika to z obowiązku dostosowania się do okien czasowych odbiorców, w których są przyjmowane dostawy. Wyjazd z magazynu został przesunięty z godziny 4.30 na godzinę 6.00, gdyż pierwszy klient w Zabrze rozpoczyna proces przyjęcia towaru od 6.30. Pomimo rozpoczęcia pracy 1,5 godziny później, zakończenie dystrybucji nastąpiło około godziny 11.35. Pomimo późniejszej godziny rozpoczęcia pracy i jazdy w godzinach porannego szczytu komunikacyjnego, odnotowano skrócenie czasu potrzebnego na realizację dostaw o średnio 25 minut dziennie. Wynika to ze skrócenia dystansu pokonywanej trasy głównie w rejonie centrum miasta, gdzie występuje największe zagęszczenie ruchu.

PODSUMOWANIE

Logistyka produktów świeżych wymaga bardzo dokładnego i przemyślanego planowania tras przejazdu pojazdów. Dystrybucja towarów do wielu odbiorców to klasyczny problem komiwojażera. W celu znalezienia rozwiązania bliskiego optymalnemu, można zastosować algorytm mrówkowy. Dzięki jego zastosowaniu w przykładzie przedstawionym w niniejszym artykule udało się skrócić trasę przejazdu, co przełożyło się na realne oszczędności.

BIBLIOGRAFIA

1. Bendkowski J., Kramarz M., *Logistyka stosowana metody, techniki, analizy*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
2. Coyle J.J., Bardi E.J., Langley J.C.J., *Zarządzanie Logistyczne*, Wyd. PWE, Warszawa 2012.

3. Dorigo M., Gambardella L. M., *Ant colonies for the traveling salesman problem*, Technical Report TR/IRIDIA/1996-3, Belgium 1996.
4. Dorigo M., Stützle T., *Ant Colony Optimization*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2004.
5. Grega R., Homišin J., Krajiňák J., Urbanský M., *Analysis of the impact of flexible couplings on gearbox vibrations*, „Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport” 2016, vol. 91, p. 43-50. ISSN: 0209-3324, DOI: <https://doi.org/10.20858/sjstut.2016.91.4>.
6. Harachová D., *Deformation of the elastic wheel harmonic gearing and its effect on toothing*, „Grant journal” 2016, vol. 5, no. 1, p. 89-92, ISSN: 1805-0638.
7. Homišin J., Kaššay P., Puškár M., Grega R., Krajiňák J., Urbanský M., Moravič M., *Continuous tuning of ship propulsion system by means of pneumatic tuner of torsional oscillation*, „International Journal of Maritime Engineering: Transactions of The Royal Institution of Naval Architects” 2016, vol. 158, no. Part A3, p. A231-A238, ISSN: 1479-8751.
8. Jacyna M., *Modelowanie wielokryterialne w zastosowaniu do oceny systemów transportowych*, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
9. Jachimowski R., Ambroziak T., *Klasteryzacja punktów obsługi i wyznaczanie tras pojazdów w dwuszczeblowym systemie dystrybucji*, „Logistyka”, nr 4, 2012.
10. Jakubowska A., Piechocka K., *W poszukiwaniu optymalnej trasy – wybrane algorytmy w zastosowaniu do problemu komiwojażera*, „Journal of Translogistics”, 2015.
11. Kaššay P., Homišin J., Urbanský M., Grega R., *Transient torsional analysis of a belt conveyor drive with pneumatic flexible shaft coupling*, „Acta Mechanica et Automatica” 2017, vol. 11, p. 69-72. DOI: 10.1515/ama-2017-0011.
12. Kaššay P., Urbanský M., *Torsional natural frequency tuning by means of pneumatic flexible shaft couplings*, „Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport” 2015, vol. 89, p. 57-60, ISSN: 0209-3324, DOI: <https://doi.org/10.20858/sjstut.2015.89.6>.
13. Liczmańska K., *Strategie marek produktowych na rynku FMCG*, Wyd. Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika. Toruń 2016.
14. Mantič M., Kuřka J., Kopas M., Faltinová E., Petróci J., *Special device for continuous deceleration of freight cableway trucks*, „Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport” 2016, vol. 91, p. 89-97, ISSN: 0209-3324, DOI: <https://doi.org/10.20858/sjstut.2016.91.9>.
15. Medvecká-Beňová S., *Influence of the face width and length of contact on teeth deformation and teeth stiffness*, „Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport” 2016, vol. 91, p. 99-106, ISSN: 0209-3324, DOI: <https://doi.org/10.20858/sjstut.2016.91.10>.
16. Michalewicz Z., Fogel D.B., *Jak to rozwiązać, czyli nowoczesna heurystyka*, Wyd. Naukowo-Techniczne 2006.
17. Michłowicz E., *Rozwiązywanie problemów dostaw w systemach dystrybucji*, „Logistyka”, nr 4, 2012.
18. Mindur (red.), *Technologie transportowe XXI w*, Wyd ITeE-PIB, Warszawa-Radom 2008.
19. Mrówczyńska B., *Zastosowanie sztucznego systemu immunologicznego do rozwiązania wielokryterialnego problemu dystrybucji dostaw*, „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Seria Transport”, z. 117, 2017.
20. Puskar M., Fabian M., Kadarova J., Blist'an P., Kopas M., *Autonomous vehicle with internal combustion drive based on the homogeneous charge compression ignition technology*, „International Journal of Advanced Robotic Systems” 2017, vol. 14(5). DOI: 10.1177/1729881417736896.
21. Pyza D., *Wybrane aspekty racjonalizacji systemów przewozowych w łańcuchu dostaw przy ograniczonych zasobach*, „Logistyka”, nr 4, 2012.
22. Rutczyńska-Wdowiak K., Jabłoński N., *Algorytm mrówkowy w problemie komiwojażera*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe”, nr 6, 2016.
23. Rutkowski K. (red.), *Logistyka dystrybucji*, Wyd. Difin, Warszawa 2002.
24. Sołtyś M., *Zarządzanie logistyczne*, Wyd. Akademii Ekonomicznej w Katowicach, Katowice 2000.
25. Tomko T., Puskar M., Fabian M., Boslai R., *Procedure for the evaluation of measured data in terms of vibration diagnostics by application of a multidimensional statistical model*, „Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport” 2016, vol. 91, p. 125-131, ISSN: 0209-3324, DOI: <https://doi.org/10.20858/sjstut.2016.91.13>.
26. Tul-Krzyszczuk A., Krajewski K., *Innowacje organizacyjne w handlu produktami żywnościowymi – doświadczenia, specyfika*, „a Tul-Krzyszczuk, Karol Krajewski Stowarzyszenie Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu. Roczniki Naukowe”, tom XVI, z. 2.
27. Vojtková J., *Reduction of contact stresses using involute gears with asymmetric teeth*, „Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport” 2015, vol. 89, p. 179-185. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858/sjstut.2015.89.19.
28. Wojciechowski Ł., Cisowski T., Grzegorzczak, P., *Metody zarządzania flotą samochodową w firmie*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe”, nr 6, 2010.
29. Zelič A., Zuber N., Šostakov R., *Experimental determination of lateral forces caused by bridge crane skewing during travelling*, „Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability” 2018, vol. 20(1), p. 90-99. DOI: <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.1.12>. ISSN: 1507-2711.
30. Zuber N., Bajrić R., *Application of artificial neural networks and principal component analysis on vibration signals for automated fault classification of roller element bearings*, „Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance And Reliability” 2016, vol. 18(2), p. 299-306. DOI: 10.17531/ein.2016.2.19. ISSN: 1507-2711.
31. Zuber N., Bajrić R., Šostakov R., *Gearbox faults identification using vibration signal analysis and artificial intelligence methods*, „Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance And Reliability” 2014, vol. 16(1), p. 61-35, ISSN: 1507-2711.
32. Portal internetowy: Microsoft Dynamics ERP. Dostęp: <https://www.microsoftdynamicserp.pl/>.
33. Portal internetowy: Algorytmy struktury danych. Dostęp: http://www.eduinf.waw.pl/inf/alg/001_search/0140.php/.
34. Portal internetowy: Mapy Google. Dostęp: <https://www.google.pl/maps/>.
35. Portal internetowy: OptiMap – Fastest Roundtrip Solver. Dostęp: <http://gebweb.net/optimap/>.
36. Łebkowski A., *Electric Vehicle Battery Tester*, „Przegląd Elektrotechniczny”, 2017, vol. 93.
37. Łebkowski A., *Electric vehicles trucks - overview of technology and research selected vehicle*, „Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni”, 2017, vol. 98.
38. Łebkowski A *Light electric vehicle powertrain analysis*, „Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport”, 2017, vol. 94.
39. Celiński I., Sierpiński G., Staniek M., *Rozwiązywanie szczególnych problemów transportowych z wykorzystaniem narzędzia*

- GTalg. Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 6/2016, s. 1268-1277
40. Celiński I., Sierpiński G., Staniek M., Wykorzystanie zwrotnego kanału informacyjnego w sieci transportowej w celu zrównoważenia rozwoju transportu na przykładzie zbiorów big data z wykorzystaniem planera podróży Green Travelling, zbiory danych (cz. I). Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 12/2016, s. 63-70.
41. Celiński I., Sierpiński G., Staniek M., Wykorzystanie zwrotnego kanału informacyjnego w sieci transportowej w celu zrównoważenia rozwoju transportu na przykładzie zbiorów big data z wykorzystaniem planera podróży Green Travelling, metodyka (cz. II). Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 12/2016, s. 71-78.
42. Roman D., Czech P., Sierpiński G., Turoń K., Urbańczyk R., Amsterdam jako miasto przyjazne samochodom osobowym z napędem hybrydowym i elektrycznym. Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 6/2017, s. 396-404.
43. Sierpiński G., de Lambert B., Logistyka przemieszczeń w czasie organizacji imprez masowych. Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 3/2013, s. 153-162

An example of using an ant's algorithm to improve the distribution process of perishable products

The transport of goods to customers is an important element of the operations of manufacturing enterprises. Optimally managed distribution network and vehicle fleet are the key factors that allow to significantly reduce delivery costs. Clearly visible effects of reducing transport costs can be

obtained through proper route planning, including the order of serving individual recipients. The aim of the article is to present a way to find a solution that allows improving the distribution process of perishable products to many recipients on the example of one of the routes served by the example company. In finding the optimal solution, tools based on the optimization problem called the "traveling salesman problem" (TSP) were used. Tools have been described to facilitate better planning of delivery routes to recipients using one means of transport. An algorithm is presented that allows to optimize the use of the means of transport while reducing transport costs and increasing work efficiency by minimizing the time of transport service provision.

Autorzy:

mgr. inż. **Mateusz Kalafarski** – Wydział Transportu, Politechnika Śląska

dr hab. inż. **Piotr Czech**, prof. PŚ – Wydział Transportu, Politechnika Śląska

dr inż. **Bogna Mrówczyńska** – Wydział Transportu, Politechnika Śląska

dr inż. **Grzegorz Sierpiński** – Wydział Transportu, Politechnika Śląska

mgr inż. **Katarzyna Turoń** – Wydział Transportu, Politechnika Śląska

JEL: L99 DOI: 10.24136/atest.2018.227

Data zgłoszenia: 2018.05.28 Data akceptacji: 2018.06.15