

Marcin KUCZORA

Politechnika Śląska, Instytut Informatyki

## OPTIMALIZACJA TRANSPORTU PRZESYŁEK PRZY WYKORZYSTANIU STAŁYCH LINII KOMUNIKACYJNYCH I WYRÓŻNIONYCH WĘZŁÓW SORTUJĄCYCH

**Streszczenie.** Artykuł opisuje problem transportowy zakładający istnienie sieci węzłów o zróżnicowanej funkcji, pomiędzy którymi są transportowane przesyłki. Rozważane jest znalezienie optymalnej drogi paczki oraz określenie reguł konstrukcji rozkładu jazdy. Próba rozwiązania zakłada adaptację klasycznych algorytmów transportowych, tzn. algorytmu wyszukiwania najkrótszych ścieżek Dijkstry oraz Floyda-Warshalla. Wyniki są selekcjonowane w świetle przyjętych ograniczeń. Jako alternatywne rozwiązanie jest przedstawiony algorytm przeszukiwania Tabu. Uzyskane rezultaty są porównane do wyników empirycznych, a wykorzystywane metody do prac podejmowanych na świecie.

## OPTIMALIZATION OF PACKAGES TRANSPORT THANKS TO CONSTANT COMMUNICATION LINES AND DISTINGUISHED SORTING NODES

**Summary.** Article describes transport-class problem connected with network transporting packages that contains nodes which have different function. The goal is to find an optimal parcel itinerary and specify timetable creation rules. The attempt of solution adapts classical transport algorithms such as Dijkstra and Floyd-Warshall ones. The content modification of those algorithms and the selection of results according to given assumptions are executed. Tabu Search algorithm is considered as an alternative solution. The results are compared to empiric ones and applied methods to works which are undertaken in the world.

## 1. Wstęp

Problem, którego próba rozwiązania zostanie nakreślona w tym artykule, to zagadnienie, którym zajmuje się dziedzina nauki o nazwie logistyka, rozwijająca się w Polsce przez ostatnich kilka lat. Związane z nią problemy transportowe w dzisiejszych czasach są przedmiotem zastosowań jednej z matematycznych dyscyplin, tzn.: badania dot. optymalizacji operacji.

Zagadnienia tego typu są aktualne także dzisiaj, niemal spotykamy się z nimi na co dzień. Komputerowe planowanie oraz systemy opracowujące plany logistyczne są koniecznością i są one oparte na algorytmach zakładających optymalizację przy użyciu technik matematycznych.

### 1.1. Definicja logistyki

Zadaniem logistyki jest takie zaplanowanie dostawy produktu do miejsca przeznaczenia, aby nastąpiła ona zgodnie z zamówieniem, oraz dostarczony został właściwy produkt, w odpowiednim stanie i we właściwym czasie (w lit. ang. *Just on time*). Ważnym aspektem tegoż planowana jest, aby ten cały proces odbył się przy minimalnych kosztach.

Istnieje wiele definicji logistyki. Nie jest to dziedzina zarządzania tak dobrze zdefiniowana jak produkcja czy marketing. Oto kilka częściowej wykorzystywanych definicji:

- Logistyka jest procesem planowania, realizacji i kontroli wydajnego i oszczędnego przepływu i magazynowania surowców, półfabrykatów i gotowych wyrobów oraz przepływem związanych z tym informacji od punktu dostawy do punktu odbioru odpowiednio do wymagań Klienta (*Council of Logistics Management*).
- Logistyka jest pojęciem obejmującym organizację, planowanie, kontrolę i realizację przepływu towarów od ich wytworzenia i nabycia, przez produkcję i dystrybucję, aż do finalnego odbiorcy, której celem jest zaspokojenie wymagań rynku, przy minimalnych kosztach i przy minimalnym zaangażowaniu kapitału (*Europe Logistics Association*).
- Logistyka to wspomagające zarządzanie działaniami planistycznymi, kontrolnymi i regulacyjnymi, które podczas okresu użytkowania produktu zapewniają wydajne wykorzystanie zasobów i adekwatną skuteczność elementów logistycznych podczas wszystkich faz okresu użytkowania, tak że dzięki integrowaniu we właściwym czasie w system zapewniają efektywne sterowanie zużyciem zasobów (*Society of Logistics Engineers - SOLE*).

Logistyka jest zatem procesem koordynacji wszystkich czynności niematerialnych, które muszą zostać przeprowadzone w celu wykonania usługi w sposób efektywny pod względem kosztów i zgodny z wymaganiami klienta [2].

## 2. Złożoność problemów transportowych

Podstawowym aspektem problemów operacyjnych jest bezpośredni, natychmiastowy wpływ zmiany zadanych ograniczeń na efektywność operacji transportowych. Poniżej przedstawione są trzy przykłady obrazujące ten wpływ.

### 2.1. Publiczna firma transportowa

Działanie publicznej firmy transportowej operującej w dużym mieście to pierwszy przykład wpływu parametrów na wydajność sfery operacyjnej. Problem optymalizacji jest w tym przypadku związany z planowaniem, rozkładem jazdy, wynajmem środków transportu oraz harmonogramem dyżurów. Tego rodzaju skomplikowane zadania optymalizacyjne nie mogą być niestety jeszcze w chwili obecnej rozwiązane całościowo i jedynym sposobem jest planowanie hierarchiczne w kolejnych krokach, czego przykładem mogą być wyniki badań prezentowane podczas 8 międzynarodowej konferencji „Computer-Aided Scheduling of Public Transport” CASPT 2000, która miała miejsce w czerwcu ubiegłego roku w Berlinie.

Względem tego, co możemy dziś osiągnąć, większość rozpatrywanych zagadnień jest już dawno u kresu swoich możliwości i przy zastosowaniu konwencjonalnych metod nie jesteśmy w stanie posunąć się dalej, dlatego też konieczne staje się wykorzystanie coraz bardziej skomplikowanych metod symulacji i optymalizacji tychże problemów.

### 2.2. Elastyczna gospodarka materiałowa

Kontrola rozplywu materiałów w elastycznym systemie produkcyjnym jest kolejnym przykładem problemu logistycznego. Zagadnienie to zawiera także inne niebezpieczeństwa: awarie, nagłe spiętrzenie lub anulowanie zadań, jak również inne nieprzewidywalne wydarzenia, których skutkiem są nagłe, duże zmiany stanu systemu, z jakimi trzeba sobie radzić w czasie rzeczywistym (online).

### 2.3. Optymalizacja “rozkładu jazdy” transportów liniowych

Optymalizacja “rozkładu jazdy” transportów liniowych w przypadku firm zajmujących się ekspresowym transportem przesyłek (w trybie *NextDay*) jest trzecim przykładem

problemu logistycznego. W systemach ekspresowego transportu paczek oferowanych przez duże firmy spedycyjne, takie jak SERVISCO (35% udziału w rynku), STOLICA (33%) czy też nawet SPEDPOL (7%), muszą istnieć wyodrębnione jednostki, które zbierają paczki z przynależnego im obszaru, sortują je, ładują je na środki transportu, rozładują transporty przychodzące, przeładują przesyłki itd. itp. Dla wszystkich węzłów jest jednak jedno wiążące założenie: respektowanie tzw. *drogi paczki* (bardziej szczegółowo problem ten został opisany w podrozdz.3.5).

Opracowanie optymalnej drogi paczki oraz związanego z nią optymalnego rozkładu jazdy nie jest niestety problemem trywialnym, o czym świadczą prace [3], [4], [5] oraz rozwiązanie empiryczne, którego dane zostały mi udostępnione i z których zamierzam skorzystać przy porównaniu. Rozwiązania te powodują bowiem ciągłe zmiany tak drogi paczki, jak i samego rozkładu jazdy.

### 3. Ogólne przedstawienie problemu

#### 3.1. Cel badań

Temat badań zakłada próbę rozwiązania ostatniego z trzech prezentowanych w rozdz. 2 problemów, tzn. opracowanie drogi przesyłki pomiędzy poszczególnymi jednostkami organizacyjnymi (węzłami, Depots, Hubs) oraz szkieletowe określenie kryteriów układania optymalnego rozkładu jazdy.

Pierwsza faza projektu przewiduje opracowanie drogi paczki przy określonych założeniach wstępnych (zobacz rozdz. 3.4). Operacja ta wiąże się z przyporządkowaniem na podstawie kalkulacji kosztów, węzłów podrzędnych do nadrzędnych i ustaleniem stałych linii komunikacyjnych, czyli określeniem struktury systemu transportowego.

W drugiej fazie projektu, na podstawie ustalonych dróg komunikacyjnych podjęta zostanie próba opracowania reguł tworzenia rozkładu jazdy transportów, minimalizującego czas przebywania paczki w systemie.

Praktyczny aspekt zagadnienia jest także związany z regułą, że im krótszy będzie czas przebywania paczki w systemie, tym dłuższe będzie okno czasowe, w którym mogą być rozwożone i zbierane przesyłki pomiędzy węzłami a klientami, dlatego na rozkład jazdy zostały nałożone warunki zmierzające do skrócenia czasu obróbki w węzłach sortujących.

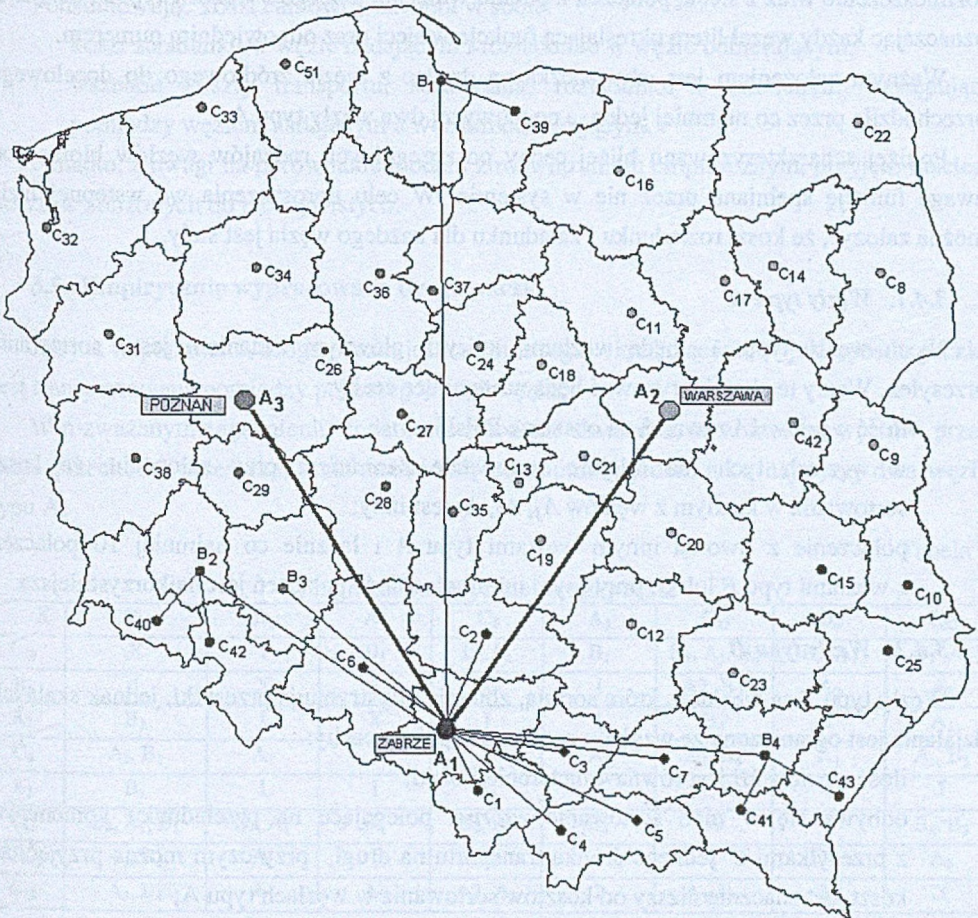
#### 3.2. Zakres badań

Rozważmy skończoną liczbę jednostek (punktów sortująco-przeładowczych) jako sieć węzłów, pomiędzy którymi są transportowane przesyłki. Niech sieć ta zawiera  $N$  węzłów,

spośród których możemy wyróżnić  $kA$  węzłów sortujących pierwotnie,  $kB$  węzłów sortujących wtórnie oraz  $kC$  węzłów zajmujących się tylko zbiorem i wysyłką przesyłek, przy czym  $kA \ll kB \ll kC$ . Pomiedzy węzłami są zdefiniowane odległości, a ponadto każdy typ węzła wnosi określony koszt do systemu.

### 3.3. Klasyfikacja zadania

Problemy transportowe są rozpatrywane w instytutach całego świata, np. w ZIB (*Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin*), jak i na Politechnice Poznańskiej (*Instytut Logistyki i Magazynowania*). Także w Instytucie Informatyki Pol. Śl. są prowadzone prace z dziedziny badań operacyjnych takich jak np. problem dostawy (zobacz [3]), czy problemy organizacji komunikacji autobusowej ([4] i [5]).



Rys. 1. Sieć połączeń z punktu widzenia z jednego punktu typu A na tle całego systemu

Fig. 1. Network for one sorting node in the system

### 3.4. Parametry sieci oraz przyjęte ograniczenia

Jak już stwierdzono, rozważany problem zakłada istnienie na określonym terenie sieci węzłów, pomiędzy którymi są przesyłane elementy. Rozpatrzmy przypadek szczególny, dla którego będziemy prowadzili badania.

Ze względu na wypełniane w systemie funkcje, a co za tym idzie skorelowane z nimi koszty działalności, rozróżnia się trzy rodzaje węzłów, o następujących oznaczeniach:

- węzły  $A_i$ , gdzie  $i=1..kA$ ;
- węzły  $B_i$ , gdzie  $i=1..kB$ ;
- węzły  $C_i$ , gdzie  $i=1..kC$ .

Założmy, że łączna ilość węzłów na terenie Polski to 50, a większość węzłów to miasta wojewódzkie zgodnie ze „starym” podziałem województw i pokażmy na mapie ich rozmieszczenie wraz z siecią połączeń z punktu widzenia jednego z węzłów typu A na rys. 1, oznaczając każdy węzeł literą określającą funkcje w sieci oraz odpowiednim numerem.

Ważnym założeniem jest, aby paczka na drodze z węzła źródłowego do docelowego przechodziła przez co najmniej jeden, a co najwyżej dwa węzły typu A.

Poniżej scharakteryzowano bliżej cechy poszczególnych rodzajów węzłów biorąc pod uwagę funkcję spełnianą przez nie w systemie. W celu uproszczenia we wstępnej fazie można założyć, że koszt rozładunku i załadunku dla każdego węzła jest stały.

#### 3.4.1. Węzły typu A

Niech węzły typu A będą węzłami, których głównym zadaniem jest sortowanie przesyłek. Węzły te charakteryzować będą następujące cechy:

- ilość węzłów  $kA$  równa 3 na obszarze Polski;
- w węzłach tych ma miejsce sortowanie *zasadnicze* przy założeniu, że koszt sortowania w każdym z węzłów  $A_1, A_2, A_3$  jest inny;
- połączenie z dwoma innym węzłami typu A i łącznie co najmniej 10 połączeń z węzłami typu B lub C, przy czym minimalna ilość połączeń jest najkorzystniejsza.

#### 3.4.2. Węzły typu B

Węzły typu B są węzłami, które sortują, zbierają i dystrybuują przesyłki, jednak skala ich działania jest ograniczona ze względu na ich następujące cechy:

- ilość węzłów  $kB$  jest równa 4 na terenie Polski;
- odbywa się w nich sortowanie *wtórne*, polegające na przeładunku kontenerów z przesyłkami z jednego środka transportu na drugi, przy czym można przyjąć, że koszt jest znacznie niższy od kosztów sortowania w węzłach typu A;

- posiadają połączenie z co najmniej jednym węzłem typu A i co najmniej dwoma węzłami typu B lub C przy założeniu, że minimalna ilość połączeń jest najbardziej opłacalna, w związku z czym sortowanie odbywa się tylko dla kilku kierunków;

### 3.4.3. Węzły typu C

Węzły typu C są węzłami, których głównym zadaniem jest zbieranie i rozwóz przesyłek. Następujące cechy charakteryzują ich działanie w systemie:

- ilość węzłów  $kC$  jest stała, ograniczona do ilości 43 na terenie Polski,
- każdy węzeł typu C jako jednostka podrzędna posiada tylko jedno połączenie komunikacyjne z węzłem nadrzędnym typu A lub B;
- w węzłach tych nie odbywa się sortowanie.

Podsumowując koszt całkowity zawiera w sobie:

- koszt załadunku w węźle nadającym i rozładunku w węźle odbierającym,
- wszelkie koszty transportu, sortowania, rozładunku i załadunku, występujące pomiędzy węzłem nadającym a węzłem odbierającym.

Ponadto, z uwagi na porównanie modelu z rozwiązaniem empirycznym, przyjęto macierz kosztów zbliżonych do rzeczywistych.

## 3.5. Empirycznie wypracowana droga paczki

Jak już wspomniano, droga paczki jest to zbiór reguł określających, w jaki sposób paczka jest transportowana pomiędzy poszczególnymi węzłami.

W rozważanym zagadnieniu dodatkowe założenie stwierdza, że w szeregu węzłów, przez które przechodzi przesyłka, musi znaleźć się co najmniej jeden, a co najwyżej dwa węzły typu A.

Tabela 1

Fragment empirycznej drogi paczki

X	C <sub>39</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	C <sub>6</sub>	A <sub>3</sub>	C <sub>43</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>32</sub>
C <sub>39</sub>	X	I	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub> , A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub> , A <sub>1</sub> , B <sub>4</sub>	B <sub>1</sub> , A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub> , A <sub>3</sub>
B <sub>1</sub>	I	X	I	A <sub>1</sub>	I	A <sub>2</sub> , B <sub>4</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	I	X	I	I	B <sub>4</sub>	I	A <sub>3</sub>
C <sub>6</sub>	A <sub>1</sub> , B <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	I	X	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> , B <sub>4</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> , B <sub>3</sub>
A <sub>3</sub>	B <sub>1</sub>	I	I	A <sub>1</sub>	X	A <sub>1</sub> , B <sub>4</sub>	I	I
C <sub>43</sub>	B <sub>4</sub> , A <sub>1</sub> , B <sub>1</sub>	B <sub>4</sub> , A <sub>1</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>4</sub> , A <sub>1</sub>	B <sub>4</sub>	X	I	B <sub>4</sub> , B <sub>3</sub>
B <sub>4</sub>	A <sub>1</sub> , B <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	I	A <sub>1</sub>	I	I	X	A <sub>3</sub>
C <sub>32</sub>	A <sub>3</sub> , B <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>3</sub> , A <sub>1</sub>	I	A <sub>3</sub> , B <sub>4</sub>	A <sub>3</sub>	X

Tabela 1 prezentuje fragment drogi paczki, oznaczenia węzłów nadających znajdują się w pierwszej kolumnie, odbierających w pierwszym wierszu, a wszystkie węzły pośredniczące są wymienione na przecięciu wiersza, w którego pierwszej komórce jest oznaczenie węzła źródłowego i kolumny, której element znajdujący się w pierwszej komórce oznacza węzeł docelowy. Litera I oznacza połączenie bezpośrednie.

### 3.6. Przykład wykorzystania drogi paczki

W celu lepszego zrozumienia natury problemu prześledźmy drogę paczki na podstawie empirycznych danych (fragment w tab. 1). Rozważmy dwie przesyłki: jedną z  $C_{43}$  do  $C_{32}$ , a drugą z  $C_6$  do  $C_{43}$ . W pierwszym przypadku paczka nadana w  $C_{43}$  zostanie przewieziona do  $B_4$ , następnie wspólnie z innymi przesyłkami przejdzie przez  $A_1$  oraz  $A_3$ , aby dotrzeć do  $C_{32}$ . W drugim przypadku paczka przejeżdża przez  $A_1$ , skąd jest wysyłana na transporcie do  $B_1$ , by dotrzeć do  $C_{43}$ . Jak można zauważyć, obydwie „marszruty” są podobne do siebie w tym, że paczki przechodzą przez węzły przeładownicze typu B, jednak z uwagi na inną liczbę węzłów typu A koszt obsługi dla naszego systemu będzie inny.

### 3.7. Uwagi dotyczące procesu optymalizacji

Optymalizacja jest dokonywana na zasadzie minimalizacji superpozycji kosztów ponoszonych w systemie do efektywnej obsługi przesyłek oraz czasu całkowitego im poświęcanego. Następujące założenia są zawsze spełnione:

- istnienie ściśle zdefiniowanych warunków brzegowych;
- zbliżone obciążenie i podobna wydajność każdego z węzłów sortujących;
- rozładunek, sortowanie i załadunek partii przesyłek na pojazd są obciążone kosztem czasowym.

Patrząc na zagadnienie z punktu widzenia czasu, proces optymalizacji jest warunkowany dwoma czynnikami: czasem przejazdu (zależnym od obranej trasy) i czasem całkowitym, jaki jest poświęcany obsłudze każdej partii przesyłek (także czas obsługi w węzłach).

### 3.8. Wybór drogi rozwiązania

Rozważmy krótko klasy algorytmów, które mogłyby być pomocne w znalezieniu optymalnego rozwiązania.

Pierwszą najprostszą klasą jest *przeoglądanie wyczerpujące*, które wprawdzie znajduje rozwiązanie optymalne, jednak najczęściej, szczególnie w przypadku większych problemów, nie wykonuje tego w rozsądnym czasie. Kolejne dwie grupy to *programowanie dynamiczne*, polegające na przemieszczaniu się od punktu do punktu, na zasadzie przeglądania punktów



sąsiadujących w celu znalezienia lepszej wartości funkcji jakości, oraz *programowanie w logice z ograniczeniami*. W przypadku tego ostatniego duże znaczenie ma określenie zestawu ograniczeń, których jednoczesne spełnienie może oznaczać znalezienie w pełni optymalnego rozwiązania (próbę taką podjęto tworząc rozkład jazdy).

Ciekawą klasą są metaheurystyki kombinatoryczne, a należą do niej algorytmy takie jak Symulowane wyżarzanie (w lit. ang. *Simulated Annealing*), *Iterative Improvement*, *2PO (Two Phase Optimisation)* oraz *Tabu Search*. Jako rozwiązania alternatywne można także przyjąć algorytmy genetyczne, polegające na badaniu populacji osobników (rozwiązań) i selekcji najlepiej przystosowanych na drodze ich mutacji i krzyżowania oraz algorytmy mrówkowe.

W rozpatrywanym zagadnieniu, podobnie jak w większości zagadnień transportowych, za główny koszt jest uważane przebycie krawędzi pomiędzy węzłami. Nie ulega wątpliwości, że w rozpatrywanym problemie koszty dodatkowe obsługi w węzłach typów A i B można włączyć do kosztu przejścia pomiędzy węzłami, co sprowadza problem do znalezienia najkrótszej (w znaczeniu najtańszej) ścieżki przejścia pomiędzy poszczególnymi elementami sieci. W tym właśnie przypadku można wykorzystać klasyczne algorytmy Dijkstry i Floyda-Warshala, które przy **analizie jednokryterialnej** działają w rozsądnym czasie dając rozwiązanie optymalne. Również niewielki rozmiar rozpatrywanej sieci (50 węzłów) sprzyja przyjęciu tej drogi rozwiązania, dlatego też zdecydowano o jego realizacji.

Z drugiej strony temat artykułu mówi o analizie czasowo-kosztowej, czyli **dwukryterialnej**. Na własność efektywności czasowej wpływa konstrukcja rozkładu jazdy, jednak warto zadać sobie pytanie, czy w tym przypadku optymalizacja czasowa nie może być dokonana już na etapie tworzenia drogi paczki. Z tego właśnie względu, z uwagi na stopień skomplikowania problemu, rozwiązywanie zagadnienia za pomocą algorytmu Dijkstry wielokryterialnego nie da rozwiązania w rozsądnym czasie. Dla procesów podejmowania decyzji biznesowych lepsze może okazać się rozwiązanie za pomocą metaheurystyki, które w stosunkowo krótkim czasie da rozwiązanie zbliżone do optymalnego. W związku z tym metoda *Tabu Search*, która znajduje dziś zastosowanie w wielu dziedzinach optymalizacji związanych z badaniami operacyjnymi, np. podobny do analizowanego zagadnienia *problem dostawy* [3] (zobacz także rozdział 4), zostanie rozważona w rozdziale 5.

W związku z tym nie można jednoznacznie stwierdzić, że prezentowany problem nie należy do klasy NP-zupełnych i nie zdecydowano się na wykorzystanie algorytmu heurystycznego jako podstawowej drogi rozwiązania.

### 3.9. Przeszkody w uzyskaniu optymalnego rozwiązania

Następujące aspekty można uznać za przeszkody w uzyskaniu optymalnego rozwiązania:

- uzyskanie modeli o dużej ilości zmiennych, a w związku z tym czasochłonnych obliczeniowo i trudnych nie tylko wobec problemu określenia funkcji jakości, ale także do analizy (np. model służący optymalizacji transportu publicznego M. Groetschela – opracowany przy użyciu technik programowania liniowego zawierał ok. 70.000 zmiennych);
- przyjęcie dwuetapowego rozwiązania może nie dać optymalnego rezultatu (zgodnie z тезami J. Bramel i David Simchi-Lewi – 1993).

### 3.10. Wykorzystywane algorytmy i sposób ich użycia

W rozwiązaniu problemu zdecydowano się wykorzystać dwa algorytmy klasyczne:

- algorytm wyszukiwania najkrótszych ścieżek Dijkstry;
- algorytm Floyda-Warshala.

Każdy z nich może być użyty niezależnie od drugiego, dlatego ciekawe jest porównanie ich wyników. Głównym wykorzystywanym algorytmem jest drugi z wyżej wymienionych, postanowiono jednak użyć go jako algorytmu „z powrotami”. Przyjmuje się tu założenie, że posiadając rozwiązanie, które jedynie częściowo odpowiada szukanemu, zmieniamy klasę wybranych węzłów, co daje efekt w postaci modyfikacji w strukturze sieci, i dalej przy ponownym wywołaniu algorytmu uzyskanie „lepszego” rozwiązania. Zakończenie algorytmu następuje, gdy dalsze modyfikacje nie prowadzą do polepszenia parametrów kosztowych lub jeśli zostanie przekroczone inne zdefiniowane ograniczenie, np. maksymalna ilość węzłów typu B.

#### 3.10.1. Algorytm Floyda-Warshala z powrotami

W rozpatrywanym, szczególnym przypadku zagadnienia problemowego użycie algorytmu Floyda-Warshala, poszukującego najkrótszych dróg pomiędzy wszystkimi rozpatrywanymi węzłami, przy odpowiednio zadanych parametrach kosztowych, daje w przypadku pojedynczego wykonania całe konkretne rozwiązanie, określając m.in. także, który z węzłów klasy C powinien przynależeć do węzła typu A.

Jednak właśnie wśród tych węzłów można wyróżnić pewną podklasę  $C'$ , dla której na podstawie rozpatrywanych wyników nie można jednoznacznie określić, do którego węzła nadrzędnego typu A winny być przyporządkowane. Konieczna zatem staje się kodyfikacja, czyli korekta otrzymanych wyników, której zasady realizacji są następujące.

Jeżeli dla danego węzła  $C_i$  większość wytyczonych dróg komunikacyjnych łączy go z wybranym węzłem typu A oraz średni koszt na trasę jest niższy dla wybranego węzła  $A_i$ , przyporządkuj go na stałe temu węzłowi.

W przeciwnym przypadku dla danego węzła  $C_i$  znajdź dwa najbliższe terytorialnie inne węzły  $C_j$  i  $C_k$ , zmień ich klasy na B i ponownie wykonaj algorytm. Po tym wywołaniu

sprawdź ponownie przyporządkowanie węzła  $C_i$  do węzła typu A poprzez nowy węzeł pośredniczący  $B_x$ , wycofując zmianę klasy tego z węzłów pośredniczących, z którego zdecydowano się zrezygnować.

### 3.10.2. Częściowe wyniki a algorytm Dijkstry

W przypadku użycia drugiego algorytmu, tzn. Dijkstry, ze względu na to, że jest to algorytm poszukiwania najkrótszych dróg z jednego źródła, istnieje możliwość wykorzystania części wyników algorytmu Floyda-Warshala wykonując zadanie wyszukiwania tylko dla tych węzłów, dla których nie dał on jednoznacznych wyników. Taki sposób podejścia jest prawidłowy także dlatego, że można a priori, przyjmując jako kryterium odległość pomiędzy węzłami klas A i C przyporządkować węzły podrzędne  $C_i$  do nadrzędnych  $A_i$ .

### 3.10.3. Uproszczenie rozwiązania

W rozpatrywanym przypadku szczególnym uzyskane autorytatywne przyporządkowanie węzłów podrzędne  $C_i$  do nadrzędnych  $A_i$  można wykonać dla około 80% węzłów typu C, przyjmując jako wartość decydującą o przynależności odległość pomiędzy węzłami typu A i C np. do 120 km, jako trasę, którą można przebyć w ciągu 2 h. Idąc dalej można oczywiście zredukować czas działania algorytmu Floyda-Warshala z góry, autorytatywnie tworząc linie komunikacyjne ze wszystkimi węzłami typu A tylko tych węzłów C, które powyższego, ustalonego kryterium nie spełniają. Jednak, ponieważ czas wykonania nie jest w przypadku tego zagadnienia wartością krytyczną oraz z uwagi na ilość w rozpatrywanym przypadku szczególnym węzłów, można ten element optymalizacji pominąć.

## 3.11. Złożoność czasowo-obliczeniowa zastosowanych algorytmów

Złożoność obliczeniowa dla algorytmu Floyda-Warshala w naszym przypadku zależy od ilości węzłów  $n$  i wynosi:

$$T_{F.W}(n) = n^3.$$

W przypadku pesymistycznym, jeżeli po pierwszym przebiegu nie można określić przyporządkowania jakiegokolwiek z węzłów klasy C do węzła klasy A, konieczne staje się kolejne wywołanie algorytmu, zawsze jednokrotne - niezależnie od tego, dla ilu węzłów nie udało się określić przyporządkowania po pierwszym wykonaniu, które powoduje podwojenie ilości wykonywanych operacji.

W przypadku algorytmu Dijkstry, dla naszego zadania, złożoność obliczeniowa badania dla wszystkich węzłów wynosi  $n^3$ , przy czym można zauważyć, że ponieważ algorytm będziemy wykonywać tylko dla ok. 20% węzłów, więc można przyjąć, że złożoność jest nie

większa niż  $n^2$ , a współczynnik  $c$  przybliża ilość węzłów, dla których jest wykonywane zadanie, zatem reasumując:

$$T_D(n) = c \cdot n^2.$$

### 3.12. Wybór wykorzystywanych algorytmów i struktur danych

Wybór algorytmu Floyda-Warshala jako algorytmu wykorzystywanego w badaniu prezentowanego zagadnienia został podyktowany jego prostotą, ale nic nie stoi na przeszkodzie, by zastąpić go jakimkolwiek innym algorytmem, mającym zastosowanie w problemach klasy TSP (z ang. *Travel Salesman Problem* – Problem Komiwojażera).

Jako sposób reprezentacji danych wykorzystano macierz sąsiedztwa (koincydencji). W tejże macierzy poszczególne komórki zawierają koszty wynikające z tabeli odległości drogowych pomiędzy węzłami oraz uwzględniają koszty związane z sortowaniem. W przypadku gdy pomiędzy dwoma węzłami nie ma bezpośredniego połączenia, wtedy koszt jest nieskończony.

Jako rozszerzenie zagadnienia można np. w komórkach związanych z kosztami wprowadzić zróżnicowanie z uwagi na ilości przesyłek przesyłanych pomiędzy poszczególnymi węzłami, jednak w prezentowanym rozwiązaniu przyjęto, że zawsze partią przesyłaną jest 200 przesyłek.

### 3.13. Przyporządkowanie poszczególnych węzłów podrzędnych do nadrzędnych

Wykonanie algorytmu dla zadanej sieci węzłów odbyło się przy następujących założeniach konstrukcji macierzy kosztów przejścia pomiędzy węzłami:

- koszty sortowania w węzle  $A_2$  są o 20% wyższe niż w węzłach typu A -  $A_1$  oraz  $A_3$ , gdzie można przyjąć, że są równe;
- koszty transportu w relacjach pomiędzy węzłami typu A są o 25% tańsze niż w przypadku połączeń A-B, B-C.

Dla zadanych parametrów kosztowych otrzymano następujące przyporządkowanie węzłów podrzędnych (C) do nadrzędnych (A):

- $A_1$ :  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_{12}, C_{19}$ ,
- $A_2$ :  $C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}, C_{17}, C_{20}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}, C_{42}$ ,
- $A_3$ :  $C_{26}, C_{27}, C_{28}, C_{29}, C_{30}, C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_{34}, C_{35}, C_{36}, C_{37}, C_{38}, C_{51}, C_{24}$ .

Z uwagi na charakter pracy węzłów typu B wynikający z ich funkcji oraz odległości pomiędzy nimi a węzłami typu A, postanowiono pozostawić je tak jak w rozwiązaniu empirycznym.

Porównując rezultaty z wynikami empirycznymi można zauważyć, że w stosunku do aktualnego stanu organizacji logistycznej rozwiązanie sugeruje przekazanie z węzła  $A_2$  do  $A_3$

–  $C_{24}$ , a do węzła  $A_1 - C_{12}$  oraz  $C_{19}$ . Oszczędności operacyjne związane z tymi zmianami nie są jednak duże – ok. 4% całości kosztów na cykl 24 h. Taka niewielka tylko poprawa stwierdza dużą optymalność rozwiązania empirycznego, które doskonalono przez ponad 10 lat. Przypomnijmy, że macierz kosztów oparto na danych zbliżonych do rzeczywistych.

W związku z tym konieczne są także zmiany w drodze paczki, która, jak już to stwierdzono, jest nierozzerwalnie związana z rozkładem jazdy. Na podstawie jednak powyższego przyporządkowania i informacji przede wszystkim dotyczących czasów przejazdu (rozdz. 3.14) stworzenie całościowej drogi paczki nie jest trudnym zadaniem.

### 3.14. Reguły tworzenia rozkładu jazdy

W przypadku tworzenia rozkładu jazdy dla omówionej konstrukcji systemu należy wziąć pod uwagę następujące elementy pomocnicze:

- 1) drogę paczki, rozumianą jako zbiór jednoznacznych reguł decydujących o sposobie przesyłania paczki przez system,
- 2) średnią prędkość przejazdu dla wszystkich TL (transportów liniowych) –  $V_{\text{średnia}}$ ,
- 3) ustalone krańcowe godziny przyjazdów / wyjazdów do węzłów klasy B i C,
- 4) ograniczenia związane z połączeniami z najdalej od węzłów A położonymi węzłami B i C,
- 5) godziny skrajne w relacjach transportowych pomiędzy wszystkimi węzłami typu A uwzględniające czasy przejazdów pomiędzy poszczególnymi węzłami A,
- 6) zapewnienie odpowiedniego przedziału czasowego dla sortowania w węzłach typu A, tzn. uwzględnienie czasu pomiędzy godziną przyjazdu wszystkich transportów z węzłów podległych do węzła typu A przed wyjazdem transportów w relacjach pomiędzy węzłami typu A (ewent. B) przeznaczonego na przeładunek i sortowanie.

Rozkład jazdy tworzy się z uwagi na przyjęte ograniczenia (3) oraz (5) przyjmując jako punkt odniesienia godzinę wyjazdu transportu pomiędzy węzłami typu A lub/i godzinę wysyłki TL w relacji węzeł C do A. Stosując specjalne podejście do węzłów typu B można te ograniczenia spełnić jednocześnie. Sformułujmy powyższe ograniczenia w sposób formalny:

$$t_{\text{wyjazdu}}_{C_i \rightarrow A_j} := t_{\text{wyjazdu}}_{A_j \rightarrow A_k} - 1h - (\text{odległość}_{C_i \rightarrow A_j} / V_{\text{średnia}}) \quad (1)$$

$$t_{\text{wyjazdu}}_{A_j \rightarrow C_i} := \max(t_{\text{wyjazdu}}_{A_j \rightarrow A_k} + \text{odległość}_{A_j \rightarrow A_k} / V_{\text{średnia}}) + 1h. \quad (2)$$

W analogiczny sposób można łatwo określić czasy przyjazdów do węzłów C. W przypadku węzłów typu B może zachodzić jedna z dwóch sytuacji:

- węzeł B ma połączenie wahadłowe z węzłem A; wtedy znaczenie ma reguła [3];
- węzeł B jest obsługiwany przez tylko dwa węzły A; wtedy jeden z nich jest węzłem pośredniczącym i zastosowanie główne mają reguły [1] i [2].

Biorąc pod uwagę te wskazówki stworzenie rozkładu jazdy nie jest zadaniem zbyt trudnym, jednakże uwzględnienie wszystkich powyższych ograniczeń dla każdego węzła z

sieci może być zadaniem prawie niemożliwym, a jedyna droga rozwiązania może prowadzić do nadania poszczególnym regułom priorytetów i w razie potrzeby ich korekta dla pojedynczych węzłów.

#### 4. Alternatywna droga rozwiązania problemu

Przedstawienie metaheurystyki Tabu Search ma na celu prezentację przykładowego alternatywnego rozwiązania problemu, co zostało zapowiedziane w rozdziale 3.8.

Od roku 1989, kiedy to F. Glover po raz pierwszy oficjalnie zaprezentował w *ORSA J. Computing* (Vol. 1, pp.190-206.) ideę przeszukiwania Tabu, zaproponowano już wiele różnych aplikacji tego algorytmu w dziedzinach takich, jak: logistyka, zarządzanie zasobami, czy planowanie procesu produkcji.

W celu zastosowania tej metody niezbędne jest:

- zdefiniowanie funkcji jakości (celu) oraz określenie problemu w postaci elementarnej,
- ustalenie rozwiązania początkowego, które posłuży do inicjacji zbioru rozwiązań,
- definicja sąsiedztwa,
- określenie obszarów zabronionych (tabu),
- określenie dopuszczalnych ruchów.

Zdefiniujmy zagadnienie dla potrzeb metody TS: interesuje nas problem znalezienia najbardziej efektywnej (najtańszej) drogi pomiędzy parą punktów  $X$  oraz  $Y$ . Rozwiązanie zawierać będzie węzły pośrednie, które należy przebyć w celu odbycia drogi od węzła  $X$  do  $Y$ . Obowiązuje założenie dodatkowe, że w szeregu – będącym potencjalnym rozwiązaniem – musi znaleźć się co najmniej jeden, a co najwyżej dwa węzły uprzywilejowane typu  $A$ .

Każda przebywana ścieżka wnosi pewien koszt, ponadto przejście przez każdy z węzłów generuje dodatkowe koszty związane z ich pracą. Potrzebna będzie więc *statyczna tabela kosztów* definiująca koszt przejścia pomiędzy dwoma dowolnymi węzłami.

Ważnym aspektem jest także określenie funkcji obiektywnej  $f$  (w lit. ang. *objective function*) oraz kryterium aspiracji.

Charakter przestrzeni rozwiązań  $S$  pozwalający wykorzystać metodę Tabu Search jest taki, że istniejący zbiór  $k$  ruchów  $M = \{m_1, m_2, m_3\}$  do wykonalnego rozwiązania  $s \in S$  prowadzi zwykle do  $k$  zwykle różnych rozwiązań  $M(s) = \{m_1(s), m_2(s), m_3(s)\}$ .

W zadaniu można zdefiniować trzy następujące ruchy i związane z nimi tablice przechowujące informację o już wykonanych ruchach:

- 1) zamiana węzła z szeregu będącego potencjalnym rozwiązaniem z dowolnym, *losowo wybranym* węzłem z sąsiedztwa węzłów będących w aktualnym rozwiązaniu;

informacja o wykonaniu tej operacji będzie przechowywana w dwuwymiarowej *tablicy zamian*; jest to element dywersyfikacji rozwiązania;

- 2) usunięcie (wybicie) wężła; jednowymiarowa tablica wybitych węzłów;
- 3) dodanie wężła do szeregu rozwiązania; jednowymiarowa tablica dodanych węzłów.

W związku z trzecim ruchem przy modyfikacji Tabu List (listy ruchów zabronionych w algorytmie) należy wziąć także pod uwagę, że ruchem zabronionym byłoby np. dodanie do szeregu trzeciego wężła typu A.

Główna faza została skonstruowana jako połączenie dwóch procesów:

- wykonania podstawowego metody Tabu Search, które opiera się na wygenerowaniu i zaktualizowaniu *listy najlepszych rozwiązań*, przy czym umieszczenie w liście jest równoznaczne z tym, że w każdej iteracji najlepsze ze wszystkich rozwiązań jest rozważane niezależnie, o ile zawiera lub nie składniki tabu albo spełnia kryteria aspiracji (na poziomie celu), wynikające z analizy sąsiedztwa;
- procesu intensyfikacji, którego zadaniem jest redukcja możliwych rozwiązań m.in. poprzez wywoływanie procedury *Local Search* w stosunku do już uzyskanego zbioru wyników (najlepszych tras). W celu intensyfikacji rozwiązania (redukcja częstotliwości ruchów) należałoby wprowadzić ograniczenie równe  $\sqrt{n}$ , gdzie  $n$  jest liczbą węzłów. Przy ilości węzłów 50 funkcja kary wynosiłaby więc 7.

Procedura Tabu Search zawiera w sobie także elementy dywersyfikacji rozwiązania, tzn. różnicowania procesu doboru węzłów z sąsiedztwa.

Niech będzie także dany podzbiór  $N(s) \in M(s)$  wykonalnych rozwiązań, zwany sąsiedztwem  $s$ . Metoda rozpoczyna od rozwiązania początkowego, za które często w literaturze przyjmuje się rozwiązanie empiryczne  $s_0 \in S$  (zobacz także [3]) w przeszukiwanej przestrzeni rozwiązań  $S$ . Następnie ustala się sekwencję rozwiązań  $s_0, s_1, \dots, s_n \in S$ . W każdej iteracji  $s_{j+1}$  jest wybierane spośród sąsiedztwa  $N(s_j)$ . Proces wyboru najpierw określa zbiór tabu  $T(s_j) \subseteq N(s_j)$  spośród sąsiedztwa  $s_j$  i zbiór aspirantów  $S(s_j) \subseteq T(s_j)$  z sąsiedztwa tabu. Kolejnym rozwiązaniem  $s_{j+1}$  jest sąsiedztwo, które albo jest aspirantem albo nie tabu (ruchem zabronionym), dla którego wartość funkcji obiektywnej  $f(s_{j+1})$  jest minimalna.

Można zauważyć, że jest możliwe, a nawet wskazane, w celu uniknięcia zatrzymania w lokalnym minimum, zastosowanie odpowiednich warunków dla sąsiedztwa. Przykładowo ruch  $m$ , może być tabu, jeżeli prowadzi do rozwiązania, które zostało już rozważone w czasie ostatnich  $q$  iteracji (warunek krótkoterminowy, w lit. ang. *recency* lub *short-term condition*) lub było powtórzone wiele razy wcześniej (częstotliwość lub warunek długoterminowy – w lit. ang. *frequency* lub *long-term condition*) [7].

Oczywiście, w celu jednoznacznego określenia przynależności (podporządkowania) węzła najniższej klasy C do węzła uprzywilejowanego typu A konieczna będzie analiza wyników służąca selekcji węzłów nadrzędnych najczęściej pośredniczących w dotarciu od węzła podrzędnego.

## 5. Metody wykorzystywane w światowych badaniach operacyjnych

W poprzednim rozdziale opierając się na analizowanym problemie zaprezentowano pokrótce ideę działania metaheurystyki Tabu Search.

Metoda ta jest dziś szeroko wykorzystywana w badaniach operacyjnych na świecie, czego dowodem jest spora liczba opracowań, pokazujących adaptację Tabu Search, umieszczonych w materiałach konferencyjnych CASPT 2000, która miała miejsce w czerwcu ubiegłego roku w Berlinie [1].

Poniżej omówiony zostanie problem transportowy MinMax jako najbliższy problemowi rozważanemu w artykule, ponadto pokrótce przedstawione zostaną systemy: koordynujący obsługę w oparciu o ustalony rozkład jazdy i obsługę na żądanie (w lit. ang. *fixed route service with demand-responsive transit one*) oraz wspomagający planowanie zmian w przedsiębiorstwie autobusowym.

### 5.1. Problem transportowy typu MinMax

Artykuł Delgado Serna i Pacheco Bonstro z Wydziału Ekonomii Stosowanej na Uniwersytecie w Burgos (Hiszpania) pod tytułem *MINMAX Vehicle Routing Problem: Application to School Transport in the Province of Burgos* prezentuje problem o założeniach w dużej mierze analogicznych do omawianego transportu przesyłek.

Rozważane zagadnienie to problem transportu uczniów, którzy muszą zostać przewiezieni z szeregu geograficznie rozproszonych lokalizacji do szkoły. Niech szkoła będzie oznaczona 1, reszta punktów  $i=2..n$ , a funkcja  $q(i)$  określa liczbę uczniów, którzy wsiadają na poszczególnych przystankach  $i$ ,  $i=2..n$ . Przy założeniu, że uczniowie z tego samego przystanku są przewożeni tym samym autobusem, a czas przejazdu nie przekracza określonego czasu  $t_{max}$ , należy, dysponując określoną liczbą autobusów  $m$  o ładowności  $Q$ , zrealizować zadanie transportowe.

Pierwsze podobieństwo problemów jest związane z aspektem ograniczenia czasowego w dwóch płaszczyznach – transport musi odbyć się najkrótszą (najszybszą) trasą i dotrzeć do celu w określonym przedziale czasowym. Autorzy pracy przyjmują, że czas przejazdu jest liczony od pierwszego przystanku, a koszt przejazdu jest związany nie tylko z odległości i liczbą przystanków, ale także ilością przewożonych uczniów. Rozwiązanie jest związane z



dwuczęściową heurystyką – pierwszy krok to szereg procesów Lokalnych Przeszukiwań (*Local Search Method*), a drugi to proces Tabu Search zastosowany do wyników otrzymanych w poprzednim kroku.

W pierwszej części rozwiązano problem „socjalny” określając nowy maksymalny czas przejazdu, przyjęty w drugiej fazie jako ograniczenie. Zaproponowana procedura *Local Search* polega na wymianie łańcuchów różnych rozmiarów punktów (przystanków) pomiędzy trasami w oparciu o przyjętą strukturę danych (typ sąsiedztwa *Cross Exchange Neighbourhood*) i wyborze najlepszej iteracji. Sam mechanizm można prawie bezpośrednio zastosować do opisywanego w artykule problemu (por. rozdz. 4).

W ostatecznym rozwiązaniu drugiej fazy metody Tabu Search, porównując metodę polegającą na zamianie, w której jednym z uczestniczących łańcuchów był ten z najdłuższą drogą, z metodą wszystkich zamian, uzyskano rozwiązanie tylko w niewielkim stopniu efektywniejsze niż przy przeglądaniu wszystkich dróg. W tej fazie przyjęto jako stałą średnią szybkość autobusu 60 km/h [1] tak samo jak w rozpatrywanym problemie.

## 5.2. Zintegrowany system transportowy

Rozwój zintegrowanych usług transportowych, będący przedmiotem pracy M. Hickman i K. Blume (*A Method of Scheduling Integrated Transit Service*), składa się z dwóch głównych zadań wynikających z planowania zgodnego z potrzebami pasażerów oraz ekonomicznego wykorzystania środków transportu. Zakłada się, że środek transportu paratranzytowy zabiera pasażera z punktu źródłowego do właściwego przystanku na ustalonej trasie wg tradycyjnego rozkładu jazdy, którego autobus może zawieźć klienta do miejsca końcowego, lub ostatnia faza podróży może być także realizowana przez dodatkowy transport (paratranzyt).

Przy przyjęciu określonych praktycznych ograniczeń takich, jak: redukcja czasu oczekiwania na przesiadkę, minimalizacja ilości punktów transferowych (przesiadek), czas wsiadania i wysiadania i pojemność środków transportu oraz minimalny poziom świadczonych usług zaproponowano rozwiązanie będące rozwinięciem metody C. Liaw (*A Decision Support System for the Bimodal Dial-a-Ride Problem - 1996*) związane z wyznaczeniem okręgów wokół miejsc startu i końca trasy przejazdu pasażera. Założono także np., że odległość pomiędzy punktem startowym a przeznaczenia musi być wystarczająco duża, żeby pasażer nie był w stanie odbyć podróży bez pomocy, ale wystarczająco krótka, aby wykorzystanie pojedynczej linii paratranzytowej było korzystniejsze finansowo dla agencji niż kombinacja transportu o ustalonych liniach i para.

Określenie praktycznej minimalnej odległości pomiędzy miejscem początku i końcem przejazdu ma zatem bezpośredni wpływ na poziom obsługi, łagodzący także całkowity brak elastyczności systemu. Biorąc pod uwagę całkowity dystans podróży jedną z metod kalkulacji wielkości okręgu jest procent odległości pomiędzy punktem źródłowym i

docelowym podróży, a posiadając wynikową podsić wykonalnych „nóg” paratranzytowych konieczna jest konstrukcja zintegrowanych z nimi wykonalnych rozkładów jazdy, co jest równoznaczne z rozwiązaniem problemu najkrótszych ścieżek z oknami czasowymi. Ostatecznie wstępne oszacowanie stwierdza 15% oszczędności kosztów operacyjnych agencji dzięki wykorzystaniu zintegrowanych usług transportowych [1].

### 5.3. Planowanie zmian

Wśród artykułów konferencyjnych znaleźć można opracowanie dotyczące planowania zmian kierowców *TabuSearch for Driver Scheduling* (Y. Shen, R. Kwan).

Wprawdzie problem harmonogramu pracy kierowców należy do dobrze znanych problemów NP-zupełnych, ale jest ogólnie możliwe uzyskanie optymalnego rozwiązania. Nawet jeśli metody matematycznie nie są w stanie rozwiązać dużych problemów w jednym kroku, to problem podziału nieuchronnie prowadzi do obniżenia optymalności w złożonym rozwiązaniu. Metody liniowe takie jak Branch&Bound są ograniczone przez rozmiar przestrzeni przeszukiwania, który może zostać zbadany w rozsądnym czasie. Z tego właśnie powodu proces rozwiązania przy użyciu Programowania Liniowego (w ang. *Integer Linear Programming – ILP*) może być przykładowo zakończony przed znalezieniem jakiegokolwiek rozwiązania liczbowego.

Podejście HACS prezentowane w artykule bazuje na reprezentacji zagadnienia w oparciu o sekwencję połączeń. Połączenia i ich aktywne możliwe łączniki tworzą przestrzeń rozwiązań. Ponadto dozwolone są niewykonalne natychmiastowe rozwiązania, które podwyższają szansę ucieczki z lokalnego optimum. W celu pozbycia się niedopuszczalnych rozwiązań i spełniania obiektywnych oczekiwań w modelu zastosowano cztery struktury sąsiedztwa występujące w ciągu. Trzy z nich koncentrują się na zagęszczeniu połączeń z ustalonymi, aktywnymi możliwymi do zrealizowania łącznikami, a jeden z nich rozpatruje zmienne aktywne możliwości łączników podczas rekonstrukcji połączeń [1].

Podsumowując, HACS ma spore szanse znaleźć ogólne zastosowanie do rozwiązywania problemu planowania zmian kierowców. Rozpoczynając działanie od przybliżonego rozwiązania początkowego, rozwiązuje skomplikowane problemy przez proste dostosowanie wagi funkcji kosztu i funkcję kary do reguł ustalonych w przypadku problemu szczególnego.

Ciekawym zagadnieniem wykorzystującym podobną metodykę rozwiązania jest np. problem zaplanowania rozkładu zajęć w szkole *Tabu Search Techniques for Large High-Schools* [6]. Stosując macierz wymagań (zajęcia) oraz dwie binarne macierze ograniczeń (okres dostępności nauczyciela i sali) autor dowodzi, że pomimo przyjęcia szeregu praktycznych warunków tylko ok. 90-95% zajęć jest możliwa do zaplanowania tą właśnie metodą.

## 6. Podsumowanie

Przeprowadzone prace nad minimalizacją kosztu globalnego w systemie przesyłającym duże ilości przesyłek pomiędzy węzłami w cyklu dobowym miały na celu opracowanie optymalnej drogi paczki. W oparciu o nią wypracowano wstępne reguły dotyczące układania rozkładu jazdy. Zrealizowane elementy mogą stać się fragmentem logistycznego systemu doradczego.

Całościowy system decyzyjny umożliwiający menadżerowi firmy logistycznej badanie skutków różnych wariantów decyzyjnych powinien pozwalać na:

- modelowanie sieci dystrybucyjnej, w tym lokalizację centrów logistycznych, baz magazynowo-transportowych, węzłów transportowych, kształtowanie połączeń komunikacyjnych pomiędzy nimi,
- planowanie przewozów oraz przemieszczeń (marszrutyzacja), wybór najlepszych kanałów dystrybucji,
- efektywne zarządzanie taborem transportowym, tzn. optymalizację wykorzystania ilości środków transportowych w ustalonej strukturze sieci komunikacyjnej,
- analizę niezbędnych ilości środków transportu na poszczególnych trasach w przypadku stałego i zmiennego rozptyłu towarów w sieci [2].

Dalsze badania mogłyby rozwijać kolejne funkcje takiego systemu lub skierować się w stronę przeprowadzania symulacji związanych z modyfikacjami drogi paczki jako podstawy rozważanego w artykule systemu logistycznego. Warto rozważenia jest także wykorzystanie algorytmu Tabu Search w analizie wielokryterialnej dużej sieci (zawierającej kilka tysięcy węzłów) o charakterystyce określonej w artykule.

## LITERATURA

1. Materiały z 8 Konferencji: „Computer Aided-Scheduling of Public Transport CASPT 2000”, czerwiec 2000, Berlin, Niemcy ([www.winforms.phil.tu-bs.de/caspt](http://www.winforms.phil.tu-bs.de/caspt)).
2. Materiały ze stron organizacji logistycznych ([www.petrus.waw.pl](http://www.petrus.waw.pl), [www.logistyka.net.pl](http://www.logistyka.net.pl)).
3. Szołtysek M.: Rozwiązywanie problemu dostawy za pomocą algorytmu przeszukiwania Tabu, ZN Pol. Śl. Studia Informatica, vol. 37, Gliwice 1999.
4. Szołtysek M.: Problem wyznaczania połączeń autobusowych, ZN Pol. Śl. Studia Informatica, vol. 41, Gliwice 2000.
5. Widuch J.: Problem wyznaczania połączeń w sieciach komunikacyjnych, ZN Pol. Śl. Studia Informatica, vol. 46, Gliwice 2001.

6. A.Schaerf: Tabu Search Techniques for Large High-School Timetabling Problems, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 29(4), 368-377.

Recenzent: Dr inż. Mariusz Boryczka

Wpłynęło do Redakcji 27 grudnia 2001 r.

### Abstract

The article describes a TSP type problem connected with parcels transport between nodes using constant communication lines. There are two aspects considered: the way of parcel (check out e.g. Fig.1), which is defined as an algorithm what way should be parcel transported from a source to a destination node, and timetable for transport creation.

The presentation of the process cost-analyses that is defined as the transport class problem, presents adaptation results of classical transport algorithms such as Dijkstra and Floyd-Warshall ones. The solution takes into account the implementation of above mentioned algorithms considering their content modification and selection of results according to given assumptions. The results are compared to empiric ones.

Next chapter points out Tabu Search algorithm as an alternative, feasible solution. A possible application is discussed together with some motions how the execution of algorithm could be speed up due to some preliminary assumptions e.g. choosing a better initial solution.

The usage of Tabu Search method is compared to works carried out on universities over the whole world. Therefore some works presented during the conference CASPT-2000 are described.

Last chapter shows a possible extension of the problem and possible further works that can be undertaken in order to create the whole management system connected with the presented transportation problem.