

SZCZEPAŃSKI Emilian<sup>1</sup>

## Model optymalizacyjny planu dostaw ładunków na obszarach zurbanizowanych w wieloszczeblowym systemie dystrybucji

### WSTĘP

Modelowanie i rozwiązywanie zadań optymalizacji w transporcie jest ważnym elementem w projektowaniu i eksploatacji systemów transportowych oraz ich efektywnego wykorzystania. Jednakże należy rozróżnić badania prowadzone w dziedzinie transportu ładunków czy pasażerów, obszaru na jakim transport jest realizowany a w szczególności rodzaju środka transportowego. W niniejszej pracy poświęcono uwagę przewozom ładunków transportem drogowym w obszarach miejskich.

Transport towarów jest ważnym czynnikiem umożliwiającym rozwój gospodarczych i społecznych w obszarach miejskich. Dobrze zorganizowany transport ma charakter stymulujący [8]. Funkcje transportu ładunków w miastach obejmują m.in. zaopatrzenie sklepów oraz miejsc pracy i wypoczynku, jak i z gospodarkę odpadami. Dystrybucja ładunków jest istotnym elementem łańcucha dostaw. Jest to proces polegający na planowaniu oraz kontroli fizycznego przemieszczania wyrobów gotowych z miejsca nadania do miejsca przeznaczenia. Wymaga ona stosowania podejścia systemowego, które uwzględnia szereg aspektów np.: czynniki ekonomiczne, dostępność infrastruktury, bezpieczeństwo uczestników ruchu czy chociażby stochastyczny charakter procesu ruchu [2], [9], [10].

Z drugiej strony transport towarowy jest głównym czynnikiem niepokojącym i utrudniającym życie społeczne mieszkańców aglomeracji miejskich. Jest więc ważnym obszarem dla którego należy poszukiwać efektywnych rozwiązań usprawniających, co bezpośrednio jest powodem prowadzenia intensywnych prac w zakresie modelowania takich systemów [18], [19], [23].

Negatywny wpływ transportu na obszarach zurbanizowanych można ograniczyć poprzez odpowiednie gospodarowanie infrastrukturą transportową czy odpowiednio ukierunkowaną politykę miasta. Usprawnienie obsługi logistycznej miast to przede wszystkim zmniejszenie ruchu pojazdów wysokotonażowych w miastach, mające na celu zmniejszenie kongestii, zanieczyszczenia środowiska, a także zwiększenie bezpieczeństwa ruchu. Efekt taki można uzyskać poprzez efektywne planowanie transportu, a w tym m.in. zwiększenie wykorzystania środków transportowych i minimalizację długości tras dostawy. Wiąże się to również z zastosowaniem odpowiednich metod i sposobów dystrybucji [1].

W niniejszym artykule przedstawiono wybrane aspekty modelowania systemów dystrybucji ładunków na obszarach miejskich. Uwzględniono ponadto dane losowe oraz wektorową funkcję kryterium w zadaniu optymalizacyjnym. Przedstawiono również problematykę rozwiązania sformułowanego zadania optymalizacyjnego.

### 1 WIELOSZCZEBŁOWY SYSTEM DYSTRYBUCJI

W związku z koniecznością poprawy jakości transportu ładunków na obszarach miasta a w tym poprawy jego efektywności konieczne jest poszukiwanie sposobów organizacji dystrybucji ładunków pozwalających na zmniejszenie pracy przewozowej. Wiąże się z tym także lepsze wykorzystanie środków transportu, a także niższe koszty operacyjne usługodawcy [20].

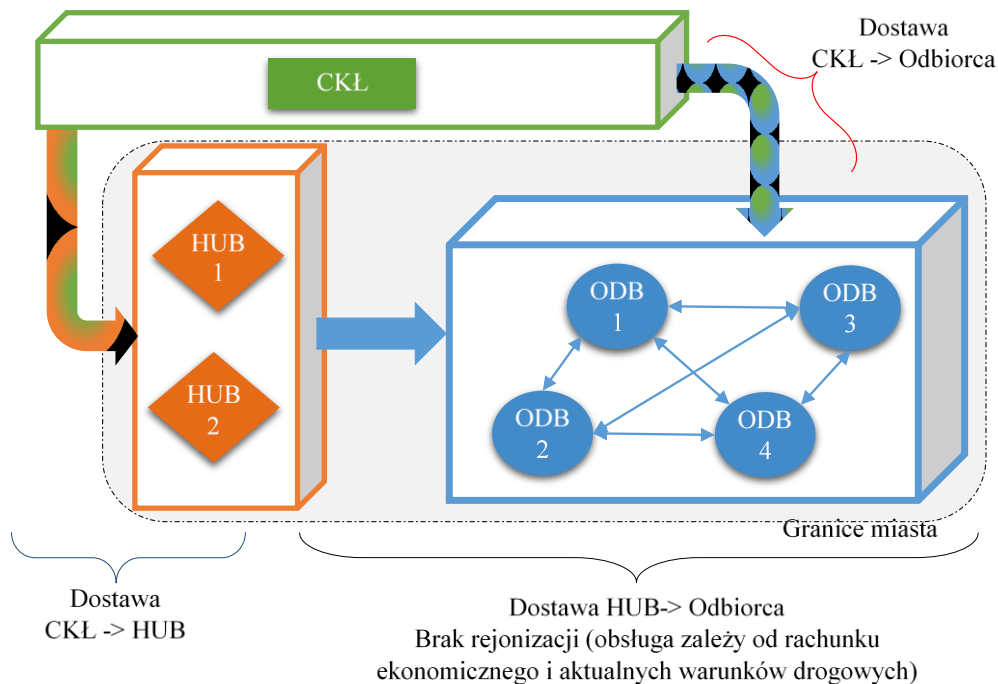
Jedną z metod obsługi jest wprowadzenie wieloszczeblowych systemów dystrybucji ładunków. Dystrybucję ładunków odbywa się tu za pośrednictwem obiektów magazynowych zlokalizowanych na

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, 00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75

obrzeżach miasta (Centra konsolidacji ładunków – CKŁ), a także w jego granicach (HUBy przeładunkowe). Obiekty te pełnią np. funkcje magazynowania, kompletacji, czy rozdziału ładunków na poszczególne trasy (na mniejsze pojazdy). Wśród wieloszczeblowych systemów dystrybucji należy wyróżnić przede wszystkim system dwuszczeblowy oraz system mieszany [10], [17].

W dwuszczeblowym systemie dystrybucji rolę nadawcy ładunku pełni centrum konsolidacji ładunków (CKŁ). Są to obiekty magazynowe zlokalizowane poza granicami miasta. Elementem pośrednim (drugim poziomem hierarchii) są HUBy przeładunkowe, które rozmieszczone są w dzielnicach przemysłowych miast, a ich lokalizacja zapewnia zarówno dobre połączenie z odbiorcami jak i z CKŁ. Dostawy z CKŁ po kompletacji i rozdziale trafiają do HUBów przeładunkowych zlokalizowanych w miastach. Tam ładunki ponownie są przeładowywane i dostarczane do odbiorców. Przewozy w relacji CKŁ-HUB realizowane są pojazdami wysoko tonażowymi, a relacja HUB-odbiorcy obsługiwana jest przez pojazd nisko tonażowy. System dwuszczeblowy charakteryzuje się silną hierarchią i brak jest przejścia bezpośredniego między nadrzędnym jej elementem czyli CKŁ, a odbiorcami (najniższym poziomem w hierarchii).

Umożliwienie realizacji dostaw bezpośrednich w systemie dystrybucji powoduje przejście w system mieszany (rysunek 1). Występuje tu zatem dystrybucja z wykorzystaniem dwóch szczebli dystrybucji oraz jednego szczebla. W systemie takim CKŁ realizują dodatkowo (obok czynności magazynowych) czynności kompletacyjne (wg zamówień odbiorców) i dystrybuują ładunki do klientów zlokalizowanych w obszarze miasta. W dystrybucji ładunków w relacji CKŁ-odbiorcy stosuje się pojazdy nisko tonażowe [1], [3], [10].



Rys. 1. Mieszany system dystrybucji bez rejonizacji obsługi klientów przez huby przeładunkowe

Dobór pojazdów dystrybucyjnych w każdym z systemów dyktowany jest przede wszystkim koniecznością zapewnienia elastyczności w realizowaniu usług. Stosuje się dlatego pojazdy, które pozwalają uniknąć ograniczeń występujących na sieci transportowej miasta (dopuszczalna masa całkowita pojazdu na danym połączeniu), a także ograniczeń dotyczących czasu jazdy kierowcy (co ma miejsce w przypadku pojazdów o DMC > 3,5t).

W wieloszczeblowych systemach dystrybucji stosuje się rejonizację obsługi klientów. W przypadku przedstawionej koncepcji zrezygnowano z takiego podejścia. Znacznie ono ogranicza poszukiwania rozwiązań ekonomicznie efektywnych i powoduje błędzenie wśród minimów lokalnych (z punktu widzenia optymalizacji kosztów).

W przedstawionych systemach istnieje możliwość dodawania kolejnego szczebla po przez realizację przewozów między HUB'ami. System taki staje się wtedy hierarchiczny czyli wyróżnia huby nadrzędne i podrzędne. W miastach jest to jednak niespotykana forma organizacji dystrybucji.

## 2 WIELOKRYTERIALNA OPTIMALIZACJA PLANU DOSTAW

Zadanie optymalizacji wielokryterialnej polega na sformułowaniu wektorowej funkcji kryterium składającej się z funkcji cząstkowych dążących do ekstremum np.  $F(f_1, f_2, f_3) = \langle f_1(x), f_2(x), f_3(x) \rangle$ . Funkcja w takiej postaci jest przedmiotem niniejszego artykułu. Możliwe rozwiązania sformułowanego zadania optymalizacyjnego klasyfikują się do przestrzeni rozwiązań zdominowanych i niezdominowanych czyli paretooptimalnych. Rozwiązania takie są rozwiązaniami dopuszczalnymi charakteryzującymi się poprawą wartości jednego z kryteriów kosztem pogorszenia wartości pozostałych. Wybór rozwiązania zależy od indywidualnych preferencji decydenta co ma na celu zawężenie przestrzeni rozwiązań akceptowalnych.

Zatem zdefiniowano wektorową funkcję kryterium, składającą się z kryteriów cząstkowych (wzór 1):

$$F(G_1, G_2, G_3) = \left[ \begin{array}{l} E(G_1(XA, XC, YA, YB)) \longrightarrow \min \\ G_2(XA, XB) \longrightarrow \max \\ G_3(XA, XB) \longrightarrow \min \end{array} \right] \quad (1)$$

Pierwsza funkcja cząstkowa to G1 (wzór 2), dotyczy minimalizacji kosztów realizacji planu przewozów. W celu zapewnienia przejrzystości zapisu podzielono ją na pięć składowych odpowiednio G11, G12, G13, G14, G15. Przy czym funkcja G14 oraz G15 zostały dodatkowo podzielone na trzy części. Uwzględnia ona koszty funkcjonowania obiektów magazynowych czyli CKŁ (G11) oraz HUB (G12), koszty karne za opóźnienia w obsłudze bądź brak obsługi danego odbiorcy (G13), koszty dostawy ładunków wynikające z przebiegu pojazdów(G14) oraz czasu pracy kierowców(G15), a także. Niektóre dane wchodzące w skład funkcji kryterium są zmiennymi losowymi, a do wyznaczenia funkcji G1 użyto ich wartości oczekiwanych. Z powyższego wynika, iż funkcja G1 również będzie wartością oczekiwaną kosztów realizacji planu dostaw.

$$E(G_1(XA, XC, YB)) = \left[ \begin{array}{l} G_{11}(XA) + G_{12}(XA) + E(G_{13}(XA, XC, YB)) + \\ G_{141}(XA) + E(G_{142}(XA)) + E(G_{143}(XA, YA)) + \\ G_{151}(XA) + G_{152}(XA) + G_{153}(XA, YA) \end{array} \right] \quad (2)$$

Jednym z istotnych czynników wpływających na jakość obsługi jest realizacja zakładanego planu przewozów. Należy przez to rozumieć obsłużenie bądź nie obsłużenie klientów zgodnie z ustalonym planem, w wyznaczonych przedziałach czasu [3]. W ramach powyższego założenia sformułowano dwie kolejne funkcje kryterium związane są z prawdopodobieństwem poprawnej realizacji planu przewozu. Funkcje G2 i G3 zostały podzielone na dwie części odpowiednio G21 i G22 oraz G31 i G32. Wynika to z konieczności wyodrębnienia składnika funkcji reprezentującego trasy w których obsługiwany jest tylko jeden odbiorca i trasy w których obsługiwanych jest więcej odbiorców.

Funkcja G2 (wzór 3) oznacza prawdopodobieństwo że zaplanowana obsługa odbiorców odbędzie się w oknach czasowych.

$$G_2(XA, XB) = \prod_{b=1}^{\bar{B}} \left[ \mu(b) \cdot G_{21}(XA, XB) + \lambda(b) \cdot \left( G_{21}(XA, XB) \cdot \prod_{m=2}^{\bar{M}} G_{22}(XA, XB) \right) \right] \quad (3)$$

Gdy z planu dostaw wynika że odbiorca (w oparciu o rachunek ekonomiczny) ma być obsłużony poza oknem czasowym to dla takiego składnika funkcji G2 należy przyjąć wartość 1.

Funkcja  $G3$  (wzór 4) oznacza prawdopodobieństwo, że odbiorcy zaplanowani do obsłużenia nie zostaną obsłużeni co z kolei spowoduje wzrost kosztów. Nie obsłużenie odbiorców może być spowodowane jedynie przekroczeniem czasu  $\omega$ . Istnieje jednak możliwość nie umieszczenia odbiorcy w planie dostaw co z kolei może być efektem rachunku ekonomicznego. Funkcję  $G3$  określono jako ryzyko nieobsłużenia zaplanowanych odbiorców. Zakłada się, iż odbiorca nie jest obsłużony jeżeli nie został dostarczony mu ładunek w liczbie równej jego zapotrzebowaniu.

$$G3(XA, XB) = \prod_{b=1}^{\bar{B}} \left[ \mu(b) \cdot G31(XA, XB) + \lambda(b) \cdot \left( G31(XA, XB) \cdot \prod_{m=2}^{\bar{M}} G32(XA, XB) \right) \right] \quad (4)$$

Funkcje  $G2$  i  $G3$  odnoszą się tylko do odbiorców których obsłużenie zostało zaplanowane. W funkcji kosztu uwzględniono wszystkich odbiorców zgłaszających zapotrzebowanie, a koszt ich nieobsłużenia uwzględniono w funkcji kary.

Wskaźniki  $\mu(b)$  oraz  $\lambda(b)$  określają typ realizowanej trasy dystrybucyjnej. Mianowicie w przypadku gdy w trasie obsługiwany jest jeden klient to  $\mu(b) = 1$ , a  $\lambda(b) = 0$  w przeciwnym przypadku tj. gdy na trasie jest więcej niż jeden klient  $\mu(b) = 0$  a  $\lambda(b) = a$ . To generuje założenie, że  $\forall b \in \bar{B} \quad \mu(b) + \lambda(b) = 1$ .

W związku z powyższym należy wyznaczyć takie wartości poszczególnych **zmiennych decyzyjnych** aby wartości funkcji cząstkowych dążyły do ekstremów lokalnych w taki sposób aby globalna funkcja wektorowa dążyła do rozwiązania pareto optymalnego.

Wspomniane zmienne decyzyjne scharakteryzowano następująco:

- $XA = [X1, X2, X3, X4]$  - Wielkości przewozu między punktami nadania i przeznaczenia
- $XB = [XTSA, XTSA]$  - Chwili początku  $b$ -tego kursu dystrybucyjnego realizowanego z CKŁ oraz z HUB
- $XC = E(XTSO)$  - Oczekiwany moment początku obsługi danego odbiorcy
- $YA = [Y1, Y2, Y3]$  - zmiennych binarnych określających istnienie połączenia powrotnego we wszystkich trasach przewozowych
- $YB = [Y4, Y5]$  - planowane opóźnienia lub nieobsłużenie odbiorców

Do rozwiązania sformułowanego zadania niezbędnym jest ustalenie **danych wejściowych** dotyczących:

- struktury sieci transportowej w tym zbioru nadawców, punktów pośrednich i odbiorców;
- odległości między poszczególnymi elementami sieci transportowej
- wartości oczekiwanych czasu przejazdu danym połączeniem transportowym będącego zmienną losową o znanym lub dającym się ustalić rozkładzie;
- wartości oczekiwanych czasu trwania operacji ładunkowych u nadawców, w punktach pośrednich oraz u odbiorców będącego zmienną losową o znanym lub dającym się ustalić rozkładzie;
- zapotrzebowania odbiorców;
- okien czasowych u odbiorców;
- kosztów, w tym:
  - kosztów stałych - funkcjonowania CKŁ, funkcjonowania HUB'ów, realizacji pojedynczego kursu pojazdu, zatrudnienia kierowcy;
  - kosztów jednostkowych - przejścia jednostki ładunkowej przez CKŁ, przejścia jednostki ładunkowej przez HUB, zatrudnienia kierowcy, przewozu jednej jednostki ładunkowej dla różnych relacji, przejazdów próżnych;
  - kosztów karnych: za opóźnienia w obsłudze danego odbiorcy, za nieobsłużenie danego odbiorcy;
- pojemności CKŁ i HUB'ów w liczbie jednostek ładunkowych;
- pojemności pojazdów danego typu;
- DMC (dopuszczalnej masy całkowitej) pojazdów danego typu;

- dopuszczalnych dobowych czasów pracy kierowcy danego typu;
- liczby dostępnych pojazdów danego typu;
- liczby dostępnych kierowców danego typu;

Podczas rozwiązywania zadania należy spełnić **ograniczenia** wynikające z charakterystyki sieci transportowej oraz cech jej elementów. Uwzględnić należy m.in. następujące ograniczenia i założenia:

- zdarzenia opisane zmienną losową są niezależne;
- wielkość dostaw do odbiorcy nie może być większa od jego zapotrzebowania;
- wielkość dostaw przychodzących z CKŁ do HUB'a musi być równa wielkości dostaw wychodzących z HUB'a;
- liczba ładunków wychodząca z CKŁ nie może być większa niż zapotrzebowanie odbiorców;
- ładowność pojazdu danego typu podczas realizacji kursu nie może zostać przekroczona;
- pojazd wyjeżdżający z CKŁ musi do niego powrócić;
- pojazd wyjeżdżający z HUB'a musi do niego powrócić;
- liczba ładunków wychodzących z CKŁ nie może być większa od jego pojemności;
- liczba ładunków wychodzących z HUB'u nie może być większa od jego pojemności;
- czas pracy kierowcy nie może zostać przekroczony;
- poprawna obsługa rozpoczyna i kończy się w oknie czasowym;
- Klienci mogą zostać obsłużeni w pełni, częściowo lub wcale.

Sformułowana funkcja kryterium bierze uwzględnia interesy wielu uczestników procesu transportowego realizowanego w mieście, w tym nadawców ładunków, przewoźników, odbiorców oraz mieszkańców miast. Poprawnie zaplanowana obsługa zmniejsza pracę przewoźniczą wykonaną w obszarze miasta, zmniejsza koszty operacyjne przewoźnika, a co za tym idzie koszty przewozu, a także wpływa na jakość obsługi i zadowolenie klientów. Mniejszy ruch w obszarze miasta to również korzyści dla mieszkańców chociażby w postaci zwiększenia bezpieczeństwa czy zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska.

Zadanie optymalizacyjne przedstawiono w postaci uwikłanej i mają one za zadanie wskazanie obszaru poszukiwań rozwiązania. Nie skupiono się na przedstawieniu formalnego zapisu matematycznego modelu z powodu jego złożonego zapisu.

### 3 PROBLEMATYKA ROZWIĄZANIA SFORMUŁOWANEGO PROBLEMU WYZNACZANIA PLANU DOSTAW

W oparciu o zaprezentowaną koncepcję modelu możliwe jest sformułowanie wielu zadań optymalizacyjnych biorąc pod uwagę różne kryteria i ograniczenia. Należy podkreślić klasyczny problem dystrybucji ładunków pod kątem najniższego kosztów, ale również np. implementację kryteriów związanych z emisją zanieczyszczeń. Określone kryteria jednoznacznie definiują rozważany problem oraz punkt widzenia czy to operatora logistycznego czy np. mieszkańca miasta. Sformułowane zadanie wymagało również przyjęcia pewnych ograniczeń pozwalających na odwzorowanie rzeczywistego problemu w sposób możliwie najdokładniejszy. Do rozwiązania zadania konieczne jest przyjęcie ograniczeń i założeń obejmujących np. ładowność, czas pracy, czy ograniczenia na połączeniach w sieci transportowej.

Powyższe informacje pozwalają klasyfikować sformułowany problem. Zatem badania w niniejszym artykule dotyczą zmodyfikowanego problemu VRP (Vehicle Routing Problem). Zadanie to jest oparte na problemie komiwojażera określanego często jako TSP (Travelling Salesman Problem), a konkretniej na jego modyfikacji czyli tak zwanym problemie wielu komiwojażerów MTSP (Multiple Travelling Salesman Problem). W odróżnieniu od problemu MTSP w zadaniu VRP każdy środek transportu (pojazd) ma zdefiniowaną ładowność, a klient zapotrzebowanie. A zatem całkowite zapotrzebowanie klientów nie może przekraczać ładowności środka transportu. Najogólniej rozwiązanie polega na minimalizowaniu liczby pojazdów, liczby tras oraz całkowitej długości tras [5], [6].

Biorąc pod uwagę przyjęte w modelu założenia, ograniczenia i funkcje kryterium w artykule podjęta jest kombinacja różnych odmian problemów klasy VRP:

- **MOVRPTW** - Wielokryterialny problem trasowania pojazdów z oknami czasowymi
- **MDVRP** - Problem wyznaczania tras pojazdów rozbudowany o wiele baz magazynowych
- **SVRP** - Problem dostaw z danymi losowymi
- **SDVRP** - Dostawy odbywają się za pomocą pojazdów o różnej ładowności

Rozwiązanie sformułowanego problemu napotyka zatem na trzy główne problemy optymalizacyjne i decyzyjne. Pierwszym nadrzędnym problemem jest problem optymalizacji wielokryterialnej. Kolejnym jest problem wyznaczania kolejności odwiedzanych odbiorców czyli planowanie pracy pojazdów i kierowców oraz dobór tras między poszczególnymi punktami w sieci transportowej.

Zidentyfikowane problemy można rozwiązywać z wykorzystaniem zaawansowanych i nowoczesnych metod optymalizacji opartych o algorytmy dokładne, heurystyczne czy hybrydowe [13], [14], [15], [16], [22]. Do rozwiązania stosowane są metody które stosuje się również z powodzeniem w innych dziedzinach związanych z transportem kolejowym [7] czy magazynowaniem [12].

#### a) problem optymalizacji wielokryterialnej

Głównym elementem opisanego zadania w punkcie 3 jest problem optymalizacji wielokryterialnej. Problem optymalizacji z uwzględnieniem trzech kryteriów wymaga poszukiwania rozwiązań akceptowalnych z punktu widzenia każdego z nich. Idealne rozwiązanie to takie które jest najlepsze dla każdej funkcji celu, w praktyce rzadko jednak takie rozwiązanie jest osiągalne.

Optymalizacja ta może odbywać się metodami klasycznymi np. metoda ważonych celów czy metoda ograniczeń lub heurystycznymi takimi jak VEGA(VectorEvaluatedGeneticAlgorithm) lub SPEA(The StrengthParetoEvolutionaryAlgorithm).

#### b) wyznaczanie kolejności odwiedzanych odbiorców w realizacji tras oraz czasów ich realizacji

Problem ten polega na wyznaczeniu kolejności odwiedzanych odbiorców w zależności od okien czasowych i zapotrzebowania odbiorcy uwzględniając czasy przejazdu, czasy operacji ładunkowych czy czas pracy kierowcy oraz typ zaangażowanego pojazdu.

Algorytmy pozwalające rozwiązać ten problem można podzielić na dokładne zwracające rozwiązanie optymalne, a także algorytmy heurystyczne czyli zwracające rozwiązania suboptymalne inaczej racjonalne. Algorytmy dokładne skłaniają się jednak jedynie do przeglądu zupełnego możliwych rozwiązań co dla dużych zadań jest nie efektywne, ponieważ przedstawiony problem należy do klasy problemów NP-trudnych. Należy zatem stosować algorytmy heurystyczne i tu można wyróżnić algorytmy genetyczne, pszczele czy mrówkowe. Możliwe jest także stosowanie algorytmów opartych o sztuczne sieci neuronowe wymaga to jednak posiadania rozbudowanej bazy wspomagającej uczenie sieci.

#### c) wyznaczanie najlepszej ścieżki w sieci transportowej

Określenie najlepszej ścieżki w sieci transportowej jest problemem rozważanym od dawna oraz opracowano wiele metod pozwalających na niego rozwiązania. Ważne jest jednak znaczenie słowa najlepszej ścieżki. Z jednego punktu widzenia może to być droga najtańsza, najszybsza czy najkrótsza. Z innego punktu widzenia może to być problem wymagający uwzględnienia wszystkich aspektów na raz czyli wielokryterialne wyznaczanie najlepszej ścieżki. Konieczne także jest uwzględnienie losowych danych o czasie przejazdu. Uwzględnienie wszystkich przedstawionych aspektów w rozwiązaniu jest utrudnione i w znacznym stopniu ogranicza znalezienie racjonalnego rozwiązania dla globalnej funkcji kryterium. Z uwagi na powyższe w podejmowanym problemie zrezygnowano z uwzględnienia wielu kryteriów w zagadnieniu najlepszej ścieżki.

Rozwiązanie takiego problemu może być zrealizowane tak samo jak w przypadku poprzednim algorytmami dokładnymi lub heurystycznymi. Charakterystyka rozwiązywanego problemu determinuje wybór algorytmu lub przynajmniej ogranicza wybór. W przypadku podejmowanego problemu niemożliwe jest zastosowanie algorytmów dokładnych ponieważ w przypadku zmiennych losowych nie możemy być pewni co do znalezionego rozwiązania. Inaczej sytuacja wygląda gdy czasy przejazdu będące zmiennymi losowymi uwzględnimy jako wartości oczekiwane tych zmiennych. Powoduje to, iż możliwe staje się zastosowanie algorytmów dokładnych. Algorytmy heurystyczne mają zastosowanie w przypadku problemów złożonych i w takich dla których czas

obliczeń odgrywa istotną rolę. Są to algorytmy uniwersalne i mogą być stosowane w obliczeniach na danych zarówno deterministycznych jak i losowych. Wśród algorytmów dokładnych można wyróżnić algorytmy: bruteforce oraz B&B, (branch and bound), a także heurystyczny ale dokładny Dijkstra. Natomiast reprezentantami algorytmów heurystycznych np. A\*.

Tab. 1. Algorytmy rozwiązania problemów w systemach dystrybucji

Nazwa algorytmu	typ	efektywność obliczeniowa	łatwość implementacji	Zastosowanie 1 – najkrótsza ścieżka 2 – VRP 3 – Wielokryterialna
bruteforce	dokładny	niska	łatwy	1,2
branch&bound	dokładny	średnio niska	łatwy	1,2
Dijkstra's	zachłanny, heurystyczny (dokładny)	średnia	łatwy	1
Bellmana-Forda	zachłanny, heurystyczny (dokładny)	średnia	łatwy	1
A*	heurystyczny	duża	średni	1
najbliższego sąsiada	heurystyczny	niska	łatwy	2 (TSP)
genetyczny	heurystyczny	duża	średni	1,2, 3*
mrówkowy	heurystyczny	duża	średni	1,2, 3*
SPEA	heurystyczny	duża	trudny	3
VEGA	heurystyczny	średnia	średni	3

(\* pod warunkiem modyfikacji)

Charakterystykę przedstawionych metod należy traktować subiektywnie. Metody w praktyce wykorzystywane do tego typu problemów głównie są metodami heurystycznymi. Należy zauważyć, iż do danego typu zadania konieczna jest modyfikacja podstawowych algorytmów w celu dopasowania go do konkretnego zapotrzebowania. Jednoznaczny przegląd dostępnych algorytmów jest bardzo trudny do wykonania ze względu na unikalny charakter zadania. Ponadto istnieje bardzo wiele różnych modyfikacji podstawowych algorytmów i szczegółowy przegląd nie jest możliwy. Modyfikacje algorytmów często bazują na kilku różnych algorytmach podstawowych i są ich połączeniem.

## WNIOSKI

Systemy dystrybucji ładunków zawierają wiele elementów mających znaczący wpływ na jakość realizowanej usługi. Konieczne jest więc stosowanie metod pozwalających na uwzględnienie wszystkich istotnych założeń, ograniczeń oraz danych w ujęciu wielokryterialnym czyli z punktu widzenia wielu uczestników procesu dystrybucji. Przedstawiony w pracy model dystrybucji wieloszczeblowej wskazuje jedynie na obszar prowadzonych badań. Szczegółowo sformułowane zadanie jest bardzo rozbudowane i skomplikowane zwłaszcza w związku z funkcjami opartymi o prawdopodobieństwo.

Model przedstawiony w artykule pozwala na określenie głównej problematyki rozwiązywania sformułowanego zadania. Wśród głównych problemów jakie występują w tego typu zadaniach wskazano problem najlepszej ścieżki, problem trasowania pojazdów (VRP) oraz problem poszukiwania rozwiązań niezdeterminowanych czyli optymalizacja wielokryterialna.

Reasumując rozważania w niniejszym artykule, należy stwierdzić, iż istnieje wiele dostępnych algorytmów do rozważania poszczególnych problemów. Jednak zdecydowana większość z tych algorytmów nie jest dedykowana do zadań z konkretnymi ograniczeniami i założeniami. Niezbędne jest zatem opracowywanie własnych modyfikacji istniejących algorytmów (bądź opracowanie nowych metod) dopasowanych do rozwiązania konkretnego przypadku. W ramach podjętego problemu zdecydowano się na modyfikacje algorytmów heurystycznych a konkretniej wykorzystanie modyfikacji A\* (z uwzględnieniem zmiennych czasów przejazdu), algorytmu genetycznego (ze

specyficznym podejściem Pitsburg) oraz algorytmu SPEA. W procedurze algorytmu SPEA uwzględnione będą efekty pracy algorytmów rozwiązujących dwa pierwsze problemy.

*Artykuł jest efektem pracy w ramach grantu dziekańskiego pt. „Model wielokryterialnego wspomagania decyzji w zakresie obsługi transportowej odbiorców na obszarach zurbanizowanych-cz.3” realizowanego na Wydziale Transportu PW.*

### **Streszczenie**

*Obecnie w obszarze dystrybucji ładunków kładzie się duży nacisk na opracowywanie nowych rozwiązań pozwalających na ograniczenie negatywnego wpływu transportu na otoczenie przy jednoczesnym zwiększaniu efektywności transportu oraz poprawy jego jakości. Cel taki powoduje konieczność podejmowania działań w różnych obszarach transportu w tym w ramach organizacji transportu, środków transportu czy infrastruktury transportowej. W artykule przedstawiono problematykę organizacji dystrybucji w oparciu o modelowanie wielokryterialne. Model dystrybucji zakłada wieloszczeblową strukturę wykorzystującą Centra Konsolidacji Ładunków oraz HUBy przeładunkowe. Zaprezentowano trzy funkcje kryterium składające się na globalną wektorową funkcję oceny rozwiązań organizacyjnych. W zależności od stopnia skomplikowania sformułowanego zadania optymalizacyjnego stosuje się metody dokładne bądź przybliżone. W niniejszym artykule skupiono się na metodach rozwiązania problemów związanych z optymalizacją wielokryterialną dla rozważanej struktury systemu. Przedstawiono algorytmy wyszukiwania racjonalnej drogi w sieci transportowej. Wskazano również na możliwe metody rozwiązania problemu trasowania pojazdów.*

## Optimization model for cargo delivery schedule in the multilevel distribution system in urban areas

### **Abstract**

*Currently in the field of freight distribution is a placed strong focus on development of new solutions to reduce the negative impact of transport on the environment and at the same time increasing transport efficiency and improve its quality. Purpose of this makes it necessary to take action in different areas of transport including the organization of transport, means of transport and transport infrastructure. The article presents the problem of the organization of the distribution based on multi-criteria modeling. Distribution model assumes using multi-level structure with Cargo Consolidation Centres and reloading HUBs. In article were presented three criterion functions that make up the global vector function for evaluation of organizational solutions. Depending on the complexity of the formulated optimization task used methods are exact or approximate. This article focuses on methods to solve the problems of multi-criteria optimization. Search algorithms for rational path in transport network were presented. Article also points to the possible methods to solve the vehicle routing problem.*

### **BIBLIOGRAFIA**

1. Ambroziak T., Jachimowski R., Problematyka obsługi transportowej w jednoszczeblowym systemie dystrybucji. Logistyka 4/2011.
2. Gołemska E., Czajka P., Tomaszewska D., Logistyka miejska XXI wieku. Eurologistics 3/2001
3. Jachimowski R., Kłodawski M., Simulated annealing algorithms for multi-level vehicle routing problem. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, Vol. 97, 2013.
4. Jachimowski R., Szczepański E., Simulation Analysis of Vehicle Routing Problem Solution. Conference Proceedings Carpathian Logistics Congress, December 9th - 11th 2013, Cracow, Poland, EU.
5. Jachimowski R., Żak J., Pyza D., Routes planning problem with heterogeneous suppliers demand. 21st International Conference on Systems Engineering (ICSEng), pp. 434-437, 2011.
6. Jachimowski, R., & Zak, J., Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Customers Demand and External Transportation Costs. Journal of Traffic and Logistics Engineering, 1(1), 46-50, 2013.
7. Jacyna M., Gołębiowski P., Konstrukcja wykresu ruchu pociągów z zastosowaniem wieloetapowej optymalizacji. Pojazdy Szynowe nr 2, str. 1 – 14, 2014.



8. Jacyna M., Kłodawski M., Model of transportation network development in aspect of transport comodality. Proceedings of The 21st International Conference on Systems Engineering ICSEng 2011, Las Vegas, Nevada USA, str. 341-346, 2011.
9. Jacyna M., Modelowanie i ocena systemów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
10. Jacyna M., The role of Cargo Consolidation Center in urban logistic system. Urban Transport XII, WIT Press 2011.
11. Kłodawski M., Jachimowski R., Ant algorithms for designing order picking systems. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport nr 97, pp. 259-269, 2013.
12. Kłodawski M., Jacyna M., Selected aspects of research on order picking productivity in aspect of congestion problems. ICIL 2012, International Conference on Industrial Logistics 2012, Zadar, Croatia, 15th June 2012, Conference Proceedings, pages 204-210, 2012.
13. Lewczuk K., Wasiak M., Transportation services costs allocation for the delivery system. Proceedings of 21st International Conference on Systems Engineering, pp 429-433. IEEE Computer Society. 16-18 August 2011, Las Vegas, Nevada USA.
14. Lewczuk K., Żak J., Pyza D., Jacyna-Golda I., Capacitated Vehicle Routing Problem with CO2 rates for urban transport. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport z. 97 str.: 337-348, 2013.
15. Lewczuk, K., Zak, J., Pyza, D., Jacyna-Golda, I., Vehicle routing in an urban area: Environmental and technological determinants. WIT Transactions on the Built Environment, 130, pp. 373-384, 2013.
16. Li, Y., & Ma, L., A Hybrid Ant Algorithm for the Vehicle Routing Problem. Applied Mechanics and Materials, 182, pp. 2118-2122, 2012.
17. McCollom N., Blank L., Simulation Model For Multi-Level Distribution Planning. ANSS '79 Proceedings of the 12th annual symposium on Simulation, New Jersey 1979r., USA.
18. Merkisz J., Zanieczyszczenie środowiska przez transport samochodowy. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.
19. Michłowicz E., Rozwiązywanie problemów dostaw w systemach dystrybucji. Logistyka 4/2012.
20. Szczepański E., Jacyna M., An Approach to Optimize the Cargo Distribution in Urban Areas. Logistics and Transport, vol. 17, No. 1, pp. 53-62, 2013.
21. Szczepański E., Selected Aspects of Multi-Criteria Decision Support in Transport Service in Urban Areas. Conference Proceedings Carpathian Logistics Congress, November 7th - 9th 2012, Jeseník, Czech Republic, EU.
22. Zeng, K., Peng, G., Cai, Z., Huang, Z., & Yang, X., A Hybrid Natural Computing Approach for the VRP Problem Based on PSO, GA and Quantum Computation. In Computer Science and its Applications . Springer Netherlands, pp. 23-28, 2012.
23. Zomer G.R., Optimisitaion of Urban Freight Systems by strategic co-operations. Materiały konferencyjne LIFE-CEDM, Lucca 2008.