

DOBÓR OPTYMALNEGO TYPU ŚRODKÓW TRANSPORTOWYCH

Streszczenie

W referacie przedstawiono analityczną metodę doboru optymalnego typu środków transportowych do wykonania zadania przewozowego określonego zasobu ze stałą intensywnością na ustalonej odległość. Jakość podjętej decyzji oceniana jest kosztem ponoszonym przez nabywcę usługi transportowej, przypadającym na jednostkę czasu. Założono zróżnicowanie stawek w zależności od ładowności środków transportowych przybliżając je pewną funkcją ciągłą, różniczkowalną, monotonicznie rosnącą i wklęsłą. Przyjęto, że stopień załadunku środków transportowych jest również optymalny z punktu widzenia kosztów ponoszonych przez zleceniodawcę. W wyniku przeprowadzonych rozważań otrzymano analityczną zależność kosztów od względnej ładowności środków transportowych i na tej podstawie podano metodę doboru optymalnego typu środka transportowego.

Słowa kluczowe: logistyka, środki transportowe, koszty przewozowe, badania operacyjne

1. WPROWADZENIE

Nabywca masowych usług transportowych, będący np. operatorem logistycznym, przy podejmowaniu decyzji dotyczących doboru dostawcy tych usług na ogół kieruje się kosztami związanymi z realizacją zlecanych zadań transportowych. Poprawnie przeprowadzona analiza tych kosztów jest warunkiem koniecznym do podjęcia racjonalnej decyzji [5], [6], [7]. Analiza może polegać na obliczaniu kosztów w oparciu wyłącznie o stawki przewozowe narzucane przez dostawców usług transportowych, ale również może wynikać z analizy kosztów ponoszonych przez dostawcę, co powinno stanowić uzasadnienie stawek, głównie ustalanych w drodze negocjacji. Koszty ponoszone zarówno przez nabywcę jak i przez dostawcę usług transportowych mogą być wyznaczane na podstawie danych historycznych zbieranych w trakcie funkcjonowania systemu logistycznego. Są to jednak wielkości ustalone a posteriori i mają z tego powodu ograniczony zakres ich stosowania przy podejmowaniu decyzji dotyczących przyszłości. Można jednak dokonać analizy kosztów bazując na ogólnej metodologii charakterystycznej dla badań operacyjnych, w których podstawowym narzędziem jest modelowanie matematyczne, uważane powszechnie za najbardziej skuteczne narzędzie naukowe rozwiązywania problemów badawczych. Wartości cech rozpatrywanych w procesie modelowania dotyczą co prawda wyłącznie informacji posiadanych przez decydenta w chwili podejmowania decyzji, ale wnioski formułowane na ich podstawie dotyczą przyszłości, są więc odniesieniem do przyszłości. Otrzymuje się więc informację przedstawianą w postaci zależności analitycznych, wygodną do formułowania wniosków apriori o zachowaniu się systemu transportowego. W referacie zastosowano ogólną metodologię modelowania matematycznego opisaną np. w [2] odniesioną do zagadnień logistyki rozpatrywanych jako procesy deterministyczne i stacjonarne [1]. Posłużono się wynikami przedstawionymi w [4] opisującymi analityczne wyrażenia na uzasadniony poziom stawek przewozowych w różnych wariantach ich stosowania. Ponadto wykorzystano wyniki badań przedstawionych w [3], dotyczące analitycznej postaci kosztów jednostkowych ponoszonych przez nabywcę usług transportowych. Uwzględniono również zależność tych

* Warszawska Wyższa Szkoła Informatyki, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Cybernetyki

kosztów od ładowności środków transportowych, uzyskaną jako rezultat obliczeń dla danych rzeczywistych rozpatrywanych w [3]. Na podstawie powyższych rozważań wprowadzających wyznaczono analityczną postać zależności kosztów jednostkowych od ładowności środków transportowych i w konsekwencji zaproponowano prostą metodę wyboru typu środków transportowych do realizacji przewidywanej usługi transportowej. Zaproponowana metoda pozwala na odejście od analizowania ofert wszystkich dostawców usług transportowych umożliwiając wskazanie, którzy dostawcy powinni zaoferować uzasadnione ponoszonymi kosztami stawki przewozowe atrakcyjne również dla nabywcy usług z punktu widzenia całkowitych kosztów przez niego ponoszonych.

2. KOSZTY PONOSZONE PRZEZ NABYWCĘ USŁUG TRANSPORTOWYCH

Przeprowadźmy analizę kosztów ponoszonych przez nabywcę w przypadku, gdy jego potrzeby przewozowe powtarzają się cyklicznie. Przyjmijmy, że zlecana usługa transportowa polega na tym, aby przewozić z magazynu nabywcy na odległość d ładunek o wielkości partii Q co odcinek czasu o długości τ . Przewożony ma być jednorodny ładunek o wartości jednostkowej W przy oprocentowaniu środków obrotowych w wielkości ρ przez jednorodne środki transportowe o ładowności q poruszające się z prędkością handlową V .

Oznacza to, że przewóz ma być wykonywany ze stałą intensywnością λ wynoszącą:

$$\lambda = \frac{Q}{\tau} \quad (1)$$

Dostawca usługi transportowej może ustalić stawki przewozowe w różny sposób np.:

- za jednostkę odległości pokonanej przy wykonywaniu przejazdu na zlecenie nabywcy usługi; stawkę tę oznaczmy symbolem s^{pr} ;
- za jednostkę czasu wynajęcia środka transportowego przez nabywcę; stawkę tę oznaczmy symbolem s^{wyn} .

Oczywiście mogą być stosowane również inne metody ustalania stawek, jak również nie muszą być jednocześnie stosowane obie powyższe stawki. W sytuacji stosowania dokładnie jednej z nich należy przyjąć, że wartość drugiej stawki wynosi zero.

W [3] pokazano, że łączny koszt przypadający na jednostkę czasu ponoszony przez nabywcę usług transportowych związany z przewożeniem ładunku przez system przewozowy przy przewożeniu ładunku co stały odcinek czasu przy równomiernym wykorzystaniu ładowności jednorodnych jednostek transportowych w warunkach stacjonarności procesu przewozowego jest równy:

$$\chi = \frac{\lambda \cdot d}{Q} \cdot \left\lceil \frac{Q}{q} \right\rceil \cdot \left(s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V} \right) + \rho \cdot W \cdot \left(\frac{\lambda \cdot d}{V} + \frac{Q}{2 \cdot \left\lceil \frac{Q}{q} \right\rceil} \right) \quad (2)$$

gdzie funkcja $\lceil x \rceil = \min\{y \in \mathbb{Z} : x \leq y\}$ ($\mathbb{Z}$ jest zbiorem liczb całkowitych) jest to tzw. „sufit”.

Wielkość

$$s = s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V} \quad (3)$$

można interpretować jako przypadający na jednostkę czasu łączny koszt związany z pokonaniem drogi o jednostkowej długości przy realizacji zadania przewozowego.

Optymalna z punktu widzenia nabywcy usługi transportowej decyzja dotycząca określenia zadania przewozowego, tzn. decyzja minimalizująca ponoszone przez niego koszty wykonywania zadania przewozowego przypadające na jednostkę czasu, polega na następującym określeniu optymalnej wielkości Q^* ładunku przypadającej na jeden środek transportowy:

$$Q^* = \begin{cases} \bar{Q}^* = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot d \cdot \left(s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V} \right)}{\rho \cdot W}} & \text{gdy } \bar{Q}^* < q \\ q & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (4)$$

Środki transportowe powinny rozpoczynać kursy z ładunkiem w odstępach czasowych co:

$$\tau^* = \begin{cases} \sqrt{\frac{2 \cdot d \cdot \left(s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V} \right)}{\rho \cdot W \cdot \lambda}} & \text{gdy } \bar{Q}^* < q \\ \frac{q}{\lambda} & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (5)$$

Koszty przypadające na jednostkę czasu ponoszone przez nabywcę usługi transportowej wynikające z realizacji złożonego przez niego w powyższy sposób zadania przewozowego przyjmą wtedy wartość najmniejszą z punktu widzenia parametrów Q i τ zadania transportowego i będą wynosiły:

$$\chi(Q^*) = \begin{cases} \sqrt{2 \cdot \rho \cdot W \cdot \lambda \cdot d \cdot \left(s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V} \right)} + \frac{\rho \cdot W \cdot \lambda \cdot d}{V} & \text{gdy } \bar{Q}^* < q \\ \frac{\lambda \cdot d}{q} \cdot \left(s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V} \right) + \rho \cdot W \cdot \left(\frac{q}{2} + \frac{\lambda \cdot d}{V} \right) & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (6)$$

Wszystkie kursy wykonywane będą przy tym przez środki transportowe jednego typu.

3. RÓŻNE TYPY ŚRODKÓW TRANSPORTOWYCH

Niektóre wielkości występujące we wzorze (6) opisującym koszty przewozowe przypadające na jednostkę czasu zależą jednak od typu środka transportowego wykorzystywanego do przewozów. Są to stawki przewozowe s^{pr}, s^{wyn} , prędkość V oraz ładowność q . Przyjmijmy jak poprzednio, że zlecając zadanie przewozowe można rozpatrywać R typów środków transportowych ponumerowanych zmienną $r = \overline{1, R}$. Angażując do realizacji zadania przewozowego środki transportowe r -tego typu ponosi się więc w każdej jednostce czasu koszty w wysokości:

$$\chi_r(Q_r^*) = \begin{cases} \sqrt{2 \cdot \rho \cdot W \cdot \lambda \cdot d \cdot \left(s_r^{pr} + \frac{s_r^{wyn}}{V_r} \right)} + \frac{\rho \cdot W \cdot \lambda \cdot d}{V_r} & \text{gdy } \bar{Q}_r^* < q_r \\ \frac{\lambda \cdot d}{q_r} \cdot \left(s_r^{pr} + \frac{s_r^{wyn}}{V_r} \right) + \rho \cdot W \cdot \left(\frac{q_r}{2} + \frac{\lambda \cdot d}{V_r} \right) & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (7)$$

gdzie:

$$Q_r^* = \begin{cases} \bar{Q}_r^* = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot d \cdot \left(s_r^{pr} + \frac{s_r^{wyn}}{V_r} + \frac{s_r^{zl}}{d} \right)}{\rho \cdot W}} & \text{gdy } \bar{Q}_r^* < q_r \\ q_r & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (8)$$

Przyjęto przy tym, że odległość przewozu d nie zależy od typu środka transportowego, tzn. rozpatruje się środki transportowe jednorodne z punktu widzenia możliwości przemieszczania się. Nie są więc to jednocześnie np. samochody i statki żeglugi śródlądowej.

Najlepszym, z punktu widzenia ponoszonych kosztów przypadających na jednostkę czasu, jest ten typ r^* środków transportowych, dla którego spełniony jest warunek:

$$\chi_{r^*}(Q_{r^*}^*) = \min_{r=1, R} \chi_r(Q_r^*) \quad (9)$$

Ustalenie optymalnego typu środka transportowego wymaga więc przeprowadzenia oddzielnych obliczeń optymalnej wielkości ładunku i następnie wyznaczenia kosztów dla wszystkich typów środków transportowych. Jest to więc pełny przegląd przestrzeni rozwiązań. Poniżej rozpatrzmy przypadek szczególny będący jednocześnie reprezentantem metody analitycznego określania optymalnego typu środka transportowego do wykonania ustalonego zadania przewozowego.

Przyjmijmy, że prędkość handlowa poruszania się środków transportowych wszystkich typów jest jednakowa, tzn.:

$$\forall r = \overline{1, R} : V_r = V \quad (10)$$

Niech q będzie najmniejszą z ładowności wszystkich dostępnych typów środków transportowych. Przyjmijmy, że rozpatrujemy środki transportowe, których stawki s_r^{pr} oraz s_r^{wyn} rosną wraz ze wzrostem ich ładowności proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z ich względnej ładowności w stosunku do q :

$$s_r^{pr} = s^{pr} \cdot \sqrt{\frac{q_r}{q}}; \quad s_r^{wyn} = s^{wyn} \cdot \sqrt{\frac{q_r}{q}} \quad (11)$$

Stałe s^{pr} oraz s^{wyn} są wielkościami reprezentatywnymi dla rozpatrywanej grupy typów środków transportowych.

Oznaczając względną ładowność środka transportowego r -tego typu symbolem:

$$\xi_r = \frac{q_r}{q} \quad (12)$$

otrzymamy zamiast (11) zależności:

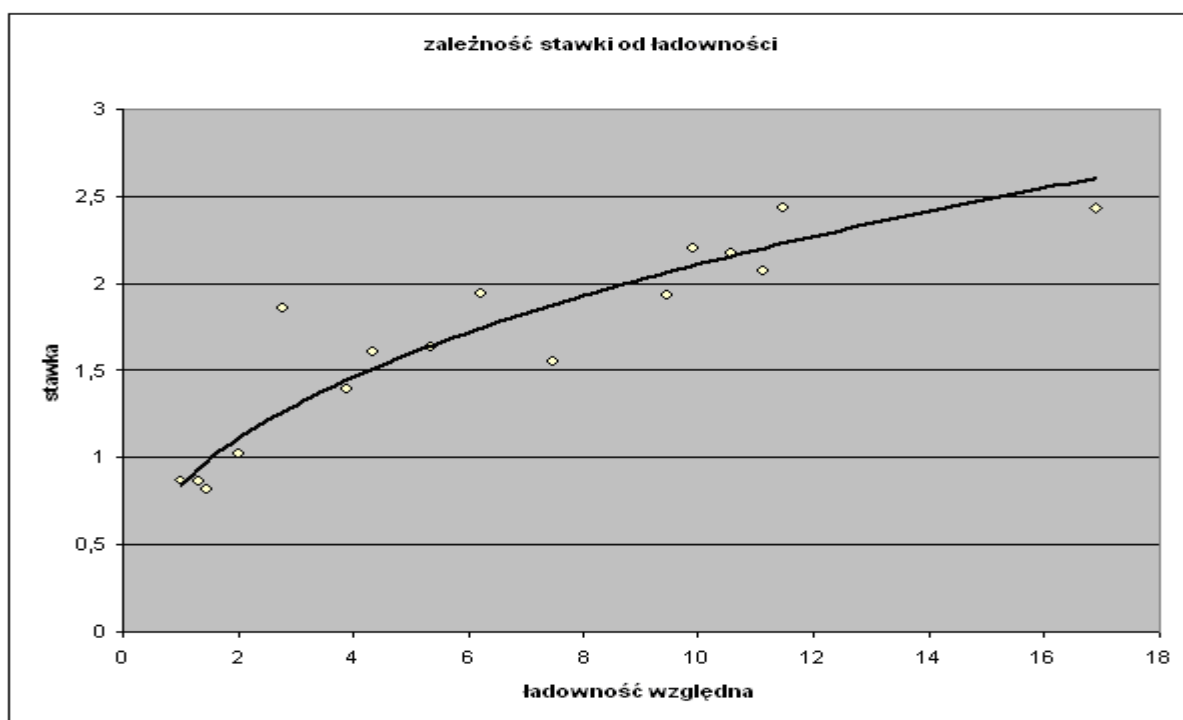
$$s_r^{pr} = s^{pr} \cdot \sqrt{\xi_r}; \quad s_r^{wyn} = s^{wyn} \cdot \sqrt{\xi_r} \quad (13)$$

W [3] został opisany system transportowy zaangażowany przez pewnego dużego operatora logistycznego do realizacji usług transportowych. Zabrane dane o tym systemie pozwoliły na zbadanie wielkości stawek przewozowych s^{pr} uzasadnionych kosztami ponoszonymi przez dostawców usług transportowych. Uzyskane wyniki przedstawiono na Rys. 1. Stawka przewozowa została podana w umownych jednostkach pieniężnych ze względu na ochronę interesów biznesowych operatora. Naniesiona na rysunku potęgowa linia trendu wyraża się wzorem:

$$\text{stawka za kilometr} = 0,8397 \cdot (\text{względna ładowność})^{0,4003} \quad (14)$$

przy współczynniku determinacji wynoszącym 0,8743. Widać więc, że przybliżenie pierwiastkiem kwadratowym tej stawki jest uzasadnione praktycznie i wystarczające dla przeprowadzenia rozważań teoretycznych przedstawionych dalej w referacie. Obie

analizowane funkcje są monotonicznie rosnącymi, ciągłymi, różniczkowalnymi i wklęsłymi funkcjami. Pierwiastek kwadratowy można więc uważać za reprezentatywny dla przedstawionej metody, a różnice obliczeniowe nie wpływają na poprawność przeprowadzonych dalej rozważań. Z tych samych powodów przyjęto analogiczne założenie dotyczące zależności stawki s_r^{wyn} od względnej ładowności środków transportowych. Oczywiście przy podejmowaniu decyzji o wyborze dostawcy usług transportowych należy zweryfikować charakter zależności stawek przewozowych od ładowności względnej środków transportowych.



Rys. 1. Zależność stawki przewozowej za kilometr przebytej odległości od względnej ładowności środków transportowych. Źródło: opracowanie własne

Zamieńmy dyskretną zmienną $\xi_r \in \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_R\}$ ciągłą zmienną $\xi \geq 1$. Rozpatrzmy najpierw przypadek, gdy środki transportowe każdego typu przemieszczają się z całkowitym wykorzystaniem ich zdolności ładunkowych, tzn. gdy $Q_r^* = q_r$. Funkcja opisana wzorem (7) przy powyższych założeniach nie zależy od indeksu r , a staje się wyłącznie funkcją zmiennej ξ przyjmując postać:

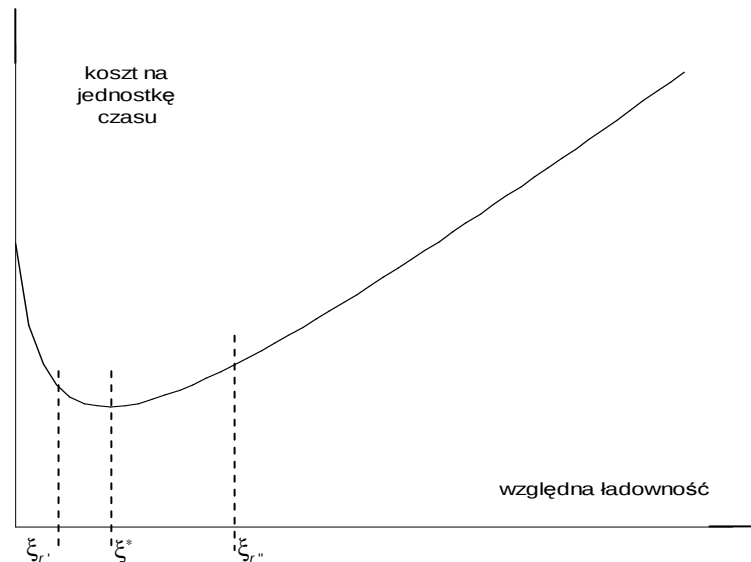
$$\chi(\xi) = \frac{\lambda \cdot d}{q \cdot \sqrt{\xi}} \cdot \left(s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V} \right) + \frac{\rho \cdot W \cdot q}{2} \cdot \xi + \frac{\rho \cdot W \cdot \lambda \cdot d}{V} \quad (15)$$

Przebieg funkcji $\chi(\xi)$ przedstawia Rys. 2.

Funkcja $\chi(\xi)$ przedstawiona wzorem (15) przyjmuje minimum dla:

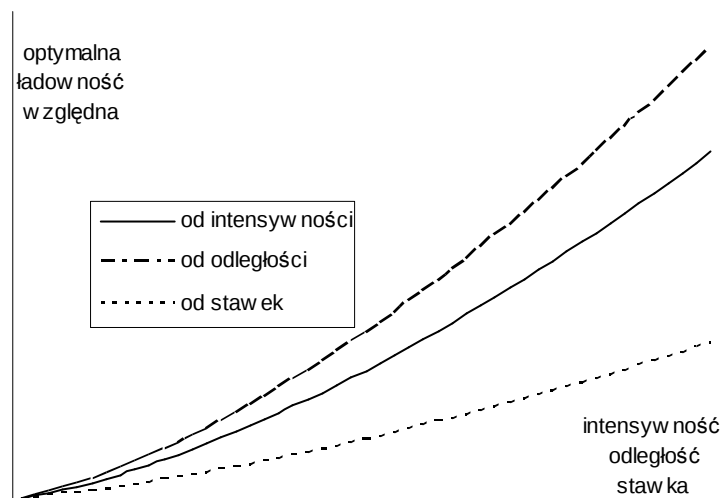
$$\xi^* = \left(\frac{2 \cdot \lambda \cdot d}{\rho \cdot W \cdot q^2} \cdot \left(s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V} \right) \right)^{\frac{3}{2}} \quad (16)$$

o ile $\xi^* \geq 1$, lub w punkcie $\xi^* = 1$ w przeciwnym przypadku.



Rys. 2. Zależność kosztów wykonania zadania przewozowego przypadających na jednostkę czasu od względnej ładowności środka transportowego dla przypadku pełnego wykorzystania ładowności środków transportowych. Źródło: opracowanie własne

Jak widać względna ładowność środka transportowego optymalnego typu rośnie wraz ze wzrostem wartości intensywności przewozów λ , odległości przewozu d oraz wielkości stawek s^{pr} , s^{wyn} , co ilustruje Rys. 3.

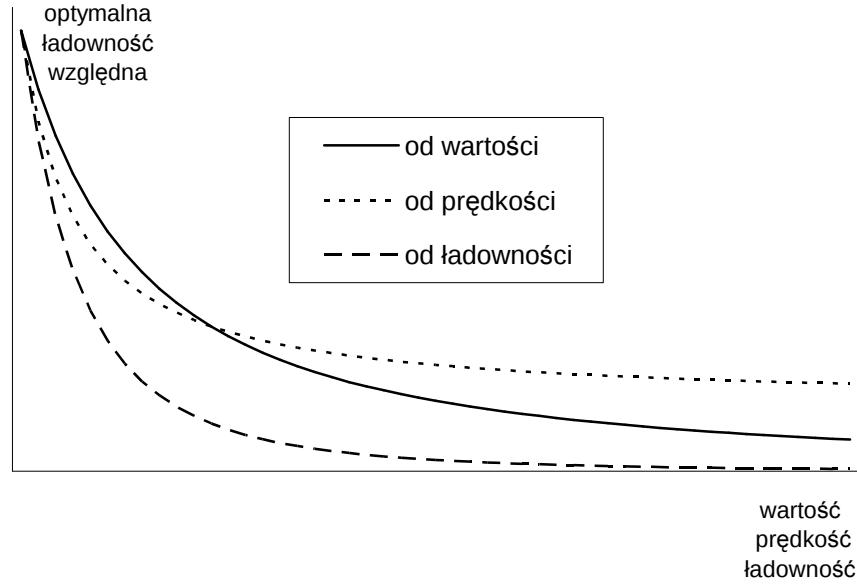


Rys. 3. Zależność optymalnej względnej ładowności od intensywności przewozów oraz odległości przewozów dla przypadku pełnego wykorzystania ładowności. Źródło: opracowanie własne

Z kolei wzrost wartości jednostkowej przewożonego ładunku W , ładowności q oraz wzrost prędkości handlowej V pociąga za sobą malenie optymalnej względnej ładowności środka transportowego. Ilustruje to Rys. 4. Optymalna względna ładowność w funkcji jednostkowej wartości przewożonego ładunku W oraz w funkcji ładowności q maleje do zera, natomiast w funkcji prędkości handlowej V asymptotycznie maleje do wartości

$$\left(\frac{2 \cdot \lambda \cdot d \cdot s^{pr}}{\rho \cdot W \cdot q^2} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

Najszybsze malenie zachodzi dla ładowności q .



Rys. 4. Zależność optymalnej względnej ładowności od jednostkowej wartości przewożonego ładunku oraz prędkości handlowej dla przypadku pełnego wykorzystania ładowności środków transportowych dla przypadku pełnego wykorzystania ładowności. Źródło: opracowanie własne

Minimalny koszt ponoszony w jednostce czasu przy wykorzystaniu środków transportowych o optymalnej ładowności równej $q^* = q \cdot \xi^*$ otrzymujemy podstawiając (16) do (15). Wynosi on:

$$\chi(\xi^*) = \frac{3}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho \cdot W \cdot \lambda^2 \cdot d^2}{q} \cdot \left(s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V}\right)^2} + \frac{\rho \cdot W \cdot d \cdot \lambda}{V} \quad (17)$$

4. WYZNACZANIE OPTYMALNEGO TYPU ŚRODKA TRANSPORTOWEGO

Przyjmijmy, że typy środków transportowych uporządkowane są zgodnie z rosnącą wartością ładowności, tzn. że:

$$q_1 < q_2 < \dots < q_R \quad (18)$$

W takim razie wybór optymalnego typu r^* środka transportowego przy wykorzystaniu pełnej ładowności środków transportowych powinien przebiegać następująco:

Jeśli $\xi^* \leq 1$, to należy przyjąć $r^* = 1$, czyli optymalnym typem środka transportowego jest ten, którego ładowność jest najmniejsza.

Jeżeli $\xi^* > 1$ oraz dla pewnego r zachodzi $q_r \approx q \cdot \xi^*$, to należy przyjąć $r^* = r$. Jeśli taki typ r nie istnieje, to należy rozpatrzyć takie dwa typy r' oraz r'' , których ładowności są „najbliższe” ładowności optymalnej:

$$\begin{aligned} r' : q_{r'} &= \max \{q_r : q_r < q \cdot \xi^* \wedge r = \overline{1R}\} \\ r'' : q_{r''} &= \min \{q_r : q_r > q \cdot \xi^* \wedge r = \overline{1R}\} \end{aligned} \quad (19)$$

i wybrać ten typ r^* , dla którego wartość kosztów określonych wzorem (15) przypadających na jednostkę czasu jest mniejsza, tzn. dla którego zachodzi warunek:

$$\chi\left(\frac{q_r^*}{q}\right) = \min \left\{ \chi\left(\frac{q_r'}{q}\right); \chi\left(\frac{q_r''}{q}\right) \right\} \quad (20)$$

Oczywiście może się okazać, że w tym przypadku nie istnieje wartość r'' , gdyż jeśli $\xi^* > \frac{q_R}{q}$, to minimum funkcji kosztów występuje poza zakresem zmienności ładowności.

Wtedy wartość r' jest optymalnym numerem typu środka transportowego.

Pozostał teraz do przeanalizowania drugi przypadek, mianowicie gdy ładowność środka transportowego nie będzie wykorzystana w pełni, czyli gdy dla wszystkich $r = \overline{1, R}$ zachodzi $Q_r^* = \overline{Q}_r^* < q_r$, gdzie $\overline{Q}_r^*$ opisane jest wzorem:

$$\overline{Q}_r^* = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot d \cdot \left(s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V} \right)}{\rho \cdot W}} \cdot \sqrt{\frac{q_r}{q}} \quad (21)$$

a po założeniu ciągłości zmiennej $\xi \geq 1$ wzorem:

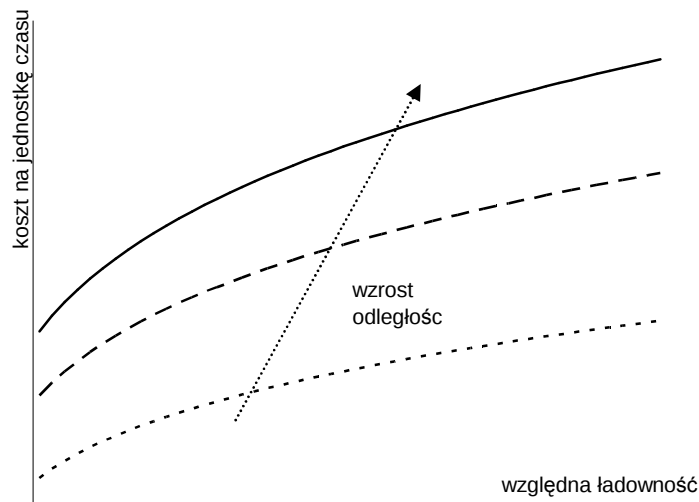
$$\overline{Q}^* = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot d \cdot \left(s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V} \right)}{\rho \cdot W}} \cdot \sqrt[4]{\xi} \quad (22)$$

Koszt przypadający na jednostkę czasu przy analogicznych założeniach jak dla przypadku $Q_r^* = q_r$ nie zależy od numeru typu środka transportowego r i wynosi:

$$\chi(\xi) = \sqrt{2 \cdot \rho \cdot W \cdot \lambda \cdot d \cdot \left(s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V} \right)} \cdot \sqrt[4]{\xi} + \frac{\rho \cdot W \cdot \lambda \cdot d}{V} \quad (23)$$

Przebieg funkcji (23) przy założeniu ciągłości zmiennej ξ przedstawiony jest na Rys. 5.

Przebieg funkcji $\chi(\xi)$ wskazuje, że przy niepełnym wykorzystaniu ładowności środków transportowych najlepiej jest wybrać ten typ środków, dla których $\xi_r = 1$, czyli środków o najmniejszej ładowności $q_r = q_1 = q$.



Rys. 5. Zależność kosztów wykonania zadania przewozowego przypadających na jednostkę czasu od względnej ładowności środka transportowego dla przypadku niepełnego wykorzystania ładowności środków transportowych. Źródło: opracowanie własne

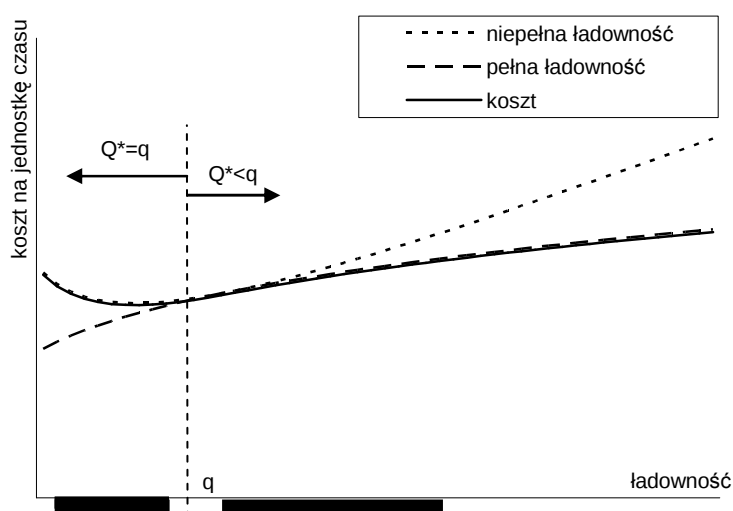
Zauważmy jednak, że dla małych wartości q_r optymalna teoretyczna wielkość ładunku $\bar{Q}_r^*$ będzie na ogół przekraczała q_r , natomiast dla dużych wartości ładowności q_r może ona nie być w pełni wykorzystana. Dlatego też, uwzględniając (15), (22) oraz (23), otrzymujemy, że łączna zależność kosztów wykonania zadania przewozowego przypadających na jednostkę czasu do zmiennej ciągłej ξ będzie wyrażała się wzorem:

$$\chi(\xi) = \begin{cases} \frac{\lambda \cdot d}{q \cdot \sqrt[4]{\xi}} \cdot \left(s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V} \right) + \frac{\rho \cdot W \cdot q}{2} \cdot \xi + \frac{\rho \cdot W \cdot \lambda \cdot d}{V} & \text{dla } \frac{\bar{Q}_r^*}{q} \geq \xi \\ \sqrt[3]{2 \cdot \rho \cdot W \cdot \lambda \cdot d \cdot \left(s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V} \right)} \cdot \sqrt[4]{\xi} + \frac{\rho \cdot W \cdot \lambda \cdot d}{V} & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (24)$$

Na Rys. 6 pokazano położenie względem siebie funkcji kosztów opisanych wzorami (15) (pełne wykorzystanie ładowności) oraz (23) (niepełne wykorzystanie ładowności) i wynikający z tego koszt przypadający na jednostkę czasu opisany wzorem (24). Linia pogrubioną po lewej stronie zaznaczono taki przedział zmienności wartości ładowności, przy których środki transportowe wszystkich typów byłyby w pełni załadowane. Z kolei linią pogrubioną po prawej stronie zaznaczono te wartości ładowności, przy których środki transportowe wszystkich typów byłyby nie w pełni wykorzystane. Warunek $Q_r^* < q_r$ po przekształceniach, wykorzystując zależność (22), można zastąpić warunkiem:

$$\sqrt[3]{\frac{1}{q} \cdot \left(\frac{2 \cdot \lambda \cdot d \cdot \left(s^{pr} + \frac{s^{wyn}}{V} \right)}{\rho \cdot W} \right)^2} < q_r \quad (25)$$

Wartość lewej strony nierówności (25) oznaczono na Rys. 6 pionową linią przerywaną, w stosunku do której zaznaczono ładowność środków transportowych. Dla tych typów środków transportowych, których ładowność znajduje się poniżej progu, optymalna wielkość partii przewożonego ładunku równa jest ładowności. Ładowność środków transportowych pozostałych typów nie będzie w pełni wykorzystana, gdyż optymalna wielkość partii ładunku będzie mniejsza od ich ładowności.



Rys. 6. Zależność kosztów wykonania zadania przewozowego przypadających na jednostkę czasu od ładowności środka transportowego. Źródło: opracowanie własne

Na podstawie powyższych rozważań można łatwo zalgorytmizować sposób wyznaczania optymalnego typu środków transportowych do wykonania ustalonego zadania przewozowego.

Przestawiona powyżej metoda doboru typu środków transportowych dla wykonania ustalonego zadania przewozowego może być stosowana we wszystkich przypadkach znajomości analitycznej rosnącej monotonicznie i wklęsłej zależności stawek przewozowych od ładowności środków transportowych. Takie analityczne postaci funkcji mogą być przykładowo wyznaczane na podstawie analiz danych statystycznych charakterystycznych dla regionu, w którym zlecane są zadania przewozowe.

LITERATURA

- [1] Chojnacki A.B.: *Logistyka*. WAT, Warszawa 1978.
- [2] Chojnacki A.B.: *Modelowanie matematyczne*. WAT, Warszawa 1986.
- [3] Chojnacki A.B., Markow J.: *Teoria i praktyka analizy jednostkowych kosztów przewozu ładunku w transporcie samochodowym*, Referat na IV Międzynarodową Konferencję Naukowo-Techniczną Systemy Logistyczne Teoria i Praktyka, Rawa Mazowiecka 2009 w: *Logistyka* nr 4/2009.
- [4] Chojnacki A.B., Piasecki S.: *Koszty i stawki przewozowe*, Referat na konferencję TLM 2008, Zakopane 2008.
- [5] Jacyna M.: *Modelowanie i ocena systemów transportowych*, OFICYNA Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2009.
- [6] Krawczyk S.: *Metody ilościowe w logistyce*. Wyd. C. H. Beck. Warszawa 2001.
- [7] Piasecki S.: *Optymalizacja systemów przewozowych*. WKŁ, Warszawa 1973.

SELECTION OF OPTIMAL TYPE OF TRANSPORTATION UNITS

Abstract

This paper consists the analytical method of selection of optimal type of transportation units. They transport one kind of goods with constant intensity for known shipping distance. The costs per unit of time of transported shipment evaluates the decision quality. There are different method of fixing of the shipment rates. Shipment rate is described by continuous, differentiable, monotonically increasing and concave function at load capacity. The volume of transported goods per unit is optimal from the owner of units as well. As the result of considerations the analytical form of function the unit shipment costs at relative load capacity is shown. The method of the selection of optimal type of transportation units is presented on this basis.

Keywords: logistics, transportation units, transportation costs, operation research