

Igor Arefyev<sup>1</sup>

Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Inżynieryjno-Ekonomiczny Transportu, Instytut Inżynierii Transportu

## Kształtowanie modelu optymalizacji struktury węzła transportowego jako elementu systemu

### WPROWADZENIE

Zadania optymalizacji pracy systemów logistycznych związane są z opracowaniem modeli ich funkcjonowania. Z kolei potrzeba dekompozycji procesów logistycznych do analizy stanu i zachowania systemu, ogólnie rzecz biorąc, wymaga przeprowadzenia analogicznego badania i ich części, decydowane jak ogniwa. Te ogniwa stanowią kompleks operacji logistycznych w zakresie realizacji ogólnego procesu technologicznego, które zostały wyodrębnione według konkretnej cechy własnego przeznaczenia funkcjonalnego [1].

Dla logistyki transportowej takie zadania są szczególnie aktualne w związku z jej specyfiką: rozmieszczenie systemów na znacznych terytoriach, różnorodność charakterystyk środków trwałych (kapitału), różnica wskaźników i ocen pracy ogniw, multimodalność itp. [2].

Mimo wspólnoty charakteru podstawowej funkcji docelowej, przewozy pasażerskie i towarowe cechuje wyraźna specyfika. Dana praca poświęcona jest problemowi modelowania pracy towarowych węzłów transportowych wielofunkcyjnego przeznaczenia jako elementu multimodalnego systemu przemieszczenia towarów.

### 1. MODELU OPTIMALIZACJI STRUKTURY WĘZŁA TRANSPORTOWEGO

Podstawowe pojęcia logistyki transportowej stanowią trzy podstawowych funkcje: produkcyjna (przemieszczenie ładunków), składowania (czasowe przechowanie) i konsumpcyjna (popyt na dostarczanie ładunków producentów i użytkowników). W ten sposób powstaje infrastruktura transportowa w postaci multimodalnego grafu dróg przemieszczenia ładunków. Krawędzie grafu odzwierciedlają związek między końcowymi punktami wysyłki i dostawy towarów. Posiadają one następujące wskaźniki: **R** – zasoby transportowe, **t** – czas dostawy, **D** – długość trasy i ich pochodne. Przecięcie krawędzi grafu określają punkty końcowe, gdzie przeprowadzane są operacje koncentracji i obróbki ładunków (załadunek-wyładunek, przechowywanie, dokumentowanie, itp.), które są Węzłami Transportowymi. W przypadku systemów transportowych (**ST**) funkcja produkcyjna  $F(K, L)$  określa wielkość produkcji transportowej (TP), wykonaną w ciągu jednostki czasu **t**, dysponując zasobami w postaci kapitału **K** i siły roboczej **L**. Ten stan ogólny jest słuszny zarówno dla systemów mono, jak i dla politransportowych i nie wymaga uzupełnień już opracowanych klasycznych modeli oceny stanu i zachowania (**ST**), gdy  $R \in (K, L, D)$ .

W modelowaniu struktur i oceny stanu **ST** najbardziej złożonymi są Węzły Transportowe (**WT**). W modelu strukturalnym to są wierzchołki grafu, odzwierciedlającego strukturę **ST**. We współczesnych warunkach eksploatacji **ST**, stanowią one wielofunkcyjne rozdzielone kompleksy multimodalnego typu i należą do najbardziej złożonej grupy ogniw systemu dostawy ładunków i od producenta do użytkownika. Węzły Transportowe zawierają w sobie wszystkie operacje transportowe, które uzupełniane są całym szeregiem procedur produkcyjnych. Dlatego ich zorganizowanie w jednolitym kompleksie strukturalnym wymaga opracowania specyficznych modeli, metod, środków wspomagających i podejmowania decyzji w zakresie zarządzania.

<sup>1</sup> i.arefyev@am.szczecin.pl

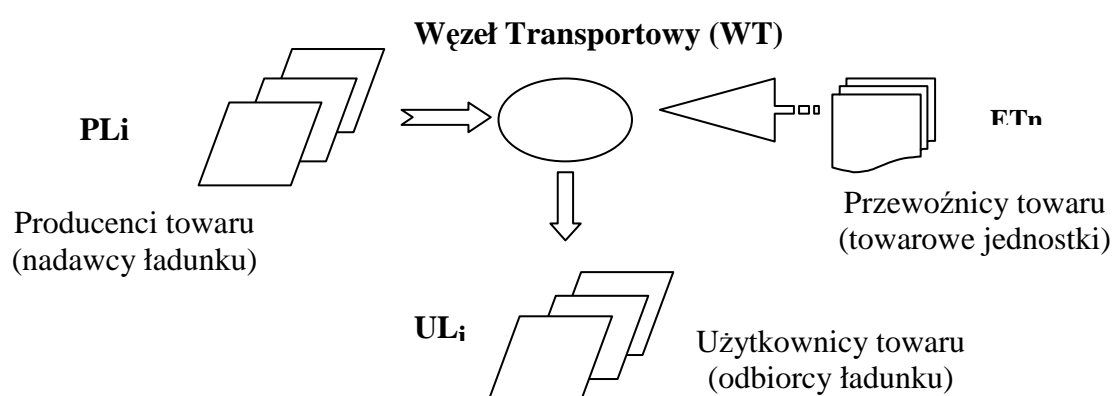
Posiadając własną rozgałęzioną strukturę, wykonując wewnętrzne produkcyjne zadania transportowe (serwis, obsługa techniczna, sortowanie i przechowywanie towarów, wyznaczanie trasy, zaopatrzenie w energię, przewozy między terminalami), **WT** występują jednocześnie w roli elementu logistycznego systemu transportowego (**ST**) i w postaci obiektu produkcyjnego. Rozwój multimodalności procesów transportowych sprzyja zwiększeniu złożoności elementarnej bazy Węzłów Transportowych, dodając ciągle nowe ogniwa do jej struktury funkcjonalnej. Można zatem twierdzić, że współczesne **WT** stanowią złożony system politransportowy, który budowany jest na podstawie propozycji usługowej dla użytkowników w postaci menu dostarczonych do niego jednostek ładunku, obrabianego, sortowanego, przechowywanego (funkcja produkcyjna) i przedstawienie tych jednostek użytkownikowi w postaci gotowej produkcji (funkcja popytu).

A więc, zadanie kształtowania modeli optymalizacji struktury **WT** można rozwiązywać analogicznie do przyjętej w ekonometrii metodologii stosunku wzajemnego dwóch zależności: produkcyjnej i konsumpcyjnego zapotrzebowania.

Wyjściowymi parametrami takiego modelu ustalonego okresu czasu są: ogólna wielkość dostarczonego przez nadawców towaru przeznaczonego do obróbki w **WT**  $PL_i$ .

( $i = \overline{1, I}$ , gdzie  $I$  - liczba jednostek ładunku od wszystkich dostawców); ogólna wielkość towaru dostarczonego do **WT** przez jednostki towarowe jednolitego procesu multimodalnego  $ET_n$ . ( $n = \overline{1, N}$ , gdzie  $N$  - liczba jednostek ładunku dostarczonych do **WT** przez wszystkie jednostki towarowe); ogólna wielkość towaru wysłanego do odbiorców ładunku  $UL_j$  ( $j = \overline{1, J}$ , gdzie  $J$  - liczba jednostek ładunku dla wszystkich odbiorców); sumaryczny obrót ładunków **WT** (jednostek ładunku / jednostek czasu) oznaczono jako  $WT_\Sigma$ . W zależności od charakteru modelu za jednostkę ładunku przyjmuje się ilość ton, paczek, palet, kontenerów lub miary umowne TEU, FEU (Rys. 1). Czas jest normalizowany według tradycyjnej skali produkcyjnej: zmiana (8 godzin) i jej wielokrotności (doba, dekady, miesiące itp.). Jednocześnie do kapitału **WT** ( $K_{TU}$ ) należy również  $R_{TU}$  jako wewnętrzny, własny zasób transportowy (rozwożenie ładunku między terminalami, cumowiskami, stacjami, sortowanie itp.),  $K_{TU} \in R_{TU}$ . Za siłę roboczą  $L$  uważa się ogół kompleksowych brygad dokerskich  $B$ , aparatu organizacyjno-dyspozytorskiego  $O$  i personelu obsługi  $Op$  ( $L = B+O+Op$ ).

Produkcja transportowa **WT** określa jego « obrót ładunkowy », który wyrażany jest przez konkretną miarę: tony / rok lub TEU (FEU) / rok. W przypadku **WT** wielofunkcyjnego jednostki umowne TEU (FEU) przeliczane są na tony (1 TEU = 24 t) i określany jest ogólny obrót ładunkowy jako uogólniony wskaźnik wydajności **WT**.



- $WT_\Sigma$ . – węzeł transportowy ( $\Sigma$  - łączny obrót ładunkowy **WT**)
- $PL_i$  – producent ładunku, ( $i = \overline{1, I}$ )
- $UL_j$  – użytkownik ładunku ( $j = \overline{1, J}$ )
- $ET_n$  – ładunki jednostek transportowych, ( $n = \overline{1, N}$ )

Rys. 1. Schemat organizacji obrotu ładunków w Węźle Transportowym.

W ten sposób wielkość funkcji  $F(K, L)$  określa maksymalnie możliwy obrót ładunkowy **WT**, który można zrealizować przy najlepszym (maksymalnym) wykorzystaniu środków trwałych i siły roboczej. W tym miejscu należy podkreślić, że warunek maksymalizacji wykorzystania  $K$  i  $L$  można uważać jako pewną hipotetyczną optymalizację. Oczywiście jest, że to wymaga wypukłości funkcji produkcyjnej, a mianowicie: wypukłość funkcji  $F(K, L)$  jest następstwem optymalności wspólnego rozdziału środków  $K$  i  $L$  [1,4].

Innymi słowami, przy formalizowanej budowie funkcji produkcyjnej **TY** przewiduje się a priori, że funkcje  $F(K, L)$  określone przy wszystkich  $K \geq 0$  nie są negatywne, pozytywnie jednorodne pierwszego stopnia  $F(\lambda K, \lambda L) = \lambda F(K, L)$  i dwukrotnie ciągle (różniczkowane), przy tym:

$$\frac{\partial F(K, L)}{\partial K} > 0, \quad \frac{\partial F(K, L)}{\partial L} > 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 F(K, L)}{\partial K^2} < 0, \quad \frac{\partial^2 F(K, L)}{\partial L^2} < 0, \quad (2)$$

$$F(0, L) = F(K, 0) = 0 \quad (3)$$

Specyfika pracy **WT** polega na tym, że on wyraźnie orientowany jest na bilans wejściowych i wyjściowych potoków ładunków. Innymi słowami, sztywne spełnianie warunku tożsamości funkcji produkcyjnej (zapewnienie zamówionego obrotu ładunków **WT** w wyznaczonym czasie) i funkcji konsumpcyjnego zapotrzebowania (wywóz – przywóz, sortowanie, rozdział ładunku do użytkowników w tym samym czasie).

Zachwianie tego stosunku doprowadza do wyznaczenia **WT** dodatkowej funkcji – nie zaplanowanej obróbki i przechowywaniu ładunku, tzn. do konieczności zbudowania modelu **WT** z ponadplanową strukturą gromadzenia [3]. Przy tym, wskaźniki  $\alpha$  i  $b$ , występujące w tradycyjnym modelu Constant Elasticity of Substitution jako wielkości stałe, powinno się traktować jako granice dopuszczalnego obszaru decyzji w zakresie małej liczby obserwacji. To jest prognoza obrotu ładunków **WT** [1,5]. Jest oczywistym, że nieskończone rozszerzanie obszaru dopuszczalnych decyzji jest nie realne ze względu na krańcowe możliwości **WT** zarówno w zakresie  $K$  (wyposażenie, tereny, terminale, składy), jak i w zakresie  $L$  (brygady dokerów, aparat organizacyjny, zarządzania i realizacja zadań informacyjno - poszukiwawczych).

Stąd pojawia się potrzeba strukturalnego rozszerzania modelu metodą określenia dwóch dodatkowych wskaźników pracy **WT**: wydajność pracy i krańcowa wydajność pracy.

W pierwszym przypadku rozpatrywany jest stan kwazistatyczny **WT**, drugi przypadek określa krańcowe możliwości **WT** w zakresie obróbki potoku ładunków.

Dla pierwszego wskaźnika prawidłowe jest wyrażenie:

$$\omega = \frac{\partial F(K, L)}{\partial L} \quad (2)$$

Wyrażenie (2) jest charakterystyczne dla pracy stacjonarnej **WT**, gdy podstawowy obrót ładunków cechuje się stałym potokiem towarów i jednostek transportowych, zaplanowanych i obrabianych w węzle w ciągu ustalonego czasu: dzień, miesiąc, rok itd. W tym przypadku można mówić o kwazistatycznym stanie **WT** w danym czasie. Wtedy dynamika funkcji produkcyjnej znajduje się ze stałą elastycznością zastąpienia. Jako funkcja Constant Elasticity of Substitution – CES przyjmuje postać [5]

$$Q = A \left[ \alpha K^{-\rho} + (1-\alpha)L^{-\rho} \right]^{-\frac{1}{\rho}}, \quad (3)$$

gdzie:

$A, \rho = \frac{1}{b} - 1, 0 < \alpha < 1$  – wielkości stałe.

Dla **WT** dowolnego typu stałości elastyczności zastąpienia CES odpowiada warunek

$$(1 + \rho)^{-1} = b = const, \quad (4)$$

gdzie:

$b$  – logarytmowany współczynnik regresji w zależności liniowej wydajności pracy

$$y = \ln \frac{Q}{L} \quad (5)$$

i krańcowej wydajności pracy

$$\ln \omega = \ln \frac{\partial F(K, L)}{\partial L} \quad (6)$$

$$\ln y = a + b \ln \omega \quad (7)$$

W przypadku **WT**, wydajność pracy jako parametr jego modelu strukturalnego odnosi się do jednostki strukturalnej obróbki ładunku: brygadzie dokerów (przeładunek), punktu przyjmowania ładunku (kompleksy załadunkowo-rozładunkowe), miejsca sortowania, przechowywania ładunku (terminale, składy, place).

W tych warunkach należy podkreślić, że produkcyjna funkcja Cobb'a – Douglas'a stanowi ostateczny wariant funkcji CES przy  $\rho \rightarrow +0$  [5,6]:

$$Q = AK^{\delta} L^{1-\delta}, \quad (8)$$

gdzie:  $\delta$  i  $(1-\delta)$  – współczynniki elastyczności, określające optymalną proporcję intensywności nakładów czynników  $K$  i  $L$  [3,4].

Wtedy dla tej funkcji elastyczność zastąpienia równa jest jednostce (środki trwałe i siła robocza w jednakowej mierze wzajemnie się zastępują). W **WT** taki przypadek praktycznie jest nie realny.

Drugim ostatecznym wariantem funkcji CES jest funkcja ze stałymi proporcjami ( $\rho \rightarrow +\infty$ ) w zależności

$$Q = A \min\{K; L\} \quad (9)$$

Dla funkcji produkcyjnej ze stałymi proporcjami elastyczność zastąpienia jest zerowa: środki trwałe i siła robocza nie mogą wzajemnie się zastępować, a powinny być wykorzystywane w zadanej proporcji, nadwyżka środków lub siły roboczej nie zwiększają wydajności, co odpowiada niezmienności roboczych trybów w procesach technologicznych. Ten wariant odpowiada pracy **WT** w danym lub prognozowanym czasie, w zależności od wymiarowości wymaganego modelu.

Autentyczność stałości elastyczności zastąpienia określa prawo podziału współczynnika regresji [5].

## 2. WNIOSKI

1. Węzeł Transportowy uważany jest za wierzchołek grafu, opisującego strukturę systemu logistycznego i rozpatrywany jest jako wielofunkcyjny element systemu logistycznego typu multimodalnego, który posiada właściwą strukturę wewnętrzną.
2. Stanowiąc element systemowy, WT jednocześnie łączy w sobie realizację dwóch funkcji logistycznych: produkcyjnej i konsumpcyjnego zapotrzebowania. Przy tym funkcja  $F(K,L)$  charakteryzuje maksymalnie możliwy obrót ładunków WT. Udowodniono, że, w tym przypadku wypukłość funkcji  $F(K,L)$  jest następstwem optymalności wspólnego podziału środków  $K$  i  $L$ , charakterystycznego dla Węzłów Transportowych multimodalnego typu.
3. Ustalono, że produkcyjna funkcja WT odnosi się do klasy funkcji Constant Elasticity of Substitution – CES ze stałą elastycznością zastąpienia, na której podstawie wyprowadzono wyrażenia dla oceny wydajności pracy i ostatecznej wydajności pracy w wielocelowym WT. Przeprowadzono analizę krańcowych wariantów funkcji CES ze stałymi proporcjami w warunkach multimodalności.
4. Na bazie zaproponowanych w pracy przemysleń był zbudowany model optymalizacji struktury WT multimodalnego typu jako element systemu podjęcia decyzji w zakresie zarządzania wielocelowym rozdzielonym na różnych terenach kompleksem logistycznym.

---

### Streszczenie

Artykuł poświęcony jest zadaniu budowy modelu optymalizacji struktury wielocelowego węzła transportowego typu multimodalnego. Węzeł takiego typu stanowi element przecięcia tras towarowych na grafie transportowego systemu logistycznego. Przedstawione są wyrażenia dla oceny wydajności pracy i granicznej wydajności pracy przy modelowaniu stanu węzła transportowego według funkcji Cobb'a-Douglas'a. Określono wskaźniki optymalizacji struktury takiego obiektu i bilansu potoków ładunków.

Słowa kluczowe: logistyka, model, optymalizacja, transport, węzeł transportowy.

### Shaping structures optimization model transport hub as part of the logistics system

#### Abstract

Paper is devoted to the problem of constructing a model structure optimization of multimodal multi-hub type. Node of this type is treated as an element of the intersection of commercial routes in the graph of the transport logistics system. Expressions are given for estimating the productivity of labor and the marginal productivity of labor in the modeling of the transport node of the Cobb-Douglas. Characterized by the optimization of the structure of the object and the balance of flows.

Key words: logistics, model, optimization, transport, transport hub.

LITERATURA

- [1] I. Arefyev. Optymalizacja w zadaniach logistyki analitycznej. "Logistyka" 4/2011, IiM, Poznań. 2011.s.43-47
- [2] I. Arefyev. Prognozowanie i kontrola stanu obiektu zarządzania w środowisku systemu PERT (metoda całkowych charakterystyk). St. Petersburg, SZTU. 2010. 305 s.
- [3] I. Arefyev. Modelownie węzła transportowego z terminalami, Warszawa, AN Polski, Logistic systems, 2005, s. 85 - 93
- [4] I. Arefyev, L. Martyszczenko, Logistyka analityczna: metody i zadania, Transport XXI century, Warszawa: ANP, 2007. s. 15 - 23
- [5] I. Arefyev, L. Martyszczenko, A. Kivalov, Analityczna logistyka (Ekonometria systemów logistycznych). St. Petersburg, SZTU, 2007, 94 s.
- [6] Douglas P. H. Are there laws of production. American Economic reviewer, 1948 – V. 38. № 1.