

**Jolanta Żak<sup>1</sup>**

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

## O pewnym podejściu do modelowania procesów transportowych

### 1. WPROWADZENIE

Badanie rzeczywistych procesów transportowych uwzględnienia takich elementów systemu transportowego jak:

- sieci: drogowa, kolejowa, lotnicza i inne,
- tabor (samochody, autobusy, pociągi, samoloty),
- stacje obsługi ruchu towarowego i pasażerskiego,
- urządzenia zabezpieczenia ruchu (znaki drogowe, sygnalizacja świetlna) wraz z przepisami bezpieczeństwa i kontroli ruchu
- oraz tzw. „załoga systemu” [4].

Analiza zachowania się systemu transportowego w czasie, zarówno w bieżących warunkach eksploatacyjnych, jak i podczas prac projektowych wymaga budowy modelu procesu transportowego. Uwzględniając powyższe modelowanie procesów transportowych polega na badaniu związków występujących między zadaniami systemu, jego wyposażeniem oraz organizacją działania systemu prowadzącą się do wyboru technologii przebiegu procesu. Reasumując wybór realizacji procesu przemieszczania jednostek ruchu w systemie transportowym zależy od wielu czynników: technicznych, techniczno-technologicznych oraz organizacyjnych.

Problematykę modelowania procesów transportowych można podzielić na obszary dotyczące [1][3][5][9] [10][12]:

- analizy i oceny technologii pracy stacji kolejowej oraz badania płynności ruchu pociągów na liniach kolejowych,
- analizy i oceny obsługi ładunków bądź pasażerów w wielu obiektach infrastrukturalnych systemu transportowego,
- analizy powstawania kolejek w ruchu pojazdów oraz związanego z nimi zjawiska kongestii,
- badania zależności wydajności procesów transportowych od parametrów infrastruktury liniowej, i punktowej,
- badania zależności płynności ruchu od prędkości, gęstości ruchu i parametrów drogi,
- analizy i oceny sterowania centralnego przy jednoczesnym sterowaniu przepustowością elementów infrastruktury.

Do badania procesów transportowych wykorzystuje się różne metody uwzględniające bądź nie element losowości. W tym drugim przypadku szerokie zastosowanie już od lat 50. ubiegłego stulecia, ma teoria masowej obsługi [2][6][7][8]. Jednakże metodykę tę stosowano najczęściej badając wybrane procesy transportowe występujące w poszczególnych elementach sieci transportowej (np. centrach logistycznych). Nie prowadzono badań w ujęciu systemowym.

Podsumowując problematyka modelowania procesów transportowych dotyczy trudnych i złożonych zagadnień. Wynika to między innymi z faktu, iż do opisu przebiegu procesu transportowego należy wykorzystać wielkości losowe.

Artykuł dotyczy modelowania procesów transportowych metodą sieci faz [11]. Metoda ta wykorzystuje do badania proste systemy masowej obsługi i pozwala na ocenę przebiegu procesu w badanym systemie.

---

<sup>1</sup>j.zak@wt.pw.edu.pl

## 2. MODELOWANIE PROCESU TRANSPORTOWEGO METODĄ SIECI FAZ

### 2.1. Założenia

Celem modelowania procesu transportowego jest odwzorowanie modelu rzeczywistego zachowanie się systemu transportowego z dokładnością do ruchu jednostek, a następnie prowadzenie na nim eksperymentów. Metoda sieci faz zaproponowana w artykule, opiera się na założeniu, że cały proces transportowy od stanu początkowego do stanu końcowego można podzielić na fazy odpowiadające kolejnym etapom przemieszczania pojazdów. Sposób podziału i zawartość informacji poszczególnych faz procesu jego realizacji wynika z celu i zakresu badań, któremu ma służyć taka dekompozycja procesu transportowego [11]. Założono również, że pomiędzy fazami zachodzi wymiana typu zadanie - wyposażenie w rozumieniu współdziałania sąsiednich faz. Zadanie fazy poprzedniej w stosunku do fazy rozpatrywanej jest konfrontowane z wyposażeniem fazy rozpatrywanej, a następnie zadanie fazy rozpatrywanej z wyposażeniem fazy następnej. Takie podejście sprowadza się do założenia, że realizacja procesu transportowego musi mieć strukturę sieciową utworzoną przez relacje pomiędzy poszczególnymi fazami realizacji procesu transportowego.

Ponadto założono, że przemieszczanie jednostek ruchu określone jest relacjami przemieszczania, rodzajem, liczbą oraz cechami przemieszczanych pojazdów w systemie transportowym. Rzeczywisty proces transportowy charakteryzuje się zmienną intensywnością strumieni jednostek ruchu, co powoduje, że procesy transportowe mogą mieć charakter stacjonarny lub niestacjonarny. Zazwyczaj, rzeczywiste procesy transportowe mają charakter niestacjonarny determinowane jest to np. zmianami w natężeniu ruchu na drogach w różnych porach dnia (poranny szczyt komunikacyjny w miastach). Niestacjonarny charakter procesów transportowych komplikuje prowadzenie badań. Dlatego w badaniach najczęściej przyjmuje się uproszczenia, pozwalające na przyjęcie założenia, o stacjonarności procesu, a więc stałej wielkości intensywności ruchu. Przyjęcie założenia o stacjonarności oznacza, że w każdym przedziale czasu prawdopodobieństwo pojawiania się określonej liczby jednostek ruchu zależy tylko od długości ustalonego okresu, a nie od położenia tego przedziału na osi czasu. Uproszczenie to wymaga podziału przedziału czasu na odpowiednio krótkie odcinki.

Badając proces transportowy należy uwzględnić w nim elementy modelu systemu transportowego (tj. [4]: obiekty stałe o zadanych charakterystykach, pojazdy, ludzi stanowiących załogę systemu transportowego posługujących się elementami wyposażenia technicznego systemu dla realizacji przemieszczania osób i ładunków, system organizacyjny zapewniający prawidłowe wykorzystanie wyposażenia technicznego transportu) oraz charakterystyki elementów jego struktury, wielkości zapotrzebowania na przewóz oraz organizację będącą opisem sposobu wykorzystania elementów struktury systemu do realizacji zapotrzebowania na przewóz.

Badanie procesu polega na analizowaniu przebiegu zmian stanów systemu dla różnej sytuacji decyzyjnej. Przy czym *stan systemu transportowego w wyróżnionej chwili oznacza najmniejszą liczbę danych, wartości wyróżnionych cech systemu, których znajomość w wyróżnionej chwili, pozwala jednoznacznie określić wielkości wyjściowe tego systemu*[5][13]. Zatem aby określić stan systemu transportowego należy określić stan elementów dróg systemu oraz stan pojazdów. Oba te opisy stanu systemu transportowego są jednoznaczne.

### 2.2. Elementy modelu sieci faz procesu transportowego

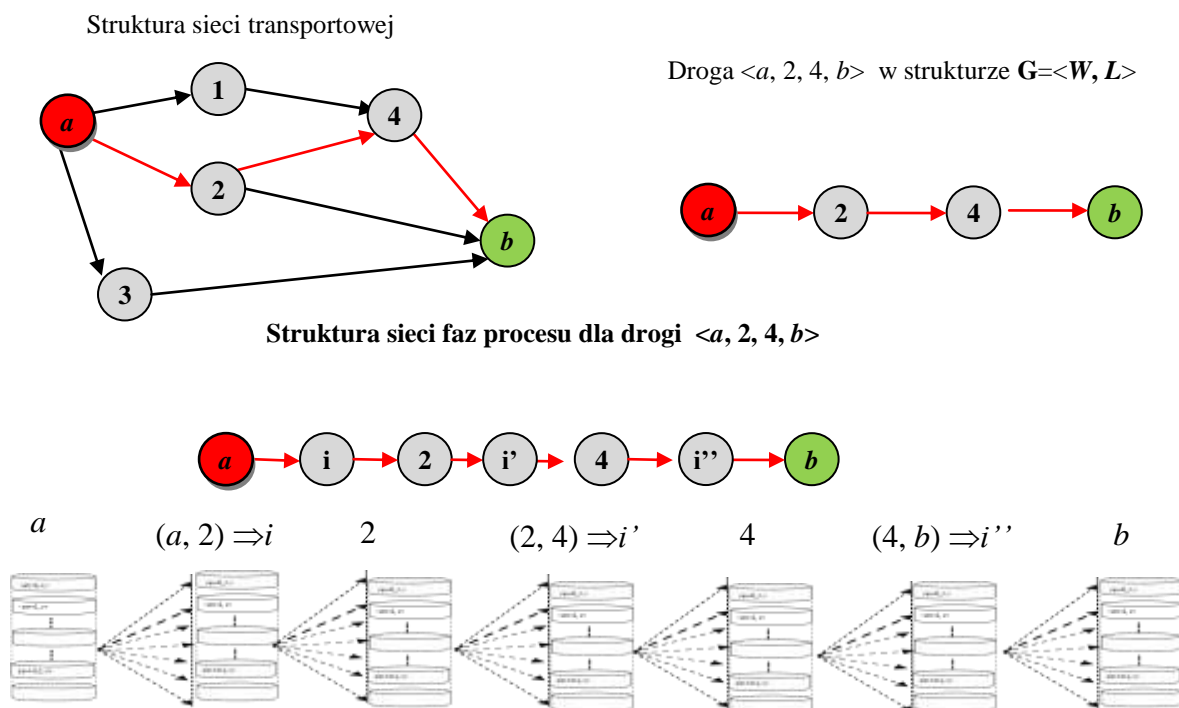
Jak przedstawiono we wcześniejszym podpunkcie procesu transportowego można zapisać jako ciąg związków między stanami systemu transportowego oraz czasem jako zmienną niezależną. Pozwala to na przedstawienie wektora stanu systemu transportowego jako ciągu zmian stanu elementów infrastruktury systemu.

W metodzie sieci faz przyjęto, że stan systemu będzie stanowić fazę procesu, natomiast zmiana stanu (przejście z danej fazy procesu do następnej) będzie zdarzeniem [11]. Powstała struktura nazywana jest strukturą sieci faz procesu przemieszczania, przy czym fazę procesu charakteryzuje czas jej trwania, zaś zdarzenie chwila jego wystąpienia. W takim układzie struktura sieci faz procesu przemieszczania jest odwzorowaniem struktury transportowej oraz odwzorowaniem procesu przemieszczania jednostek transportowych w sieci transportowej.

Dla opisu elementów struktury sieci faz procesu wykorzystany zostanie metoda teorii masowej obsługi (SMO), w której wyróżniamy strumień zgłoszeń jednostek transportowych (pojazdów) do kolejnej fazy obsługi, miejsce oczekiwania jednostek transportowych (poczekalnię) na obsługę w kolejnej fazie obsługi, stanowisko (stanowiska) obsługi w tej fazie obsługi oraz strumień obsłużonych jednostek transportowych. Relacje występujące między stanami systemu odwzorowano w postaci **sieci**, którą nazwano **siecią faz procesu**.

Zatem sieć faz procesu odwzorowuje związki między fazami procesu, a struktura sieci faz procesu odwzorowuje strukturę procesu transportowego, przy czym każda z faz stanowi węzeł struktury a zdarzenie jej łuk. W tym kontekście węzeł sieci faz, w zależności od podejścia, może odwzorowywać element drogi systemu, przez który przepływa potok ruchu lub pojazd któremu przydzielono odpowiednie elementy infrastruktury. Faza procesu odwzorowuje zarówno punktowy jak i liniowy element drogi.

Przykład przejścia ze struktury sieci transportowej na strukturę sieci faz procesu przedstawiono na rysunku 1.



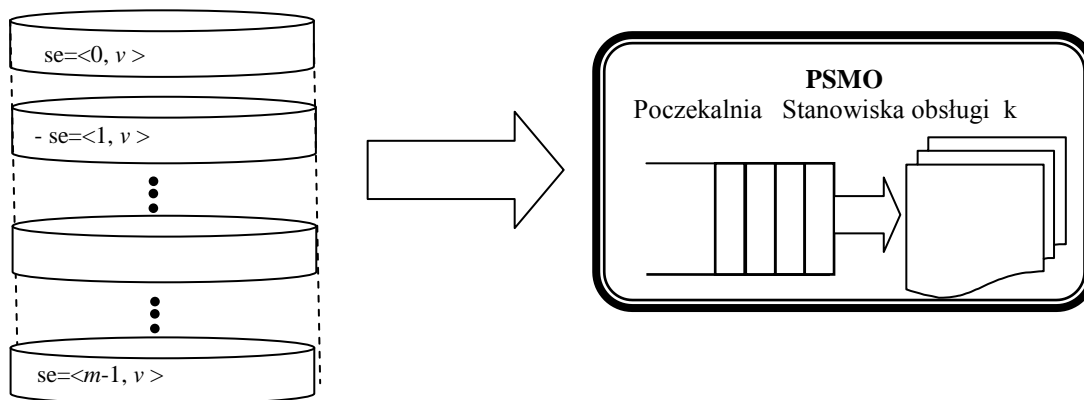
Rys. 1. Struktura sieci faz odwzorowująca strukturę przykładowej sieci transportowej

Źródło: [11]

Jak wcześniej wspomniano każda faza przedstawiana jest jako prosty system masowej obsługi (PSMO). Zgodnie konwencją oznaczeń dotyczącej teorii masowej obsługi, wśród elementów PSMO stosowanych w metodzie sieci faz można wyróżnić:

- miejsce oczekiwania pojazdów zwane poczekalnią, tj. bufor v-tej fazy procesu,
- stanowisko obsługi, generator zmian faz procesu,
- strumień zgłoszeń pojazdów
- ujście strumienia potoku ruchu,

Przekształcenie fazy obsługi dla dowolnego stanu w system masowej obsługi przedstawiono na rys 2.



Rys. 2. Przekształcenie zbioru stanów dopuszczalnych na PSMO.

Źródło: [11]

Model procesu transportowego metoda sieci faz wymaga zdefiniowania:

- struktury sieci faz, **GFSP**
- charakterystyk elementów struktury sieci faz przedstawiającą rzeczywiste właściwości elementów struktury sieci faz (szczególnie charakterystyki określone na węzłach sieci faz wynikające z opóźnień jednostek ruchu, zmian fazy, dostępności elementów dróg i ograniczeń zasobów procesu transportowego), **FFSP**
- wielkości strumienia zgłoszeń (zadań systemu transportowego) identyfikowanych na wejściu do sieci faz (wielkość zapotrzebowania na usługi transportowe zgłaszane przez nabywców usług), **ZST**
- sterowanie rozumiane jako sposób przeprowadzenia jednostek ruchu przez sieć faz od wejścia do wyjścia (wybór reguł, realizacji procesu transportowego) **SFP**.

Model procesów transportowych siecią faz (**MPTSF**) zapisany jest, jako uporządkowana czwórka, postaci:

$$\mathbf{MPTSF} = \langle \mathbf{GFSP}, \mathbf{FFSP}, \mathbf{ZST}, \mathbf{SFP} \rangle \quad (1)$$

Reasumując metodyka modelowania procesów transportowych metodą sieci faz procesu zawiera następujące etapy:

1. identyfikację struktury sieci transportowej,
2. przekształcenie struktury sieci transportowej w sieć faz procesu (postać uproszczona),
3. opis węzłów sieci faz procesu jako systemów masowej obsługi SMO (postać pełna struktury sieci faz),
4. parametryzację elementów struktury sieci faz,
5. identyfikację strumienia zgłoszeń pojazdów,
6. identyfikację dróg dla realizacji procesu transportowego,
7. identyfikację warunków brzegowych oraz ograniczeń realizacji procesu transportowego,
8. identyfikację wskaźników oceny i kryteriów realizacji procesów transportowych,
9. opracowanie modeli procesów transportowych dla różnych sytuacji decyzyjnych.

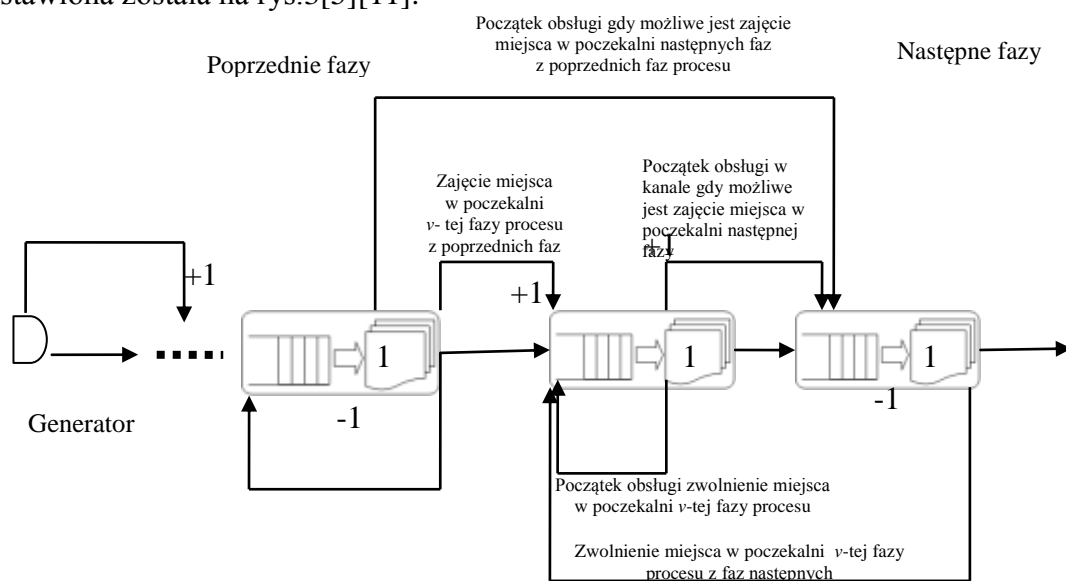
### 2.3. Wybrane charakterystyki elementów sieci faz procesu transportowego

Charakterystyki procesu transportowego uwzględniają zależności między stanami elementów dróg i stanami pojazdów tworzących potok ruchu oraz metodykę teorii masowej obsługi, tj. :

- liczbę miejsc w poczekalni - wyrażoną w liczbie pojazdów (np. odwzorowanie liczby torów),
- liczbę kanałów obsługi - wyrażoną w liczbie pojazdów, które mogą być jednocześnie obsługiwane (np. odwzorowanie liczby pracowników obsługi),
- regulamin wyboru pojazdu do obsługi w kanale i jednocześnie odwzorowanie sterowania ruchem pojazdów w sieci faz procesu.

- czasy obsługi w danym kanale,
- warunki rozpoczęcia i zakończenia obsługi w kanale,
- warunki wyboru następnej fazy (następnego węzła) w sieci faz procesu w sposób uzależniony od rodzaju (klasy) pojazdu - odwzorowanie kolejności faz w procesie transportowym i jednocześnie odwzorowanie organizacji ruchu w sieci faz procesu. Jeśli w poczekalni  $v$ -tej fazy procesu transportowego nie ma wolnych miejsc następuje przesunięcie momentu zakończenia obsługi w fazie poprzedzającej  $v$ -tą fazę. Natomiast brak wolnego kanału obsługi w  $v$ -tej fazie powoduje przesunięcie momentu początku obsługi w tej fazie. Pojazd, który znajduje się w  $v$ -tej fazie dalej oczekuje w poczekalni tej fazy na obsługę (oczekuje na przejście do kanału obsługi). Brak miejsca w poczekalni fazy następującej po  $v$ -tej fazie powoduje przesunięcie momentu zakończenia obsługi w  $v$ -tej fazie o odpowiedni czas.

Ilustracja graficzna opisu warunków rozpoczęcia i zakończenia obsługi w danej fazie przedstawiona została na rys.3[5][11].



**Rys. 3.** Ilustracja zajętości oraz zwolnienia miejsc przez jednostki transportowe w węzle sieci faz procesu

Źródło: [11]

#### 2.4. Wielkość strumienia zgłoszeń do systemu

Charakterystyki procesu transportowego zależą od wielkości strumienia zgłoszeń do systemu. W metodzie sieci faz zakłada się, że potok pojazdów jest generowany w postaci strumienia zgłoszeń, który pojawia się na wejściu do sieci faz procesu i przepływa przez tę sieć aż do wyjścia z tej sieci.

W dowolnej chwili  $i$  w każdym stanie pojazdy znajdujące się w sieci faz charakteryzowane będą [11]:

- chwilą zmiany stanu,
- typem środka transportowego,
- relacją przemieszczenia pojazdu, przy czym przez relację rozumiemy parę węzłów stanowiących wejście do i wyjście z sieci faz,
- rozkładem możliwych zmian stanu o znanym prawdopodobieństwie.

Ponieważ przyjęty model jest modelem stochastycznym zatem, niektóre charakterystyki strumienia zgłoszeń (liczba a także struktura pojazdów pojawiających się w źródle, możliwości zmian stanu, a także chwile zmiany stanu) wyrażone zostały dyskretnymi zmiennymi losowymi.

#### 2.5. Warunki początkowe i ograniczenia w modelu procesów transportowych

Realizacja procesu transportowego wymaga, aby poszczególne pojazdy, które wejdą do sieci faz procesu zostały w niej obsłużone. Jest to związane z pobytem pojazdów w poszczególnych węzłach

sieci faz procesu oraz z przejściami między poszczególnymi fazami procesu, jak również z przejściami wewnątrz węzłów sieci z miejsc oczekiwania na obsługę do miejsc obsługi. Obsługę pojazdów w sieci faz procesu poprzedza ich pojawianie się w wyróżnionych węzłach tej sieci traktowanych jako jej wejścia.

Wśród ograniczeń występujących w metodzie sieci faz można wyróżnić:

- ograniczenie na liczbę pojazdów w węzłach sieci faz wynikająca z faktu iż liczba pojazdów danego typu znajdujących się w kolejnych chwilach w poszczególnych węzłach sieci faz procesu wynika bezpośrednio z liczby pojazdów, które w tej chwili zajmują miejsca w poczekalni danego węzła oraz liczby pojazdów, które w tej chwili zajmują kanały obsługi znajdujących się w danym węźle sieci faz procesu,
- ograniczenie na zakończenie obsługi w węzłach sieci faz procesu,
- ograniczenie na przyporządkowanie pojazdu do kanału obsługi w danym węźle sieci faz procesu wynikający z faktu że, żaden pojazd tworzący potok ruchu może odwiedzić co najwyżej jeden kanał obsługi w danym węźle sieci faz.
- ograniczenie na prawdopodobieństwo przejścia pojazdu danej klasy między fazami w dowolnej chwili,
- ograniczenie na liczbę pojazdów w kanałach obsługi dla każdego węzła sieci faz,
- i inne.

## 2.6. Wskaźniki i kryteria oceny procesu w modelach procesów transportowych

W badaniach procesów transportowych ważnym wskaźnikiem jest liczba pojazdów danego typu, w funkcji wybranych przedziałów czasowych (np. godziny poranne, południowe czy popołudniowe) lub w skali globalnej liczba wszystkich pojazdów dowolnego typu przemieszczających się w badanym fragmencie sieci transportowej w rozpatrywanym przedziale czasu.

Wśród kryteriów oceny realizacji procesu transportowego można wyróżnić:

- ważne straty czasu pojazdów. Straty te powstają na skutek sytuacji konfliktowych występujących w sieci faz procesu. Rozwiązywanie konfliktów polega na bieżącym oddziaływaniem na potok ruchu w sposób zmierzający do poprawy jakości realizacji procesu transportowego, odniesionej do przyjętego kryterium oceny,
  - stopień wykorzystania poszczególnych elementów i całego systemu transportowego. Stopień wykorzystania całego systemu można ocenić jako stosunek całkowitego czasu niezbędnego do przemieszczenia się pojazdów w sieci transportowej do maksymalnego całkowitego czasu pobytu pojazdów w sieci transportowej,
  - maksymalny całkowity czas pobytu pojazdów w sieci transportowej,
  - maksymalny średni stopień wykorzystania wszystkich elementów infrastruktury,
  - średni stopień wykorzystania wszystkich czynnych elementów systemu transportowego,
  - najbardziej wykorzystywany element infrastruktury. Kryterium to pozwala na wyznaczenie najbardziej obciążonego elementu infrastruktury tzw. wąskiego gardła, a tym samym pozwoli na podjęcie decyzji o zwiększeniu przepustowości danego elementu (np. poszerzeniu drogi, lub zwiększeniu prędkości dopuszczalnej),
  - najmniej wykorzystywany element infrastruktury. Kryterium to pozwala na wyznaczenie najmniej obciążonego elementu infrastruktury a tym da wskazówkę decydentom który element sieci transportowej jest zbędny i można go zlikwidować. Oczywiście o ile nie jest on ważny z innych punktów widzenia na przykład społecznych czy też ekologicznych,
  - straty czasu występujące podczas procesów transportowych stanowiące różnice między całkowitym czasem pobytu pojazdów w sieci transportowej a czas minimalnym,
  - koszt przewozu,
  - całkowity czas pobytu pojazdów w czynnych elementach sieci transportowej.
- Zapis formalny powyższych kryteriów znajduje się w pracy [11]

### 3. WNIOSKI

Przedstawiona metoda sieci faz pozwala na odwzorowanie dynamiki procesów transportowych, umożliwia m.in. badanie współzależności działania poszczególnych elementów w systemie oraz badania wrażliwości parametrów pracy systemu na zmiany w nim zachodzące.

Zapis formalny procesów transportowych przy uwzględnieniu metody sieci faz procesu umożliwia:

- sformułowanie modeli matematycznych procesów transportowych dla różnych sytuacji decyzyjnych w tym dla przypadku procesów transportowych jednowymiarowych (jeden rodzaj pojazdów), wielowymiarowych (wiele rodzajów pojazdów),
- badanie parametrów systemów transportowych przy różnych typach jego obciążenia oraz przy wszelkiego rodzaju zakłóceniach z uwzględnieniem stochastycznych rozkładów strumieni zgłoszeń oraz czasów obsługi pojazdów,

Zaproponowane kryteria oceny rozwiązań pozwalają na ocenę działania systemu transportowego uwzględniając różne ograniczenia dotyczące elementów procesu, dla różnych zadań przewozowych. Ponadto pozwalają wyznaczenie zbyt mało i za bardzo obciążonych elementów infrastruktury co w konsekwencji pozwala na podjęcie decyzji o modernizacji lub likwidacji elementów infrastruktury transportowej.

Przedstawiona metoda modelowania procesów transportowych może zostać zastosowana podczas budowy modeli symulacyjnych zarówno autorskich jak i komercyjnych zawierających możliwość zapisu sieci systemów masowej obsługi, np. JAVA MODELLING TOOLS, WINQSB czy też DOSIMIS-3.

Ponadto, zaproponowana w artykule metoda może mieć zastosowanie do:

1. analizy i oceny technologii pracy liniowych i punktowych elementów infrastruktury transportu kolejowego i drogowego,
2. analizy i oceny obsługi ładunków bądź pasażerów w obiektach infrastrukturalnych systemu transportowego, w tym planowania zmian wyposażenia np. magazynów, terminali przeładunkowych, portów morskich, portów lotniczych,
3. oceny strat czasu przejazdu ze względu na zmienne natężenie ruchu na drogach wynikające z dobowego rytmu pracy ludzi, podróży do i z pracy lub szkoły,
4. badania zależności efektywności realizacji procesów transportowych od parametrów infrastruktury liniowej i punktowej.

Reasumując, można stwierdzić, że zaproponowane podejście pozwala na kompleksową ocenę procesów transportowych oraz parametrów systemu transportowego mających wpływ na przebieg procesów.

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę sieci faz umożliwiającą modelowanie procesów transportowych. Zdefiniowano pojęcie fazy procesu i zdarzenia. Przedstawiono opis struktury sieci faz i jej charakterystyk, a także przekształcenie procesu transportowego w sieć faz, zaproponowano zbiór ograniczeń uwzględniających aspekty techniczne, ekonomiczno-technologiczne oraz kryteriów oceny procesu. Przedstawiona w artykule metoda pozwala w zależności od sytuacji decyzyjnej na sterowanie procesami transportowymi.

Słowa kluczowe: proces transportowy, model, sieć faz procesu

#### About one approach to modeling of transport processes

##### Abstract

Article presents method of net of process phases allowing modelling transport processes. The process phase and event were defined. Full description of structure of process phases and its characteristics is provided as well as procedure of transforming transport process into net of phases. Appropriate set of constrains taking into account technical and economic aspects and evaluation criteria are proposed. Presented method allows – depending on decision situation – controlling transport processes.

Keywords: transport process, model, net of process phases

## LITERATURA

- [1] Ambroziak T., Jacyna M.: Wybrane aspekty modelowania dynamiki procesów transportowych, Prace Naukowe PW, Transport, z. 53, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004
- [2] Edie L.C., Foote R.S.: Traffic flow in tunnels, Proceedings of the Highway Research Board, 37, 1958.
- [3] Han S.: Dynamic traffic modelling and dynamic stochastic user equilibrium assignment for general road networks, Transportation Research 37B
- [4] Jacyna M.: Modelowanie i ocena systemów transportowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [5] Leszczyński J.: Modelowanie systemów i procesów transportowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994
- [6] Miller A.J.: Settings for fixed-cycle traffic signals, Operational Research Quarterly, 14, 1963.
- [7] Vickrey W.: Congestion theory and transport investment, American Economic Review, 59, 1969
- [8] Wardrop J.G.: Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institute of Civil Engineers II. 1, 1952.
- [9] Woch J.: Teoria potoków ruchu, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Katowice, 2001.
- [10] Żak J., Teoria kolejek w zastosowaniu do opisu procesu transportowego, Logistyka 4/2012.
- [11] Żak J.: Modelowanie procesów transportowych metoda sieci faz , Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, z. 99, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013
- [12] Żak J.: Modelowanie usług transportowych w obszarze działania centrum logistycznego, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, z. 64, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
- [13] Żak J.: Wybrane aspekty dynamiki procesu transportowego Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, z. 97, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.