

Janusz WOCH¹

OPTIMALIZACJA SIECI TRANSPORTOWYCH W NOWYM UJĘCIU

Streszczenie. Artykuł przedstawia nowe ujęcie optymalizacji sieci transportowych, wykorzystujące fakt zależności przepustowości sieci transportowej od organizacji ruchu w skrzyżowaniach transportowych, proponując głębokie analizy przepustowości warunkowych, pozwalające na dobrą identyfikację wąskich gardeł sieci transportowej, a następnie usuwanie tych wąskich gardeł w kolejności najistotniejszych wąskich gardeł. Dowodzi się, że jest to jedyne właściwe ujęcie optymalizacji sieci transportowych. Tak więc optymalizacja sieci transportowych jest w gruncie rzeczy zagadnieniem oceny warunkowych przepustowości sieci transportowej, a więc głównie problemem teoriopotokowym!

TRANSPORTATION NETWORK OPTIMIZATION IN NEW WAY

Summary. The article is presenting the new way of methods for transportation network optimization who are based on the fact that the dependency of intersection capacity from traffic assignment. Proposed method is deep analyze the conditional capacities, that gives the good estimation of the network bottlenecks, and in the next steps, and the bottlenecks remove in order the most serious bottlenecks. This is proved that such method of network optimization is proper only. So the network optimization is as a matter of fact, the conditional network capacity problem and this is the traffic theory problem only!

1. CELE ARTYKUŁU - PRZEDSTAWIENIE NOWEJ METODY OPTIMALIZACJI SIECI TRANSPORTOWYCH

Dotychczasowe metody optymalizacji sieci transportowych są niewłaściwe, bowiem bazują na założeniu, że funkcje kryterialne optymalizacji sieci transportowej są stałe dla danej sieci transportowej, jak to na przykład robi Steenbrink (1978). Jak wiadomo, czas podróży zależy od organizacji ruchu na skrzyżowaniach transportowych, tak więc nie możemy założyć, że czas podróży jest tylko funkcją stopnia wykorzystania przepustowości drogi, bowiem przepustowość drogi jest charakterystyką warunkową, zależną od organizacji ruchu na skrzyżowaniu. Gdy uświadomimy sobie ten fakt, dobrze znany inżynierom ruchu, to najważniejszym problemem optymalizacji sieci transportowych jest ocena przepustowości skrzyżowań, a więc zagadnienie teoriopotokowe, a nie sama algorytmiczna optymalizacja. Do właściwej optymalizacji sieci transportowych droga wiedzie przez właściwą, głęboką analizę przepustowości skrzyżowań. Metoda usuwania wąskich gardeł w sieci transportowej jest przez Steenbrinka (1978) zaliczana do znanych metod heurystycznych dlatego przede wszystkim, ponieważ bazuje na słabych metodach oceny przepustowości dróg. Gdy zastąpimy te słabe metody oceny przepustowości sprawnymi metodami symulacyjnymi, pozwalającymi na ocenę warunkowych metod oceny przepustowości, to otrzymujemy sprawne narzędzie optymalizacji sieci transportowej.

¹ Wydział Transportu Politechniki Śląskiej; ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

W latach 70. ubiegłego wieku na Śląsku działała jedna z najgęstszych sieci kolejowych na świecie, która powstała w regionie wielkiego wydobycia węgla oraz wielkiej produkcji stali. Ruch kolejowy generowany przez ten region wywoływał ciągle korki. W tym samym czasie Steenbrink (1978) optymalizuje za pomocą komputera holenderski system transportowy oraz pisze swoją znaną książkę, stanowiącą do dzisiaj podstawową literaturę na temat optymalizacji sieci transportowej. Natomiast Woch w latach (1974, 1975, 1977) opracowuje probabilistyczne, symulacyjne modele węzłów torowych oraz rozwiązuje problem oceny przepustowości węzłów torowych, jako problem optymalizacyjny, wprowadzając zamiast pojęcia przepustowości pojęcie optymalnego natężenia, co stanowi jego pracę doktorską Woch (1975). W tym okresie również powstaje idea systemu oceny układów torowych SOUT w pracy Barona i Wocha (1974). Jest to idea systemu komputerowego, nowego narzędzia oceny przepustowości węzłów torowych wyposażonego w bazę danych o eksploatowanej sieci transportowej PKP oraz archiwum ocen przepustowości sieci kolejowej. W swojej pierwszej publikacji książkowej Woch (1977) rozszerza swoje narzędzia analizy przepustowości o stacje rozrządowe, którymi dotychczas zajmował się Węgierski (1971, 1973), tworząc nowe oprogramowanie komputerowe SOUT.

W latach 80. ubiegłego wieku metody soutowskie zostały rozpowszechnione na PKP. W tym okresie Woch (1983, 1986) kieruje cłym zespołem wprowadzającym metody soutowskie do praktyki zaplecza badawczego oraz projektowego PKP. Głównym celem tych prac jest optymalizacja sieci kolejowej PKP, co zakończyło się sukcesem, a więc zamiast komputerowej optymalizacji sieci transportowej w stylu Steenbrinka (1978), uzyskano nową metodę optymalizacji sieci transportowej, wykorzystującą metody soutowskie. Z tego powodu w rozdziale 5 przedstawia się te metody, aby wyjaśnić, jak funkcjonuje w praktyce pojęcie optymalne natężenie (p. np. Woch, 1977, 1983, 1986, 1989, 1993, 1998a, 1998b, 1999a, 1999b, 1999c, 2000a, 2000b, 2001b, 2003).

Gdy zaczynamy myśleć o częstym w praktyce inżynierii ruchu zagadnieniu wyznaczania wąskiego gardła w sieci transportowej, to widać wiele różnych metod definiowania wąskiego gardła sieci transportowej.

2. CHARAKTERYSTYKI ZŁOŻONYCH SKRZYŻOWAŃ TRANSPORTOWYCH

Skrzyżowania transportowe są przedmiotem zainteresowania teoretyków potoków ruchu (patrz Drew, 1968, Haight, 1963, Tanner 1962, Webster 1958), jak i projektantów dróg i ruchu transportowego (patrz Datka, Suchorzewski i Tracz 1989, Węgierski 1971). Modelowanie matematyczne skrzyżowań transportowych wymaga zastosowania narzędzi teorii kolejek (patrz Gross i Harris, 1974, Heidemann 1996, Woch 1977, 1983, 1990, 1998a, 1998b, 1999a, 1999b, 1999c, 2000a, 2000b, 2001b, 2003).

Elementarnym skrzyżowaniem transportowym nazywać się będzie skrzyżowanie, połączenie lub rozłączenie dróg dwóch potoków ruchu. Są to miejsca powstawania kolejek ruchu w kolizyjnych sytuacjach ruchowych. W zależności od sposobu zapewnienia bezpieczeństwa ruchu można budować różne modele kolejek na skrzyżowaniach elementarnych. Jednak bardzo często okazuje się, że niezależne modele kolejek ruchu skrzyżowań elementarnych są niewłaściwe, ponieważ występuje zjawisko równoczesności kolejek więcej niż jednego pojazdu, wywołane przejazdem jednego pojazdu, kolizyjnego dla wielu elementarnych skrzyżowań, które może mieć złożone oddziaływanie na czas kolejek potoków równoległych. Na przykład, skrzyżowanie dwutorowej linii tramwajowej z uprzywilejowanym ruchem z jednokierunkową drogą samochodową o trzech pasach ruchu składa się z sześciu elementarnych skrzyżowań, które należy rozważać łącznie w

modelowaniu kolejek ruchu. Podobnie łącznie należy modelować kolejki ruchu w kolejowych posterunkach odgałęźnych oraz głowicach stacyjnych, a więc kolejki wywołane kolizyjnością węzłów torowych.

Podstawowym skrzyżowaniem transportowym nazywać się będzie zespół powiązanych skrzyżowań elementarnych taki, że każda jednostka ruchu przechodząca przez to skrzyżowanie może być zakłócona bezpośrednio przez pojazd innego potoku tylko raz. Tak więc podstawowym skrzyżowaniem ruchu samochodowego jest rejon wjazdu i wyjazdu z ronda, skrzyżowanie linii tramwajowej z drogą samochodową lub kolejowe węzły torowe. Podstawowym skrzyżowaniem transportowym jest też przejście dla pieszych przez wielopasową drogę samochodową wraz z torami tramwajowymi. Skrzyżowania podstawowe w swej istocie są najmniejszymi fragmentami sieci transportowej, które ze względu na modelowanie kolejek ruchu należy rozważać jako całość.

W potocznym rozumieniu pojęcia skrzyżowanie podstawowe zawiera się zwykle fragment sieci złożony z kilku blisko położonych skrzyżowań elementarnych. Są to więc takie miejsca, w których dla ustalonego pojazdu kolejki z powodu bezpośrednich kolizji ruchowych z pojazdami innych potoków ruchu mogą się zdarzać więcej niż jeden raz. Kolejka na skrzyżowaniu elementarnym może się składać z wielu faz oczekiwania w kolejce, jednak w dalszym ciągu będzie to interpretowane jako pojedyncza kolejka, nazywana kolejką elementarną.

Głównym skrzyżowaniem transportowym nazywać się będzie zespół blisko położonych skrzyżowań podstawowych. Tak więc do głównych skrzyżowań można zaliczyć skrzyżowania dróg lub ulic z systemem regulacji ruchu lub bez oraz stacje kolejowe. Charakterystyki kolejek ruchu i przepustowości na głównych skrzyżowaniach transportowych należy zdefiniować dla warunków równowagi ruchu, które formułuje się na wiele sposobów, jak to wykazano w pracach Wocha (1998a), jako agregaty odpowiednich charakterystyk na skrzyżowaniach podstawowych. A więc, **oczekiwane opóźnienie** pojazdu i -tego potoku ruchu jest sumą odpowiednich oczekiwanych opóźnień na skrzyżowaniach elementarnych:

$$w_i(q_1, q_2, \dots, q_n) = \sum_{j=1}^{l_i} w_i^{(j)}(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad l_i \geq 1, \quad (1)$$

gdzie $w_i^{(j)}(q_1, q_2, \dots, q_n)$ oczekiwane opóźnienie i -tego potoku ruchu j -tego skrzyżowania elementarnego, n - liczba potoków ruchu, l_i - liczba skrzyżowań elementarnych i -tego potoku, a q_i - natężenie i -tego potoku.

Przepustowość skrzyżowania głównego równa jest, dla każdego potoku ruchu i , najmniejszej z przepustowości skrzyżowań elementarnych:

$$q_{0i}^* = q_{0i/1,2,\dots,i-1,i+1,\dots,n}^* = \min_j(q_{0i/1,2,\dots,i-1,i+1,\dots,n}^{(j)}), \quad j = 1, 2, \dots, l_i. \quad (2)$$

Optymalne natężenie i -tego potoku jest równa najmniejszemu z optymalnych natężeń skrzyżowań elementarnych:

$$q_{00i} = q_{00i/1,2,\dots,i-1,i+1,\dots,n} = \min_j(q_{00i/1,2,\dots,i-1,i+1,\dots,n}^{(j)}), \quad j = 1, 2, \dots, l_i, \quad (3)$$

gdzie

$$q_{00i}^{(j)} = q_{00i/1,2,\dots,i-1,i+1,\dots,n}^{(j)} = (q_{0i}^{(j)} : F_i^{(j)}(q_{0i}^{(j)})) = \max!, \quad F_i^{(j)}(q_i) = (1 - p_i^{(j)}(q_i))q_i,$$

natomiast $F_i^{(j)}(q_i)$ jest oczekiwaną płynnością ruchu i -tego potoku na skrzyżowaniu j -tym, to znaczy oczekiwaną liczbą pojazdów potoku i , które płynnie przejdą węzeł j , a $p_i^{(j)}(q_i)$ jest

prawdopodobieństwem opóźnienia pojazdu i -tego potoku, j -tego skrzyżowania, dla natężenia q_i , przy ustalonych natężeniach pozostałych potoków. Jak widać, optymalne natężenie na złożonych skrzyżowaniach jest charakterystyką minimaxową (patrz na przykład Haight, 1963, Woch, 1998a, 1999a, 2001b).

Powyższe trzy różne sposoby opisu ograniczeń przepustowości sieci transportowej dają **tę samą lokalizację wąskich gardeł**, to znaczy skrzyżowania j -tego, w którym jest **największe oczekiwane opóźnienie** potoku i :

$$w_i^{(j)}(q_1, q_2, \dots, q_n) = \max(w_i^{(j)}(q_1, q_2, \dots, q_n)), \quad j = 1, 2, \dots, l_i. \quad (4)$$

Jest to samo miejsce j , co w (2), a więc jest to **miejsce najmniejszej przepustowości**. Również jest to samo miejsce j , co w (3), a więc - **miejsce najmniejszej płynności ruchu**. W dalszym ciągu analizowane są przyczyny powyższych wniosków.

Ze względu na złożoność opisu ograniczeń przepustowości sieci transportowej dobrze jest stosować jednocześnie **dwie równoważne sposoby agregacji charakterystyk** (2) - (4) - potokowy, taki jak (1) - oraz węzłowy, w którym charakterystyki otrzymywane są w dwóch etapach: na poszczególnych skrzyżowaniach głównych obliczane są sumaryczne charakterystyki (2) - (4), a następnie tworzone są **sumaryczne charakterystyki** (2) - (4) dla sieci transportowej, tak jak w przykładzie w pracach Wocha (1998a, 1999a, 1999b, 1999c, 2001b). **Hierarchiczna struktura opisu ograniczeń przepustowości** na skrzyżowaniach głównych oraz sieci transportowej daje możliwość formułowania nowych, lepszych projektów ruchu oraz zapewnia kontrolę ekspertów nad złożonym informacyjnie procesem optymalizacji sieci transportowej.

3. FUNKCJE OPOŹNIEŃ A FUNKCJE PŁYNNOŚCI RUCHU

Dla ustalonego potoku ruchu kolejkę na skrzyżowaniu elementarnym można charakteryzować na dwa sposoby: poprzez oczekiwane opóźnienie oraz oczekiwaną liczbę opóźnionych pojazdów. Ponieważ dotyczą one tego samego procesu kolejek, są to równoważne sposoby opisu procesu kolejek, jednak z formalnego punktu widzenia czasem niesłusznie traktuje się je jako nierównoważne. Co lepiej charakteryzuje proces kolejek ruchu: długości kolejek czy czasy opóźnień? Okazuje się, że w zagadnieniach przepustowości dróg równie dobrą charakterystyką jest charakterystyka długości kolejek lub jej charakterystyki pochodne.

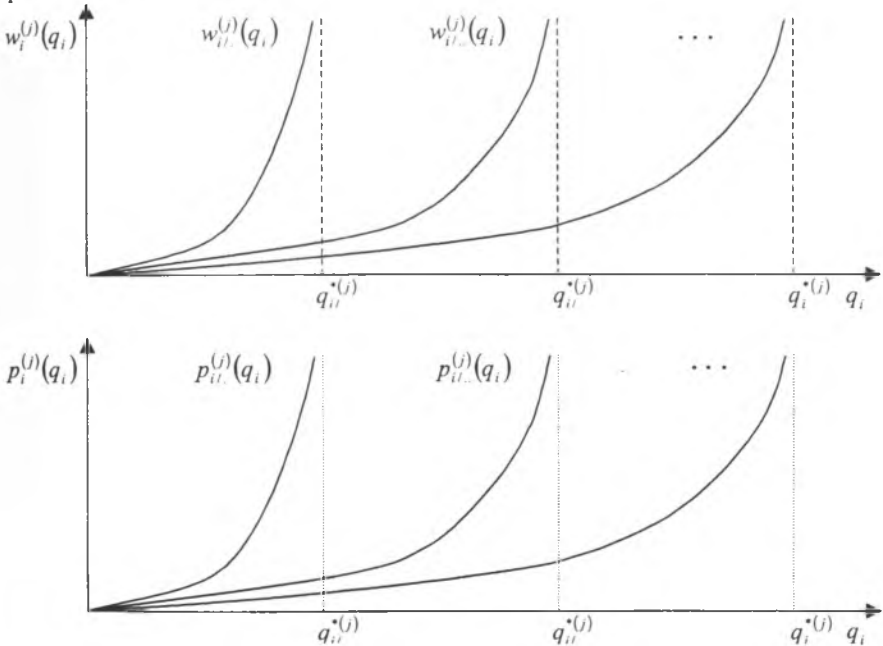
Kolejki elementarne są drobne, ponieważ w potokach ruchu występuje efekt bezpiecznego odstepu między pojazdami, wymuszający małą wariację odstepu potoku ruchu, co daje charakterystyczną „dużą wypukłość” funkcji kolejek, a więc - drobność kolejek elementarnych. Zjawisko to uzyskało również uzasadnienie teoretyczne w formie tak zwanych zlepionych kolejek (patrz Woch, 1998a, 1999a, 2003). Z tego względu w zagadnieniach przepustowości sieci transportowych powinno się stosować charakterystyki długości kolejek, jako dobrze opisujące ograniczenia przepustowości sieci transportowej i zastępujące równoważny opis poprzez charakterystyki czasu opóźnień. Specyfika procesów kolejek potoków ruchu wyrażona jest w haśle: „kolejki ruchowe składają się z dużej liczby drobnych opóźnień” i dlatego charakterystyki prawdopodobieństwa opóźnienia równie dobrze opisują zjawisko, tak jak oczekiwane opóźnienie.

Dla ustalonego potoku i **oczekiwane opóźnienie** na j -tym skrzyżowaniu elementarnym $w_i^{(j)}(q_1, q_2, \dots, q_n)$ podobne jest do **elementarnego prawdopodobieństwa opóźnienia** $p_i^{(j)}(q_1, q_2, \dots, q_n)$. Funkcje te nazywa się **funkcjami opóźnień**. Mają one swą

specyfikę: są to rosnące, wypukłe funkcje natężenia ruchu q_i ustalonego potoku ruchu i . Ponieważ wszystkie opisują ten sam proces kolejek na danym skrzyżowaniu podstawowym, to każda z nich określona jest na tym samym przedziale zmienności wyznaczonym przez przepustowość warunkową $q_{i-}^{*(j)}$ i każda z osobna wyraża dynamikę wzrostu opóźnień w różnych warunkach ruchowych. Funkcje $w_i^{(j)}$ oraz $p_i^{(j)}$ są podobne i zależą od stopnia wykorzystania przepustowości warunkowej, to znaczy jeżeli dla potoku i mamy dwa warianty ruchu w pozostałych potokach skrzyżowania j , dające istotnie różniące się przepustowości warunkowe $q_{i-}^{*(j)}$ oraz $q_{i-}^{*(j)}$, to wartości odpowiednich funkcji opóźnienia będą odwrotnie uporządkowane, jak te przepustowości warunkowe (rys. 1), a więc dla ustalonego natężenia ruchu q_i :

$$q_{i-}^{*(j)} < q_{i-}^{*(j)} \Leftrightarrow w_{i-}^{(j)}(q_i) > w_{i-}^{(j)}(q_i) \Leftrightarrow p_{i-}^{(j)}(q_i) > p_{i-}^{(j)}(q_i), \quad (5)$$

gdzie funkcje opóźnień $w_{i-}^{(j)}(q_i)$ i $p_{i-}^{(j)}(q_i)$ odpowiadają przepustowości warunkowej $q_{i-}^{*(j)}$, natomiast funkcje opóźnień $w_{i-}^{(j)}(q_i)$ i $p_{i-}^{(j)}(q_i)$ - $q_{i-}^{*(j)}$. Największa bezwarunkowa przepustowość q_i^* odpowiada sytuacji braku ruchu w pozostałych potokach skrzyżowania, (na rys. 1 oznaczoną trzema gwiazdkami: ***) i jak widać - daje najmniejsze wartości odpowiednich funkcji opóźnień.



Rys. 1. Funkcje opóźnień i -tego potoku na j -tym skrzyżowaniu: oczekiwane opóźnienie $w_i^{(j)}(q_i)$ oraz prawdopodobieństwo opóźnienia $p_i^{(j)}(q_i)$ w trzech różnych strukturach ruchu pozostałych potoków

Fig. 1. The delay functions of i -th flow of j -th intersection: the mean delay $w_i^{(j)}(q_i)$ and the delay probability $p_i^{(j)}(q_i)$ in three different traffic assignments for others flows

Jak widać, możliwości efektywnego wykorzystania skrzyżowania w danym potoku ruchu zależą od pozostałych potoków ruchu, a więc od organizacji ruchu, która jest doskonała w sposób ewolucyjny, poprzez doskonalenie poprzednich wariantów ruchu. Na tym polega istota tej problematyki - nie można w sposób analityczny zbudować optymalnego ruchu skrzyżowania zaczynając od pustej sieci transportowej. Jest to zawsze długi proces iteracyjny, poprawiający poprzednie projekty ruchu.

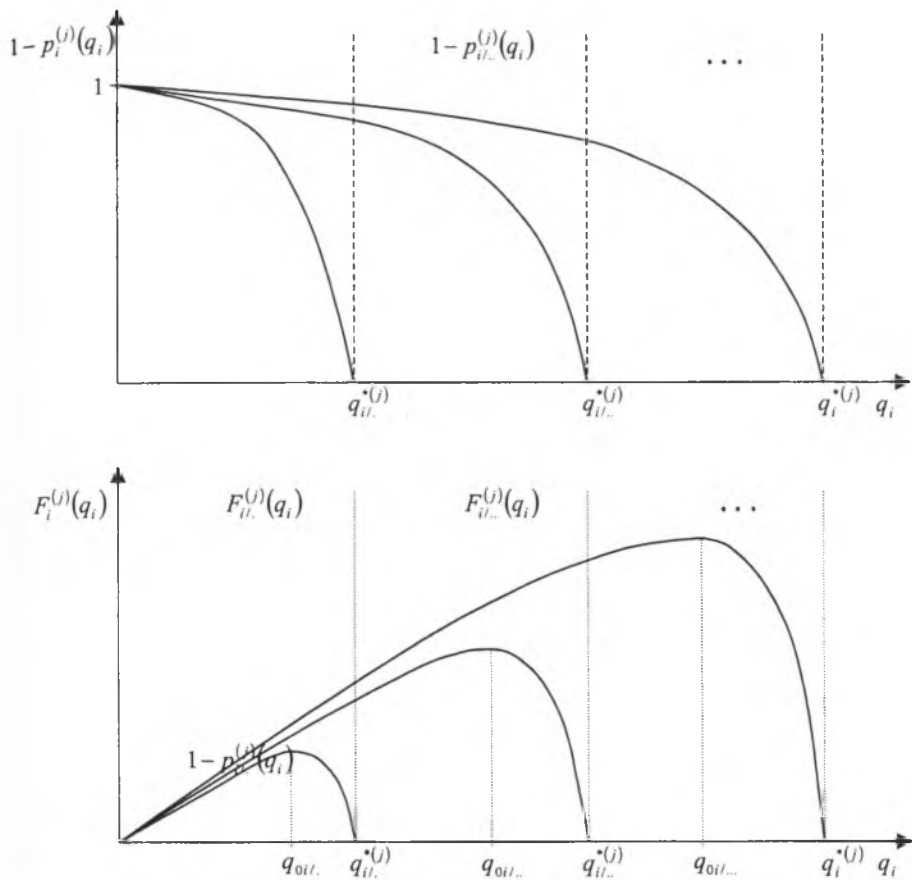
Z punktu widzenia ograniczeń przepustowości postulat zastąpienia charakterystyk czasu opóźnienia poprzez charakterystyki długości kolejek jest postulatem zastąpienia oczekiwanego opóźnienia $w_i^{(j)}$ prawdopodobieństwem opóźnienia $p_i^{(j)}$. Z formalnego punktu widzenia pierwsza funkcja jest nieograniczona, natomiast druga jest ograniczona przez 1. Z tego względu prawdopodobieństwo opóźnienia tak samo dokładnie opisuje ograniczenia przepustowości, jak oczekiwane opóźnienie. Z drugiej strony, charakterystyki przepustowości zbudowane na podstawie funkcji płynności ruchu ze swej natury są charakterystykami liczby opóźnień i równie dobrze wyrażają ograniczenia przepustowości, jak charakterystyki czasowe.

Z funkcjami opóźnień związane są **funkcje płynności ruchu**, to znaczy **prawdopodobieństwo płynności ruchu** - $1 - p_i^{(j)}(q_1, q_2, \dots, q_n)$ oraz **oczekiwana płynność ruchu** - $F_i^{(j)}(q_i) = (1 - p_i^{(j)}(q_1, q_2, \dots, q_n))q_i$. Są to **przeciwstawne pojęcia do funkcji opóźnień**, a więc w identycznych warunkach różnych przepustowości warunkowych jak na rys. 1, spełniają odwrotne relacje niż (5):

$$q_{i-}^{*(j)} < q_{i-}^{*(j)} \Leftrightarrow 1 - p_{i-}^{(j)}(q_i) < 1 - p_{i-}^{(j)}(q_i) \Leftrightarrow F_{i-}^{(j)}(q_i) < F_{i-}^{(j)}(q_i), \quad (6)$$

gdzie funkcje płynności z (6) są odpowiednimi do funkcji opóźnień z (5), spełniającymi odpowiednie relacje przepustowości warunkowych przedstawione na rys. 1. Dowód relacji (6) jest natychmiastowy, wynikający z definicji funkcji płynności ruchu, jako pojęć przeciwstawnych do funkcji opóźnień.

Rys. 2 ilustruje przebieg funkcji płynności ruchu zdefiniowane powyżej jako logiczne zaprzeczenie funkcji opóźnień na takim samym przypadku, jak na rys. 1. Rys. 2 wyjaśnia relacje (6), które są podstawą uporządkowania charakterystyk efektywności wykorzystania skrzyżowań transportowych według kryterium najistotniejszych wąskich gardeł sieci transportowej.



Rys. 2. Funkcje płynności ruchu i -tego potoku ruchu na j -tym skrzyżowaniu: prawdopodobieństwo płynności ruchu $1 - p_i^{(j)}(q_1, q_2, \dots, q_n)$ oraz oczekiwana płynność ruchu $F_i^{(j)}(q_i) = (1 - p_i^{(j)}(q_1, q_2, \dots, q_n))q_i$

Fig. 2. The freedom functions of i -th flow of j -th intersection: the freedom probability $1 - p_i^{(j)}(q_1, q_2, \dots, q_n)$ and the mean freedom $F_i^{(j)}(q_i) = (1 - p_i^{(j)}(q_1, q_2, \dots, q_n))q_i$ in three different traffic assignments for others flows

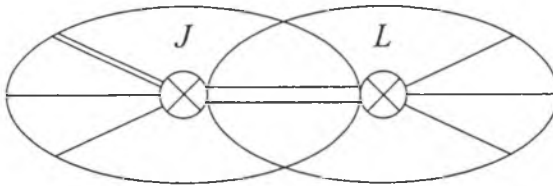
Optymalne natężenie jako pojęcie przeciwstawne prawdopodobieństwu opóźnienia (co wynika z (5) i (6) oraz z definicji optymalnego natężenia (3)) jest uporządkowana na poszczególnych skrzyżowaniach elementarnych, tak jak odpowiednie przepustowości warunkowe, to znaczy

$$q_{oi}^{(j)} < q_{oi}^{(k)} \Leftrightarrow q_{il}^{*(j)} < q_{il}^{*(k)}. \tag{7}$$

Jak widać, charakterystyki optymalnych natężeń są uporządkowane, tak jak charakterystyki

przepustowości warunkowych oraz odwrotnie niż charakterystyki opóźnień, a więc wąskie gardła mogą być określane na wiele równoważnych sposobów, w których **charakterystyki optymalnych natężeń mogą w procesach optymalizacji sieci transportowej pełnić rolę charakterystyk przepustowości**.

Obliczenia przepustowości skrzyżowań transportowych są złożonym zagadnieniem obliczeniowym, co wymaga budowy modeli symulacyjnych, w których szczegółowo symulowane są procesy kolizji ruchowych na poziomie elementarnym. Daje to możliwość oceny charakterystyk opóźnień i płynności ruchu, jak wyżej. Jest to złożony proces, w którym operujemy zagregowanymi charakterystykami przepustowości zdefiniowanymi poniżej. W tym ujęciu mamy dwa poziomy agregacji charakterystyk przepustowości: szczegółowy, jak w modelach symulacyjnych oraz zagregowany, dla opisu przepustowości zagregowanej. Są to sytuacje na ogół złożone informacyjnie, w których każdy odcinek między skrzyżowaniami jest fragmentem modelu symulacyjnego skrzyżowania krańcowego, jak na rys. 3. Taki sposób dekompozycji sieci transportowej na modele symulacyjne skrzyżowań zapewnia właściwe ujęcie powiązań międzywęzłowych, co zaleca Woch (1998a). Jest to uogólnienie doświadczeń autora nad nowymi metodami oceny przepustowości sieci kolejowej (p. Woch, 1974, 1075, 1977, 1983, 2001b).



Rys. 3. Podział sieci transportowej na nierozłączne symulacyjne modele podstawowe. Każdy odcinek między skrzyżowaniami jest rozważany w dwóch modelach podstawowych skrzyżowań końcowych

Fig. 3. Decomposition of transportation network for base models. Each section between intersections is analyzed in both base models of intersections

Gdy rozważamy dwa kolejne skrzyżowania j oraz l , które mają odcinek wspólny, łączący te skrzyżowania jak na rys. 3, to **przepustowość tego połączenia** $q_{il}^{(j,l)}$ jest określona jako mniejsza z przepustowości skrzyżowań krańcowych:

$$\begin{aligned} q_{il}^{(j,l)} &= q_{il}^{(j)}, \quad q_{il}^{(j)} \leq q_{il}^{(l)} \\ q_{il}^{(l)}, \quad q_{il}^{(j)} &> q_{il}^{(l)} \end{aligned} \quad (8)$$

Przepustowość połączenia (j, l) jest zagregowaną charakterystyką przepustowości sieci transportowych. Jak widać, taki sposób agregacji charakterystyk przepustowości prowadzi do wyznaczenia wąskiego gardła w sensie najmniejszych przepustowości (8), co jest równoważne z wąskim gardłem w sensie (2).

Podobnie możemy określić **optymalne natężenie połączenia (j, l)** $q_{oil}^{(j,l)}$ jako mniejsze z optymalnych natężeń skrzyżowań krańcowych:

$$\begin{aligned} q_{oil}^{(j,l)} &= q_{oil}^{(j)}, \quad q_{oil}^{(j)} \leq q_{oil}^{(l)} \\ q_{oil}^{(l)}, \quad q_{oil}^{(j)} &> q_{oil}^{(l)} \end{aligned} \quad (9)$$

Optymalne natężenie połączenia (j, l) jest również zagregowaną charakterystyką przepustowości transportowych i tu również taki sposób agregacji charakterystyk prowadzi do najmniejszego natężenia (9), które dzięki związkom (7) daje tę samą lokalizację wąskich gardeł, jak w (8), co jest równoważne z wąskim gardłem (3).

Zdefiniujmy odpowiednio do (8) i (9) **zagregowaną charakterystykę oczekiwanych opóźnień dla połączenia (j, l)** $w_{il}^{(j,l)}$ jako sumę elementarnych opóźnień w skrzyżowaniach krańcowych:

$$w_{il}^{(j,l)} = w_{il}^{(j)} + w_{il}^{(l)} \quad (10)$$

Jest sumaryczne opóźnienie dla ustalonego potoku ruchu i , będące ważnym wskaźnikiem strat płynności ruchu. Stosowanie takiego sposobu agregacji jak (10) prowadzi do wyznaczenia miejsc oraz potoków ruchu, dla których powstają największe sumaryczne opóźnienia. Są to te same wąskie gardła w sieci transportowej jak w (8) i (9). Te związki między wąskim gardłem w sensie (10), a (8) i (9) wynikają ze związków (5) i (6), co jest równoważne z wąskim gardłem (4).

Tak więc zostało wyjaśnione spostrzeżenie, że **wąskie gardła w sieci transportowej mogą być definiowane na trzy równoważne sposoby** oraz że **istotą optymalizacji sieci transportowych jest optymalizacja organizacji ruchu na skrzyżowaniach transportowych**, co wymaga, ze względu na złożoność zagadnienia, dwuetapowego procesu optymalizacji: na poziomie szczegółowym poszczególnych skrzyżowań elementarnych oraz dla całości sieci w sposób klasyczny. Na poziomie szczegółowym optymalizacja ruchu dla każdego skrzyżowania powinna być wykonywana różnymi metodami inżynierii ruchu. Trudno sobie wyobrazić ten proces bez udziału ludzkiego, tzn. w sposób całkowicie zautomatyzowany.

Literatura

1. Ashton W.D., 1966. The theory of road traffic flow. METHUEN & CO LTD.
2. Brilon W., Koenig R., Troutbeck R.J., 1999. Useful estimation procedures for critical gaps. Transportation Research Part A 33, 161-186.
3. Datka S., Suchorzewski W. and Tracz M., 1989. Inżynieria ruchu. WKŁ, Warszawa.
4. Drew D. R., 1968. Traffic flow theory and control. McGraw-Hill Book Company, New York.
5. Gross D. and Harris C. M., 1974. Fundamentals of queueing theory. John Wiley & Sons, New York.
6. Haight F. A., 1963. Mathematical theories of traffic flow. Academic Press, New York.
7. Heidemann D., 1996. A queueing theory approach to speed-flow-density relationships. In: Transportation and Traffic Theory. (ed Lesort), Pergamon, 103-118.
8. Heidemann D. and Wegmann H., 1997. Queueing unsignalized intersections. Transportation Research - B 31, 239-263.
9. Kim T. J. and Suh S., 1989. A Solution for Nonlinear Bilevel Programming Models of the Equilibrium Network Design Problem. In The Archives of Transport 1/1,2, (PAN Warsaw), 71-89.
10. Newell G.F., 1965. Approximation methods for queues with application to the fixed-cycle traffic light. SIAM Review 7(4), 223-240.
11. Stark R. and Nicholls R., 1979. Podstawy projektowania inżynierskiego. PWN, Warszawa.

12. Steenbrink P. A., 1978. Optymalizacja sieci transportowych. WKŁ, Warszawa.
13. Tanner J. C., 1962. A theoretical analysis of queues at an uncontrolled intersection. *Biometrika* 49, 163-170.
14. Webster F. W., 1958. Traffic signal settings. *Road Searched Technical Paper No. 39*. Her Majesty's Stationery Office, London.
15. Węgierski J., 1971. Metody probabilistyczne w projektowaniu transportu szynowego. WKŁ Warszawa.
16. Woch J., 1974. Model probabilistyczny rejonu sieci kolejowej na przykładzie KOK. Praca COBiRTK nr 3029/16 Katowice.
17. Woch J., 1975. Oceny układów torowych i organizacji ruchu pociągów przy użyciu symulacji komputerowej. Politechnika Śląska Gliwice, (praca doktorska).
18. Woch J., 1977. Ogólne ujęcie zagadnień przepustowości jako problemu wymiarowania układów kolejowych. (w): Informatyka w planowaniu technicznym przewozów kolejowych. WKŁ Warszawa, 263-348.
19. Woch J., 1983. Podstawy inżynierii ruchu kolejowego. WKŁ Warszawa.
20. Woch J. 1986. Synteza metodyczna prac problemu MK145. Problem resortowy MK 145: MODERNIZACJA I ROZWÓJ SIETKI KOLEJOWEJ PKP W LATACH 1986 1995. PODSTAWY METODYCZNE I INFORMACYJNE ORAZ PRÓBNE WDROŻENIE. Praca OBET nr 145-13.02.01. Warszawa - Katowice.
21. Woch J., 1989. Mikrokomputerowe systemy wspomaganie programowania rozwoju sieci kolejowej. Praca CNTK nr 3195/16. Katowice.
22. Woch J., 1993. Jak korzystać z SOUT. Dyrekcja Generalna PKP. Warszawa – Katowice.
23. Woch J., 1998a. Kształtowanie płynności ruchu w gęstych sieciach transportowych. Oddział PAN w Katowicach.
24. Woch J. 1998b. Compressed queueing processes for single traffic flows. *The Archives of Transport*, Polish Academy of Sciences 10, 3-4 Warsaw, 67-82.
25. Woch J., 1998c. Centrum logistyczne w Katowicach jako składnik strategii PKP. Materiały Konferencji Pojazdy Szynowe '98, Gliwice 287-293.
26. Woch J., 1998d. A effectiveness of the logistic centre in Katowice. Communications on the edge of the millenniums, 10th International Scientific Conference: University of Žilina. Žilina 1998, 177-181.
27. Woch J., 1999a. A queueing theory model for traffic flow. *Modelling and Management in Transportation*, Volume 1, Poznań – Kraków, 295-300.
28. Woch J., 1999b. Two queueing theory models for traffic flow. *The Archives of Transport*, 11, 1-2, 73-90.
29. Woch J., 1999c. Capacity of complex intersections. *The Archives of Transport*, 11, 3-4, 87-100.
30. Woch J., 2000a. Optimization algorithm of transportation networks. *The Archives of Transport*, Polish Academy of Sciences 12, 1, Warsaw, 73-93.
31. Woch J., 2000b. The maximum freedom of flow. *The Archives of Transport*, Polish Academy of Sciences 12, 3, Warsaw, 81-98
32. Woch J., 2001a. Statystyka procesów transportowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
33. Woch J., 2001b. Narzędzia analizy efektywności i optymalizacji sieci kolejowej (System Oceny Układów Torowych – SOUT - opis podstawowego oprogramowania). Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
34. Woch J., 2001c. Complex railway junctions capacities and railway network effectiveness. *The Archives of Transport*, Polish Academy of Sciences 13, 3, Warsaw, 87-108.
35. Woch J., 2003a. Two models for traffic flow. *Transportation Research*. Submitted for publication.

36. Woch J., 2003b. Nowe ujęcie przepustowości z porównaniem modeli. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport z. 47, Gliwice, 43-72.
37. Woch J., 2004. Delay functions and freedom functions. *The Archives of Transport*. Submitted for publication.

Recenzent: Dr hab.inż. Tomasz Ambroziak

Abstract

Proposed method is deep analyze the conditional capacities, that gives the good estimation of the network bottlenecks, and in the next steps, and the bottlenecks remove in order the most serious bottlenecks. This is proved that such method of network optimization is proper only.

Praca wykonana w ramach tematu BK 226/RT 5//2003 pt. Algorytmy planowania zamknięć drogowych w Katowicach i Gliwicach. Modele przepustowości dróg.