

Janusz WOCH

POPRAWIONE UJĘCIE TEORII PŁYNNOŚCI RUCHU

Streszczenie. W artykule prezentowane są metody optymalizacji sieci transportowej, która bazuje na fakcie zależności przepustowości skrzyżowań od organizacji ruchu. Proponowana metoda jest głęboką analizą warunkowych przepustowości, która daje dobrą ocenę wąskich gardeł, a w następnych krokach usunięcie ich. Wykazano, że taka metoda jest właściwą metodą optymalizacji. Tak więc, problem optymalizacji sieci transportowych jest w gruncie rzeczy problemem oceny warunkowych przepustowości, a więc jest tylko problemem teorii potoków ruchu.

NEW TRANSPORTATION OPTIMIZATION METHODES – PRACTICAL VIEW

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. TEORIA PŁYNNOŚCI RUCHU

Już trzydzieści lat funkcjonuje rewolucyjna idea przepustowości oparta na postulatcie maksymalnej płynności ruchu. Wychodząc z tego postulatu Woch w 1975 roku zaproponował zastąpienie tradycyjnego pojęcia przepustowości sieci kolejowej nowym probabilistycznym pojęciem przepustowości – optymalnym natężeniem ruchu q_0 , dla którego optymalna płynność ruchu jest największa. W 1998 roku Woch uogólnił to pojęcie na niekolejowe sieci transportowe. Gdy $p(q)$ oznacza prawdopodobieństwo zakłócenia w danym przekroju sieci transportowej, jest to rosnąca funkcja q . Możemy zdefiniować prawdopodobieństwo płynności ruchu $f(q)$ jest to malejąca funkcja q :

$$f(q) = 1 - p(q), \quad (1)$$

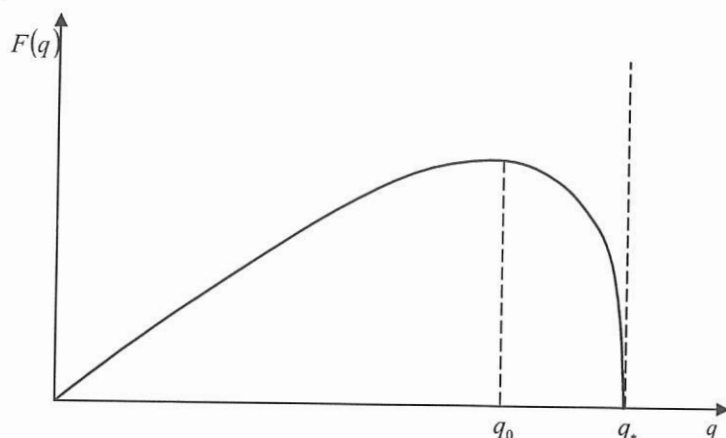
a następnie optymalną płynność ruchu $F(q)$ (rys. 1):

$$F(q) = (1 - p(q)) \cdot q = f(q) \cdot q \quad (2)$$

Na marginesie można zauważyć, że wykres optymalnej płynności ruchu kształtem przypomina tradycyjny deterministyczny model przepustowości drogi – tzw. model podstawowy, ale jest to tylko podobieństwo kształtu funkcji wklęsłych o zupełnie różnych definicjach matematycznych.

Na idei maksymalnej płynności ruchu wyrażonej powyżej oparte są informatyczne metody soutowskie. Jest to pakiet programów komputerowych, które zbudował Woch w latach 1969 – 1999 pracując w Instytucie Kolejnictwa Polskich Kolei Państwowych. Literaturowym efektem tej działalności są 3 książki Wocha (1977, 1983, 2001a, 2001b).

Ponieważ metody soutowskie bazują na symulacyjnych modelach węzłów torowych, zdefiniowane zostały statystyczne estymatory pojęć teoretycznych (1), (2) i (3), jak Woch (2005).



Rys. 1. Wykres optymalnej płynności ruchu $F(q)$ ilustrujący położenie optymalnego natężenia q_0 i przepustowości q_* .

Fig. 1. The optimal traffic freedom figure $F(q)$ showing the optimum rate q_0 and the capacity q_* .

Metody soutowskie są w swej naturze (3) poszukiwaniem optymalnego natężenia ruchu, a więc są to metody optymalizacyjne dla każdego węzła torowego. Na ogół każdy tor szlakowy należy do dwóch sąsiednich węzłów torowych, a więc optymalne natężenie ruchu toru szlakowego definiujemy jako mniejsze z dwóch optymalnych natężeń węzłowych q_{0s} :

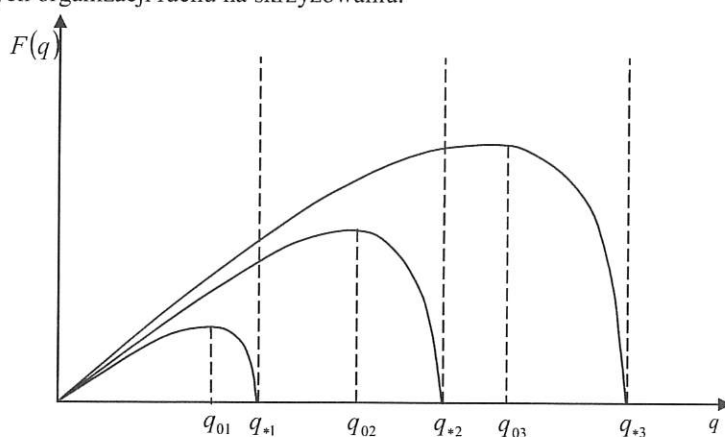
$$q_{0s} = \min(q_{01}, q_{02}), \quad (3)$$

gdzie: q_{01}, q_{02} oznaczają optymalne natężenia danego toru szlakowego obliczone w symulacji niezależnych obliczeń węzłów sąsiednich q_{01}, q_{02} .

Podstawowym doświadczeniem, które uzyskano z analiz obliczeń soutowskich, jest uświadomienie sobie faktu, że przepustowość elementarnych torów szlakowych jest zdeterminowana organizacją ruchu w węzłach torowych, a więc założenie, jakie robimy zwykle we wszystkich komputerowych metodach optymalizacji sieci transportowych, jest niedopuszczalnym uproszczeniem! Co w takim razie możemy zaproponować w takiej sytuacji – ewidencję wąskich gardeł w sieci transportowej, a następnie ich usuwanie; jest to metoda heurystyczna, bardzo krytykowana przez Steinbrinka (1978), ale jedynie słuszna, jeżeli do

wynajdywania wąskich gardeł stosujemy metody probabilistyczne, takie jak metody soutowskie, tak jak wykazał Woch (1998, 2005), jest to proces optymalizacyjny w pełnym tego słowa znaczeniu. A więc nasze doświadczenia ze stosowania metod probabilistycznych oceny przepustowości sieci transportowych wskazują, że w każdym problemie optymalizacyjnym powinniśmy doskonalić modele symulacyjne skrzyżowań, bo one dają możliwość głębokiej analizy przepustowości sieci transportowej, jak to ujęto na wstępie.

Wąskie gardła sieci transportowej rozumiemy tak samo jak zawsze, że są miejsca najmniejszych przepustowości albo miejsca największych strat płynności ruchu. Są to równoważne sposoby określania wąskich gardeł wynikające z faktu ujętego na rys. 2 przedstawiającego charakterystyki przepustowości i optymalne natężenia ruchu dla trzech różnych organizacji ruchu na skrzyżowaniu.



Rys. 2. Warunkowe przepustowości q_{*i} i odpowiednie warunkowe optymalne natężenia q_{0i} dla trzech różnych organizacji ruchu na skrzyżowaniu

Fig. 2. Conditional capacities and proper optimal rates for different traffic assignments in the intersection

Jeżeli rozważamy elementarny fragment sieci transportowej, gdzie tworzą się permanentne korki, to dlatego, że rzeczywisty ruch na tym odcinku jest większy niż przepustowość. Częste korki świadczą, że przekroczona została przepustowość drogi, która to, jak wiemy, zależy od organizacji ruchu na skrzyżowaniach. Tak więc w pierwszym etapie optymalizacji należy poprawić płynność ruchu na innych drogach!

W ruchu rzeczywistym, gdy pojawiają się miejsca częstych korków, to może spowodować zmianę organizacji ruchu poprzez wybór drogi o krótszym czasie podróży lub drogi tańszej. Nie ma lepszych narzędzi optymalizacji organizacji ruchu w węzłach niż badania symulacyjne pozwalające badać i prognozować płynność ruchu w węzłach. Tak więc, praktycznymi narzędziami optymalizacji systemów transportowych są modele symulacyjne skrzyżowań dające oceniać przepustowość warunkową skrzyżowań dla różnych wariantów organizacji ruchu! Musimy mieć świadomość, że sednem problemów optymalizacji sieci transportowych jest płynność ruchu i poprawianie płynności ruchu na skrzyżowaniach.

Gdy analizujemy teoretyczne aspekty optymalizacji sieci transportowych dochodzimy do wniosku, że do optymalizacji sieci transportowych konieczne są modele przepustowości

skrzyżowań dające dokładną ocenę zależności strat płynności ruchu na skrzyżowaniach, a to wymaga symulacji elementarnej kolizyjności ruchu na skrzyżowaniach, a więc budowy jak najmniejszego obszarowo modelu symulacyjnego skrzyżowania, bo w przeciwnym razie są to niedokładne oceny strat płynności ruchu zniekształcające również ocenę przepustowości elementarnych odcinków drogi.

Należy jeszcze raz skrytykować duży model symulacyjny sieci transportowych, w którym konieczne są uproszczenia rzeczywistych procesów zakłóceń, trudno jest czasem zorientować się w tych dużych modelach, gdzie leżą przyczyny zakłóceń płynności ruchu, gdzie jest przyczyna uproszczeń procesu w składnikach zagregowanych.

Gdy natomiast zastosujemy soutsowskie sposoby dekompozycji na modele symulacyjne skrzyżowań, to jest to jak najmniejszy model symulacyjny skrzyżowania, bez upraszczania procesu kolizji. Niewtajemniczonym wydaje się, że gdy najpierw uprościmy rzeczywisty proces kolizyjności w modelach przepustowości, to upraszcza to proces optymalizacji.

Należy sobie uświadomić, że symulacja elementarnych skrzyżowań daje możliwość dokładnej oceny warunkowych przepustowości w rozumieniu teorii płynności ruchu, tzn. w rozumieniu probabilistycznych ocen przepustowości przedstawionych na wstępie.

Ocena zależności na rys. 2 jest możliwa tylko na podstawie odpowiednich modeli symulacyjnych skrzyżowań. I zawsze są to warunkowe przepustowości skrzyżowań dla jednej ustalonej organizacji ruchu na tych skrzyżowaniach. Jeżeli następnie dokonujemy zmiany organizacji ruchu na tym skrzyżowaniu konieczna jest weryfikacja ocen przepustowości. I tu trzeba jasno stwierdzić, że dokładna ocena przepustowości skrzyżowania możliwa jest tylko za pomocą odpowiedniego modelu symulacyjnego oraz estymacji ocen przepustowości (1) – (3). Jeżeli uprościmy modele symulacyjne skrzyżowań, to tracimy szansę na głęboką analizę przepustowości sieci transportowej, a więc również tracimy możliwość jej optymalizacji w sposób iteracyjny poprzez podnoszenie charakterystyk płynności ruchu na tym skrzyżowaniu. Dopiero głęboka analiza przepustowości sieci transportowych, jak na (1) – (3), daje możliwość optymalizacji sieci transportowych. I zwykle jest to poprawianie w sposób iteracyjny organizacji ruchu na skrzyżowaniu bądź optymalizacji sieci transportowej.

Gdy uprościmy proces zakłóceń płynności ruchu tracimy możliwość optymalizacji sieci transportowej. Jedynym sposobem optymalizacji rzeczywistych sieci transportowych jest badanie przepustowości skrzyżowań (1) – (3) na bardzo szczegółowym poziomie.

Gdy agregujemy proces strat płynności ruchu tracimy możliwość zmian organizacji ruchu lub zmian w wyposażeniu dróg.

A więc jedynymi drogami optymalizacji sieci transportowej jest budowa szczegółowych modeli symulacyjnych skrzyżowań!

Wydaje się, że SOUT jako narzędzie optymalizacji sieci transportowych jest jedynie słusznym pomysłem, bo jest to narzędzie sprawdzone w optymalizacji sieci kolejowej w latach 70. 80. i 90.

Trzeba zbudować następny SOUT wg pomysłu Wocha (1998), co spotkało się z bardzo żywym zainteresowaniem transportowców.

Pierwszy wykres optymalnej płynności ruchu, jaki powstał z doświadczeń symulacji węzłów torowych, był parabola. Pierwsze wyniki badań symulacyjnych, które przeprowadził

Woch (1975) na pięciuset elementarnych węzłach torowych znajdujących się na terenie ówczesnej Śląskiej Dyrekcji Okręgowej Kolei Państwowych wykazały, że prawdopodobieństwo zakłócenia $p(q)$ jest funkcją liniową. Konsekwencją takich ustaleń liniowości prawdopodobieństwa zakłócenia $p(q)$ było ustalenie, że prawdopodobieństwo płynności ruchu $f(q)$ (1) jest liniową funkcją q . Stąd optymalna płynność (2) jest funkcją kwadratową. Dlatego położenie optymalnego natężenia było co najwyżej w połowie całego przedziału zmienności $(0, q_*)$, to znaczy:

$$q_0 = \frac{1}{3}q_*, \text{ aż do } q_0 = \frac{1}{2}q_*. \quad (4)$$

gdzie q_* jest przepustowością w tradycyjnym rozumieniu zależności.

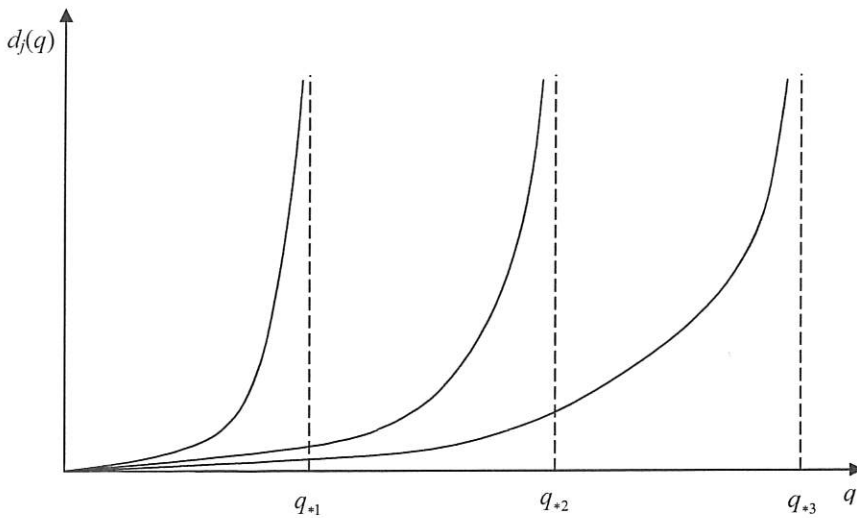
Zależność (4) jest zależnością statystyczną, jak i ustaloną na podstawie częstego wykorzystywania modeli (2) podczas obliczeń soutowskich.

W miarę doskonalenia narzędzi informatycznych metod soutowskich pozwalających na uzyskiwanie coraz to skuteczniejszych programów obliczeń soutowskich okazywało się, że stwierdzona przez Wocha (1975) liniowość prawdopodobieństwa czasu czekania zgadza się tylko w węższym przedziale $(0, q_0)$. Natomiast w przedziale przeciążeń (q_0, q_*) występuje bardzo dziwne zachowanie modeli symulacyjnych.

Wykres przedstawiony na rys. 1 pojawił się w ostatnim okresie po zastosowaniu modelu optymalnej płynności do oceny przepustowości drogi zamiast modelu podstawowego. Jak widać na rys. 1, optymalne natężenie jest bliskie przepustowości ($q_0 = 0,8q_*$). Można to wyjaśnić, że doświadczenia symulacyjne są bardzo dokładne dla małego ruchu, nie przekraczającego q_0 w przedziale $(0, q_0)$. Gdy ruch $q > q_0$, to wyniki symulacji komputerowej są niedokładne, obarczone dużym błędem oceny i im większe przeciążenie chwilowe, tym większe wahania charakterystyk symulacyjnych. Tak więc, stwierdzona przez Wocha (1975) liniowość prawdopodobieństwa była tylko częściowym rozpoznaniem, które ewoluowało z biegiem lat aż do kształtu na rys. 1 i 2.

We wszystkich węzłach sieci transportowej nakładają się potoki ruchu tworząc uregulowany proces kolizji ruchowych, tak aby ruch odbywał się bezpiecznie i płynnie. Powstają wtedy kolizje ruchowe będące w istocie rzeczy stratami czasu podróży, które nazywamy zakłóceniami. Wszystkim uczestnikom ruchu transportowego, jak i też właścicielom pojazdów oraz fragmentów infrastruktury zależy na minimalizacji zakłóceń, których wielkość jest zależna od organizacji ruchu na skrzyżowaniach. Musimy sobie uświadomić, że proces ten jest niestety czymś jest nieuchronne.

Dla węzła j – tego mamy charakterystyczne wykresy średnich czasów zakłóceń $d_j(q)$ takie jak na rys. 3. Trzeba sobie uświadomić, że średnie czasy zakłóceń zależą od przepustowości, a te od organizacji ruchu w j – tym węźle.



Rys. 3. Zależność średniego czasu zakłóceń $d_j(q)$ na j -tym skrzyżowaniu dla trzech organizacji ruchu na tym skrzyżowaniu i przepustowości q_{*j}

Fig. 3. The average disturbances $d_j(q)$ in j -th intersection for three traffic assignments and capacities q_{*j}

2. NOWE KRYTERIUM OPTIMALIZACJI SIECI TRANSPORTOWYCH – SUMARYCZNA PŁYNNOŚĆ ZAMIAST WAŻONEJ SUMARYCZNEJ PŁYNNOŚCI PROPONOWANEJ PRZEZ WOCHA (1998)

Optymalna płynność ruchu F_j j -tego skrzyżowania jest syntetycznym kryterium efektywności ruchu na drogach transportowych wyrażającym najlepsze w sensie ekonomicznym rozwiązanie organizacji ruchu na tym skrzyżowaniu. Musimy sobie tu uświadomić, że kształtowanie najefektywniejszej organizacji ruchu na j -tym skrzyżowaniu jest organizacją ruchu, dla której maksymalizuje się optymalną płynność ruchu F_j . Sedno problemów optymalizacji sieci transportowych polega na podnoszeniu płynności ruchu na skrzyżowaniach, gdzie czas podróży na j -tym skrzyżowaniu jest nieliniową funkcją stopnia wykorzystania przepustowości zależnej od organizacji ruchu na skrzyżowaniu, jak na rys. 4.

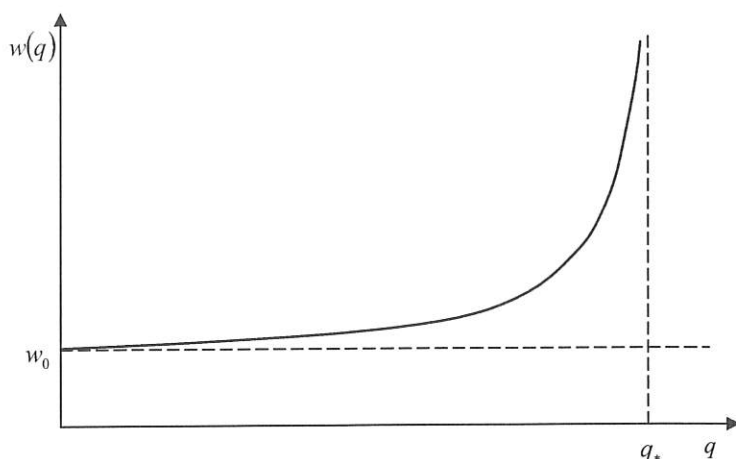
Gdy zoptymalizujemy organizację ruchu j -tego skrzyżowania, otrzymujemy maksymalizację optymalnej płynności tego skrzyżowania F_j . Naturalnym kryterium optymalizacyjnym sieci transportowych jest sumaryczna płynność ruchu F :

$$F = \sum_{j=1}^m F_j \quad (5)$$

gdzie m – liczba skrzyżowań.

Z drugiej strony nie można sobie wyobrazić ruchu na skrzyżowaniu o największej płynności, które nie byłoby ruchem najefektywniejszym ekonomicznie. Kryterium (5) jest dobrym kryterium optymalizacji sieci transportowych.

Można sformułować inne dobre kryterium optymalizacji sieci transportowych, mianowicie sumaryczny czas podróży w :



Rys. 4. Czas podróży $w(q)$ zależny od stopnia wykorzystania przepustowości, zależnej od organizacji ruchu na skrzyżowaniu, minimalny czas podróży w_0 , przepustowości q_* .

Fig. 4. The travel time $w(q)$ depended from the level of capacity using depended from traffic assignments in the intersection, the minimum travel time w_0 , the capacity q_* .

$$w = \sum_{i=1}^n w_i \quad (6)$$

gdzie: n – liczba wszystkich podróży,

w_i – czas podróży i -tego podróżnego, który to czas chcemy minimalizować!

Każdy podróżny chce zminimalizować swój czas podróży, aby zminimalizować swoje koszty podróżowania. Ruch optymalny w sieciach transportowych, to ruch w równowadze statystycznej o minimalnych łącznych kosztach podróży. Zakładanie równowagi statystycznej jest tu konieczne, aby zapewnić niezbędne rezerwy przepustowości drogi w celu zapewnienia płynności ruchu, ponieważ w interesie każdego podróżnego leży podnoszenie płynności ruchu, aby zminimalizować swój czas podróży. Można więc stwierdzić, że powyższe dwa zagadnienia optymalizacyjne (5) i (6) są sobie równoważne.

Ważona sumaryczna płynność zaproponowana przez Wocha (1998) jest niewłaściwym kryterium optymalizacji sieci transportowych. Można powiedzieć, że zróżnicowanie kategorii ruchu w sensie ekonomicznym powinno być uwzględniane odpowiednimi wagami priorytetów, jakie obowiązują na skrzyżowaniach drogowych, co powinno być uwzględniane w modelach symulacyjnych skrzyżowań.

3. TEORIA PŁYNNOŚCI RUCHU JAKO PRAKTYCZNE NARZĘDZIE OPTIMALIZACJI SIECI TRANSPORTOWYCH

Maksymalizacja sumarycznej płynności ruchu F (5) jest równoważna minimalizacji sumarycznego czasu podróży w (6). Każdy podróżny we własnym zakresie minimalizuje swój czas podróży w_i , ponieważ zapewnia to minimalizację kosztu podróżowania! Drogi, po

których porusza się i - ty podróżny, są drogami optymalnymi, tj. drogami o minimalnych kosztach podróżowania. Nietrudno wykazać, że względu na dualność zagadnienia, że maksymalizacja oczekiwanej płynności oraz minimalizacja sumarycznego czasu podróży są to równoważne ujęcia optymalizacji sieci transportowych (5) i (6).

Gdy zaczynamy minimalizować czas podróży i - tego podróżnego w_i , to okazuje się, że oszczędności czasu podróży w_i mogą odbywać się jedynie w miejscach rezerw czasu podróży, które mogą być jedynie rezerwami płynności ruchu na skrzyżowaniu j - tym. Jak widać, że względu na dualność tych zagadnień, optymalizacja sieci transportowych może odbywać się w miejscach rezerw płynności ruchu na j - tym skrzyżowaniu. Mamy świadomość, że podnoszenie płynności ruchu na j - tym skrzyżowaniu odbywa się poprzez zmiany organizacji ruchu na tym skrzyżowaniu, wpływające na przepustowość tego skrzyżowania, jak na rys. 2.

Jedynym praktycznym sposobem minimalizacji sumarycznych czasów podróży w (6) jest podnoszenie płynności ruchu na skrzyżowaniach (5). Teoria płynności ruchu jako narzędzie optymalizacji sieci transportowych jest jedynym praktycznym sposobem optymalizacji sieci transportowych. Dlatego nie szukamy innych sposobów minimalizacji czasu podróży i - tego podróżnego w_i , tylko poprzez podnoszenie płynności ruchu na kolejnych skrzyżowaniach. Ponieważ, jak wiadomo, z teorii potoków ruchu, czas podróży jest nieliniową funkcją natężenia, zależną od organizacji ruchu na j - tym skrzyżowaniu i jak widać na rys. 2, są to bardzo złożone związki, zależne od ustalonej optymalnej organizacji ruchu na j - tym skrzyżowaniu. Te związki można jedynie badać za pomocą narzędzi symulacyjnych skrzyżowań. Upraszczanie rzeczywistości w tym względzie jest niedopuszczalne! Nie można sobie wyobrazić dobrej optymalizacji sieci transportowej bez oceny warunkowych płynności ruchu jak na rys. 2.

Do poprawiania organizacji ruchu na skrzyżowaniu niezbędne są odpowiednie modele symulacyjne. Błędna ocena przepustowości skrzyżowania uniemożliwia optymalizację sieci transportowych.

Biorąc pod uwagę powyższe argumenty, zauważamy, że istnieją dwa równoważne zagadnienia optymalizacji sieci transportowych, a więc można stwierdzić, że poszukiwanie struktury optymalnej sieci transportowej według kryterium (5) jest równoważne poszukiwaniu optymalnej struktury według kryterium (6), a więc:

$$\max_{C, R} F = \sum_{j=1}^m F_j \equiv \min_{C, R} w = \sum_{i=1}^n w_i \quad (7)$$

gdzie C oznacza strukturę techniczną (macierz przepustowości), natomiast R oznacza strukturę ruchową sieci transportowej (wszystkie organizacje ruchu).

Tylko stosowanie teorii płynności ruchu, a więc maksymalizacja oczekiwanej płynności ruchu, daje praktyczną możliwość właściwej optymalizacji sieci transportowej. Można też stwierdzić, że złożoność zależności czasu podróży od stopnia wykorzystania przepustowości przedstawiona na rys. 4 sprawiła, że praktycznym sposobem optymalizacji sieci transportowych jest budowa modeli Monte Carlo skrzyżowań takich, jak Woch (1975, 1998, 2005).

Konsekwencją takiej sytuacji jest heurystyczny sposób optymalizacji organizacji ruchu na skrzyżowaniach.

Dualizm zagadnień optymalizacji sieci transportowych jest czymś, co pozwala zamiast minimalizacji czasu podróży w_i skupić się na maksymalizacji oczekiwanej płynności ruchu F_j na j -tym skrzyżowaniu. Są to równoważne dualne zagadnienia optymalizacji sieci transportowych. Dualizm tych zagadnień pozwala minimalizację sumarycznego czasu w zastąpić dualnym zagadnieniem maksymalnej sumarycznej płynności ruchu F . Autorowi jasno udało się dopiero dzisiaj to wykazać poprzez ujęcie (5), (6) i (7).

Doświadczenia autora w wykorzystaniu metod soutowskich jako metod optymalizacyjnych wykazały, że optymalizacja sieci transportowej, jak to robił Steenbrink (1978) jest niewłaściwym podejściem do sprawy, ze względu na bardzo złożone zależności czasu podróży od organizacji ruchu na skrzyżowaniach, które w praktyce można tylko zbadać i optymalizować za pomocą modeli symulacyjnych na sposób, jaki zastosowano w metodach soutowskich. Z całym arsenałem probabilistycznych metod oceny przepustowości skrzyżowań, jak to przedstawiono wyżej. Tak więc, zagadnienia optymalizacji sieci transportowych są w swej naturze problemami oceny przepustowości skrzyżowań.

Węzły transportowe są przedmiotem zainteresowania teoretyków potoków ruchu (patrz Daganzo 1997, Drew 1968, Haight 1963, Tanner 1962, Webster 1958, jak i projektantów dróg i ruchu transportowego (patrz Datka, Suchorzewski i Tracz 1989, Węgiński 1971). Modelowanie matematyczne węzłów transportowych wymaga narzędzi teorii kolejek (patrz Gross i Harris 1974, Hedemann 1996, Woch 1977, 1983, 1990, 1998a, 1999a, 1999b, 2001, 2005).

Literatura

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

11. Newell G.F.: Approximation methods for queues with application to the fixed-cycle traffic light. *SIAM Review* 7(4), 1965, s. 223-240.
12. Stark R., Nicholls R.: Podstawy projektowania inżynierskiego. PWN, Warszawa 1979.
13. Steenbrink P. A.: Optymalizacja sieci transportowych. WKŁ, Warszawa 1978.
14. Tanner J. C., 1962. A theoretical analysis of queues at an uncontrolled intersection. *Biometrika* 49, 163-170.
15. Webster F. W.: Traffic signal settings. Road Searched Technical Paper No. 39. Her Majesty's Stationery Office, London 1958.
16. Węgiński J.: Metody probabilistyczne w projektowaniu transportu szynowego. WKŁ Warszawa 1971.
17. Woch J.: Model probabilistyczny rejonu sieci kolejowej na przykładzie KOK. Praca COBiRTK nr 3029/16 Katowice 1974.
18. Woch J.: Oceny układów torowych i organizacji ruchu pociągów przy użyciu symulacji komputerowej. Politechnika Śląska Gliwice 1975, (praca doktorska).
19. Woch J.: Ogólne ujęcie zagadnień przepustowości jako problemu wymiarowania układów kolejowych. (w): Informatyka w planowaniu technicznym przewozów kolejowych. WKŁ Warszawa 1977, s. 263-348.
20. Woch J.: Podstawy inżynierii ruchu kolejowego. WKŁ Warszawa 1983.
21. Woch J.: Synteza metodyczna prac problemu MK145. Problem resortowy MK 145: Modernizacja i rozwój sieci kolejowej PKP w latach 1986 1995 Podstawy metodyczne i informacyjne oraz próbne wdrożenie. Praca OBET nr 145-13.02.01. Warszawa – Katowice 1986.
22. Woch J.: Mikrokomputerowe systemy wspomagania programowania rozwoju sieci kolejowej. Praca CNTK nr 3195/16. Katowice 1989.
23. Woch J.: Jak korzystać z SOUT. Dyrekcja Generalna PKP. Warszawa – Katowice 1993.
24. Woch J.: Kształtowanie płynności ruchu w gęstych sieciach transportowych. Oddział PAN w Katowicach, Katowice 1998.
25. Woch J.: Compressed queueing processes for single traffic flows. *The Archives of Transport, Polish Academy of Sciences* 10, 3-4 Warszawa 1998, s. 67-82.
26. Woch J.: Centrum logistyczne w Katowicach jako składnik strategii PKP. Materiały Konferencji Pojazdy Szynowe '98, Gliwice 1998, s. 287-293.
27. Woch J.: A effectiveness of the logistic centre in Katowice. *Communications on the edge of the millenniums*, 10th International Scientific Conference: University of Žilina. Žilina 1998, s. 177-181.
28. Woch J.: A queueing theory model for traffic flow. *Modelling and Management in Transportation*, Volume 1, Poznań – Kraków 1999, s. 295-300.
29. Woch J.: Two queueing theory models for traffic flow. *The Archives of Transport* 1999, 11, 1-2, s. 73-90.
30. Woch J.: Capacity of complex intersections. *The Archives of Transport* 1999, 11, 3-4, s. 87-100.
31. Woch J.: Optimization algorithm of transportation networks. *The Archives of Transport, Polish Academy of Sciences* 12, 1, Warsaw 2000, s. 73-93.

32. Woch J.: The maximum freedom of flow. The Archives of Transport, Polish Academy of Sciences 12, 3, Warsaw 2000, s. 81-98
33. Woch J.: Statystyka procesów transportowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
34. Woch J.: Narzędzia analizy efektywności i optymalizacji sieci kolejowej (System Oceny Układów Torowych - SOUT- opis podstawowego oprogramowania). Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
35. Woch J.: Complex railway functions capacities and railway network effectiveness. The Archives of Transport, Polish Academy of Sciences 13, 3, Warsaw 2001, s. 87-108.
36. Woch J.: Two models for traffic flow. Transportation Research 2005. Submitted for publication.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Paweł Śniady