ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: TRANSPORT z. 57 Nr kol. 1675

Janusz WOCH[1]

AKTUALNA WERSJA 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.

ACTUAL VERSION OF TRAFFIC FREEDOM THEORY

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 postulacie maksymalnej płynności ruchu. Wychodząc z tego postulatu, Woch (1975) w swej pracy doktorskiej zaproponował zastąpienie tradycyjnego pojęcia przepustowości sieci kolejowej nowym probabilistycznym pojęciem przepustowości – optymalnym natężeniem ruchu q_0 dla którego oczekiwana płynność ruchu jest największa. W książce (1998a, 2001c) Woch uogólnił to pojęcie na niekolejowe sieci transportowe. Gdy $p(q)$ oznacza prawdopodobieństwo opóźnienia w danym przekroju sieci transportowej, jest to rosnąca funkcja q. Możemy zdefiniować prawdopodobieństwo płynności ruchu $f(q)$:

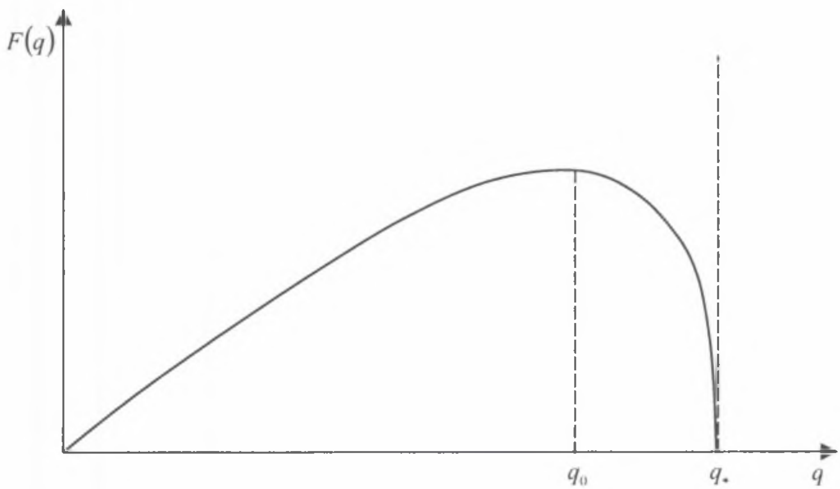
$$f(q) = 1 - p(q), \tag{1}$$

a następnie oczekiwaną płynność ruchu $F(q)$:

$$F(q) = (1 - p(q)) \cdot q. \tag{2}$$

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

Jak widać, oczekiwana płynność jest iloczynem prawdopodobieństwa płynności wyrażonego (1) oraz natężenia q. Ten probabilistyczny model przepustowości nazywany jest teorią płynności ruchu. Na rys. 1 przedstawiono wykres oczekiwanej płynności ruchu ilustrujący pojęcie optymalnego natężenia q_0 oraz przepustowości tradycyjnej q_*



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

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

Na marginesie można zauważyć, że wykres oczekiwanej 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 do dziś funkcjonujące 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, 2001b).

Ponieważ metody soutowskie bazują na symulacyjnych modelach węzłów torowych, zdefiniowane zostały statystyczne estymatory pojęć teoretycznych (1), (2) i (3), jak Woch (2001b).

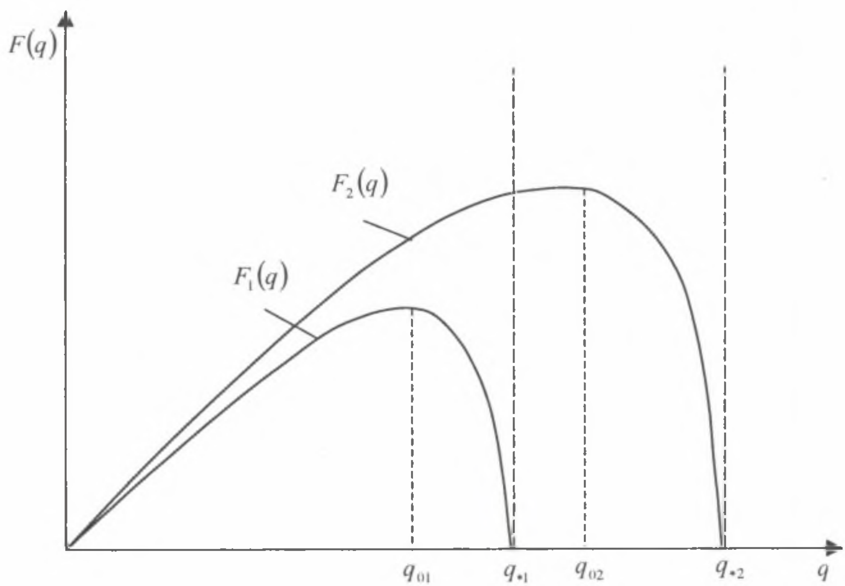
Metody soutowskie są w swej naturze (3) poszukiwaniem optymalnego natężenia ruchu, a więc są to metody optymalizacyjne dla każdego węzła torowego. Na ogół każdy tor szlakowy należy do dwóch sąsiednich węzłów torowych, a więc optymalne natężenie ruchu toru szlakowego definiujemy jako mniejsze z dwóch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

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

gdzie: q_{01}, q_{02} oznaczają optymalne natężenia danego toru szlakowego obliczone w symulacji niezależnych obliczeń skrzyżowań sąsiednich q_{01}, q_{02}. Wszystkie charakterystyki przepustowości są agregowane w oczywisty sposób (3).

Podstawowym doświadczeniem, jakie 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, że przepustowość nie zależy od organizacji ruchu, 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, 2004), 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 metody symulacyjne skrzyżowań, bo one dają możliwość głębokiej analizy przepustowości sieci transportowej, jak to ujęto na wstępie.

Dla ustalonego skrzyżowania j możemy sobie wyobrazić zmiany organizacji ruchu, które powodują zmiany ocen płynności oraz przepustowości, jak na rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyki oczekiwanych płynności ruchu $F_1(q)$, $F_2(q)$, jak również przepustowości q_{*i} oraz optymalnych natężeń q_{0i}, dla dwóch organizacji ruchu na j-tym skrzyżowaniu

Fig. 2. Expected traffic freedom characteristics $F_1(q)$, $F_2(q)$ and conditional capacities q_{*i} and proper optimal rates q_{0i}, for two traffic assignments in the intersection j

Tak więc, dla j-tego skrzyżowania można określić warunkowe charakterystyki przepustowości oraz płynności ruchu, które w dużym stopniu zależą od organizacji ruchu j-tego skrzyżowania i dają oceny płynności ruchu $F_1(q)$, dla pierwszego projektu organizacji ruchu, a oceny płynności ruchu $F_2(q)$, dla drugiego projektu organizacji ruchu, jak również oceny przepustowości q_{*i} oraz optymalnych natężeń q_{0i}, dla dwóch organizacji ruchu na j-tym skrzyżowaniu, jak na rys. 2.

Należy zauważyć, że liczba zmian organizacji ruchu j-tego skrzyżowania nie może być zbyt wielką liczbą, ze względu na ograniczone możliwości techniczne projektowania oraz sprawdzanie różnych wariantów organizacji ruchu j-tego skrzyżowania sprawdzanych na modelach symulacyjnych tych skrzyżowań! Z drugiej strony, mała liczba projektów organizacji ruchu na skrzyżowaniach wynika z ewolucyjnego charakteru zmian organizacji ruchu, w którym na co dzień uczestniczymy, bez uświadamiania sobie na ogół tego procesu! Naszym kryterium optymalizacyjnym jest minimalizacja kosztu podróży, którą chcemy osiągnąć za pomocą minimalizacji czasu podróży, a więc maksymalizacją płynności ruchu każdego podróżnego! I wszyscy podróżni robią to dobrze, wybierając drogi o najmniejszym czasie podróży!

Można zdefiniować nowe pojęcie efektywności (optymalności) projektów organizacji ruchu na j-tym skrzyżowaniu. Z dwóch projektów organizacji ruchu ten jest lepszy, który daje większą oczekiwaną płynność ruchu. Tak więc, dla danego natężenia q, jeżeli oczekiwana płynność ruchu $F_2(q)$ jest większa niż oczekiwana płynność $F_1(q)$:

$$F_1(q) < F_2(q) \quad , \tag{4}$$

to projekt organizacji ruchu odpowiadający oczekiwanej płynności $F_2(q)$ jest bardziej efektywny, niż projekt organizacji ruchu, której odpowiada oczekiwana płynność ruchu $F_1(q)$.

Jak widać na rys. 2, dla bardziej efektywnej organizacji ruchu F_2 można, zamiast maksymalizacji oczekiwanej płynności ruchu, postulować równoważne kryteria optymalizacji projektów organizacji ruchu. Organizacja jest tym lepsza, im większa jest przepustowość:

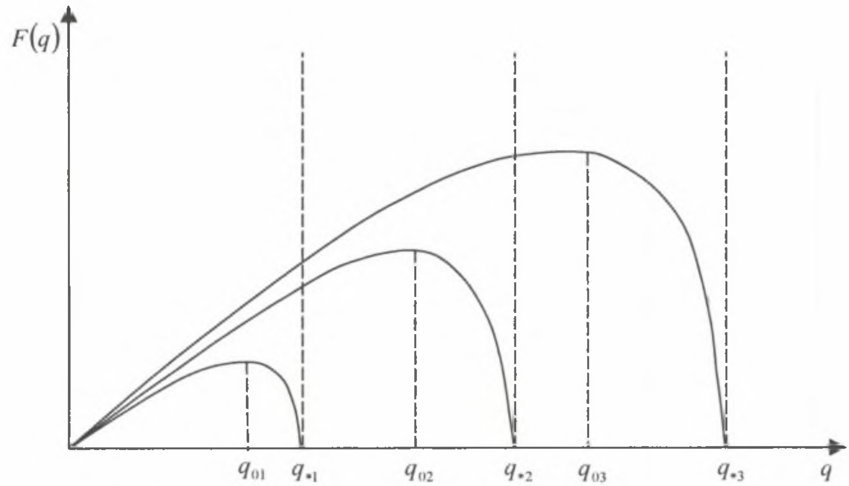
$$q_{*1} < q_{*2} \quad . \tag{5}$$

Nie jest to jedyne kryterium optymalności organizacji ruchu, można postulować równoważne kryteria optymalności organizacji ruchu. Organizacja ruchu jest tym lepsza, im większa jest wartość optymalnego natężenia ruchu:

$$q_{01} < q_{02} \quad . \tag{6}$$

Biorąc pod uwagę relacje między charakterystykami płynności a ocenami przepustowości i optymalnych natężeń przedstawionymi na rys. 2, dowody powyższych równoważności kryteriów optymalności projektów organizacji ruchu (4), (5) i (6) są natychmiastowe.

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. 3. Warunkowe przepustowości q_{*i} i odpowiednie warunkowe optymalne natężenia q_{0i} dla różnych organizacji ruchu na skrzyżowaniu, patrz Woch (1998a), (1999a), (1999b), (1999c), (2000a), (2000b).



Rys. 3. Warunkowe przepustowości q_{*i} i odpowiednie warunkowe optymalne natężenia q_{0i} dla różnych organizacji ruchu na skrzyżowaniu

Fig. 3. 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 o tym, 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 na skrzyżowaniach niż badania symulacyjne pozwalające badać i prognozować płynność ruchu na skrzyżowaniach. 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 sedno problemów optymalizacji sieci transportowych jest płynność ruchu i poprawianie płynności ruchu na skrzyżowaniach, w sposób iteracyjny.

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, jako narzędzie badań przepustowości, w którym konieczne są uproszczenia rzeczywistych procesów opóźnień, trudno jest czasem zorientować się w tych dużych modelach, gdzie leżą przyczyny zakłóceń płynności ruchu, a co jest przyczyną uproszczeń procesu kolizji ruchowych w składnikach zagregowanych.

Gdy natomiast zastosujemy soutowskie 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) – (6). 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) – (6), 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) – (6) 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. ubiegłego wieku.

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

Pierwszy wykres oczekiwanej płynności ruchu, jaki powstał z doświadczeń symulacji skrzyżowań torowych, był parabolą. Pierwsze wyniki badań symulacyjnych, jakie przeprowadził Woch (1975) na pięciuset elementarnych skrzyżowaniach torowych znajdujących się na terenie ówczesnej Śląskiej Dyrekcji Okręgowej Kolei Państwowych wykazały, że prawdopodobieństwo opóźnienia $p(q)$ jest funkcją liniową. Konsekwencją takich ustaleń liniowości prawdopodobieństwa opóźnienia $p(q)$ było ustalenie, że prawdopodobieństwo płynności ruchu $f(q)$ (1) jest liniową funkcją q. Stąd oczekiwana płynność (2) jest funkcją kwadratową. Dlatego położenie optymalnego natężenia było w połowie całego przedziału zmienności $(0,\ q_*)$, to znaczy:

$$q_0 = \frac{1}{2} q_* \tag{7}$$

gdzie q_* jest przepustowością w tradycyjnym rozumieniu.

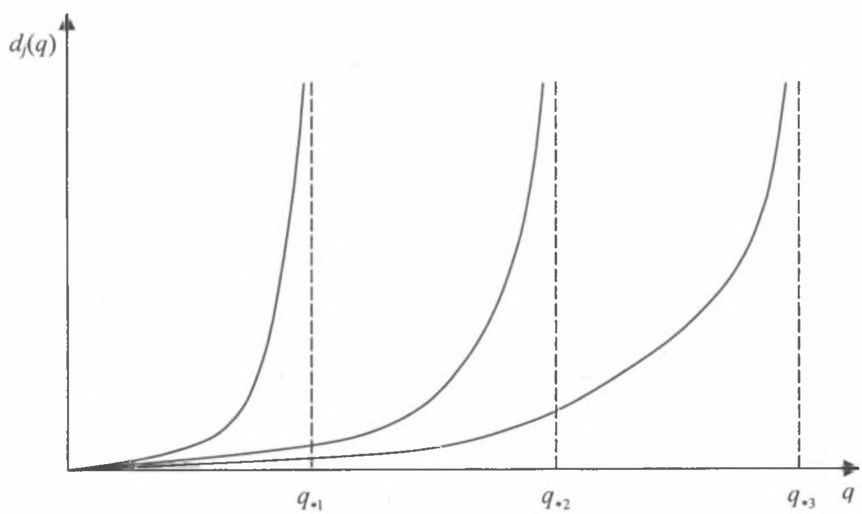
Zależność (7) jest zależnością statystyczną, to znaczy ustaloną na podstawie częstego wykorzystywania modeli (2) podczas obliczeń soutowskich.

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 opóźnienia zgadza się tylko w węższym przedziale $(0,\ q_0)$. Natomiast w przedziale przeciążeń $(q_0,\ q_*)$ występuje bardzo dziwne zachowanie modeli symulacyjnych.

Wykres na rys. 1 pojawił się w ostatnim okresie po zastosowaniu modelu oczekiwanej 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 ruchowe, tym większe wahania charakterystyk symulacyjnych. Tak więc stwierdzona przez Wocha (1975) liniowość prawdopodobieństwa była tylko cząstkowym rozpoznaniem, które ewoluowało z biegiem lat aż do kształtu na rys. 1.

We wszystkich skrzyżowaniach 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 opóźnieniami. Wszystkim uczestnikom ruchu transportowego, jak i też właścicielom pojazdów oraz fragmentów infrastruktury, zależy na minimalizacji opóźnień, których wielkość jest zależna od organizacji ruchu na skrzyżowaniach. Musimy sobie uświadomić, że proces ten jest, niestety, czymś, co jest nieuchronne.

Dla skrzyżowania j – tego mamy charakterystyczne wykresy średnich opóźnień $d_j(q)$, takie jak na rys. 4, patrz Woch (2001a). Trzeba sobie uświadomić, że średnie opóźnienia zależą od przepustowości, a te od organizacji ruchu w j – tym skrzyżowaniu.

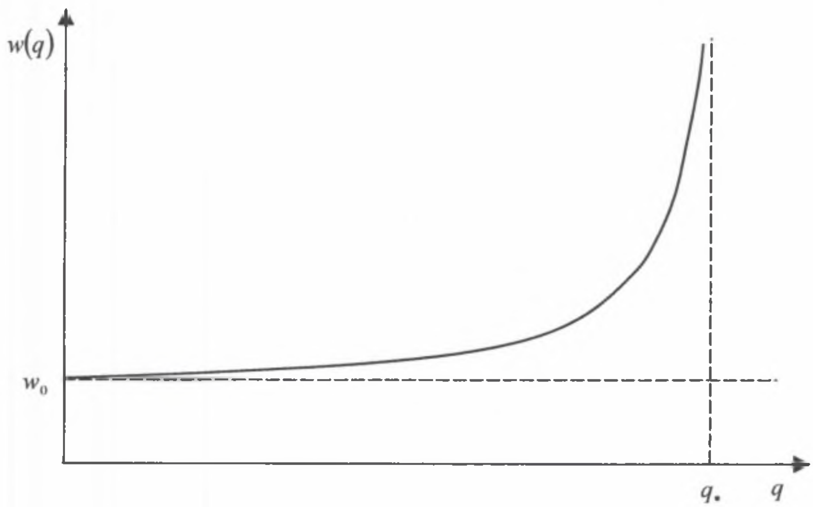


Rys. 4. Zależność średniego opóźnienia $d_j(q)$ na j – tym skrzyżowaniu dla trzech organizacji ruchu na tym skrzyżowaniu i przepustowości q_{*i}

Fig. 4. The average delay dj(q) in j – th intersection for three traffic assignments and given capacities q_{*i}

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

Oczekiwana 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 oczekiwaną 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, zależną od organizacji ruchu na skrzyżowaniu, jak na rys. 5, p.np. Woch (2001a).



Rys. 5. Czas podróży $w(q)$ zależny od stopnia wykorzystania przepustowości, zależnej od organizacji ruchu na skrzyżowaniu, minimalny czas podróży w_0, przepustowości $q_\bullet$

Fig. 5. 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 $q_\bullet$

Optymalizacja organizacji ruchu j-tego skrzyżowania daje maksymalizację oczekiwanej płynności tego skrzyżowania F_j. Naturalnym kryterium optymalizacyjnym sieci transportowych jest sumaryczna płynność ruchu F:

$$F = \sum_{j=1}^{m} F_j \tag{8}$$

gdzie m – liczba skrzyżowań.

Z drugiej strony nie można sobie wyobrazić ruchu na skrzyżowaniu o największej płynności, które nie byłoby ruchem najefektywniejszym ekonomicznie. Kryterium (8) jest więc dobrym kryterium optymalizacji sieci transportowych.

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

$$w = \sum_{i=1}^{n} w_i \tag{9}$$

gdzie: n - liczba wszystkich podróżnych,

w_i - czas podróży i - tego podróżnego, który to czas chcemy minimalizować, każdy indywidualnie lub za pomocą projektowanych zmian organizacji ruchu, przez zdolnych inżynierów ruchu!

Można zwrócić uwagę na to, że pojęcie oczekiwanej płynności F_j jest dobrym kryterium optymalizacji ruchu, bowiem na danym skrzyżowaniu maksymalizuje oczekiwaną płynność ruchu, co daje gwarancję minimalizacji czasu podróży w_i, zależnego od organizacji ruchu na danym skrzyżowaniu. Jest to jedyna droga optymalizacji sieci transportowej, tylko poprzez iteracyjne poprawianie płynności ruchu na j – tym skrzyżowaniu. Ze względu na złożoność matematyczną tych związków, wyrażoną na rys. 3 i 4, jedynym praktycznym sposobem optymalizacji sieci transportowych jest optymalizacja płynności ruchu na każdym skrzyżowaniu, w sposób iteracyjny, za pomocą odpowiednich modeli symulacyjnych. W ten sposób, ewolucyjny (a więc iteracyjny!) można poprawiać organizację ruchu na poszczególnych skrzyżowaniach, za pomocą odpowiednich modeli symulacyjnych skrzyżowań, jak w SOUT(p. np. Woch, 1993, 1998a, 2001b, 2001c).

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 dla zapewnienia płynności ruchu, ponieważ w interesie każdego podróżnego leży podnoszenie płynności ruchu w celu minimalizacji swojego czasu podróży. Można więc stwierdzić, że powyższe dwa zagadnienia optymalizacyjne (8) i (9) są sobie równoważne.

Ważona sumaryczna płynność zaproponowana przez Wocha (1998a) 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.

Innymi słowy, zróżnicowanie ekonomiczne użytkowników dróg otrzymujemy przez zadanie odpowiednich priorytetów poszczególnym kategoriom ruchu (jak w SOUT, p.np. Woch, 2001b). Na poziomie globalnym, gdzie zróżnicowanie kosztów podróży poszczególnych użytkowników jest nieistotne, bo w rzeczywistych procesach ruchu uprzywilejowanie poszczególnych kategorii ruchu może przenosić opóźnienie na ruch podporządkowany, co powinno być uwzględnione na poziomie modelu symulacyjnego skrzyżowania, a jest nieistotne na poziomie globalnym. A więc, zróżnicowanie ekonomiczne poszczególnych użytkowników sieci transportowej jest uwzględniane poprzez wagi priorytetów na skrzyżowaniu dające ustaloną kolejność obsług kolizyjnych potoków ruchu na skrzyżowaniu, zgodną z zasadami ruchu.

3. TEORIA PŁYNNOŚCI RUCHU JAKO PRAKTYCZNE NARZĘDZIE OPTYMALIZACJI SIECI TRANSPORTOWYCH

Maksymalizacja sumarycznej płynności ruchu F (8) jest równoważna minimalizacji sumarycznego czasu podróży w (9). 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, ze względu na dualność zagadnienia, że maksymalizacja oczekiwanej płynności oraz minimalizacja sumarycznego czasu podróży są to równoważne ujęcia optymalizacji sieci transportowych (8) i (9).

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, ze 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. 3.

Jedynym praktycznym sposobem minimalizacji sumarycznych czasów podróży w (9) jest podnoszenie płynności ruchu na skrzyżowaniach (8). 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. 4, są to bardzo złożone związki, zależne od ustalonej optymalnej organizacji ruchu na j - tym skrzyżowaniu. Te związki można jedynie badać za pomocą modeli symulacyjnych skrzyżowań (p.np. Woch, 1975, 1977, 1983, 1996, 2001a, 2001b, 2001c). Upraszczanie rzeczywistości w tym względzie jest niedopuszczalne! Nie można sobie wyobrazić dobrej optymalizacji sieci transportowej bez oceny warunkowych płynności ruchu jak na rys. 3.

Teoria płynności ruchu poszerzona o pojęcie warunkowej przepustowości daje nam właściwe narzędzie głębokiej analizy przepustowości skrzyżowań, pozwala bowiem na optymalizację organizacji ruchu skrzyżowań, bez czego trudno sobie wyobrazić optymalizację sieci transportowych. Tylko pojęcie warunkowych przepustowości skrzyżowań daje możliwość optymalizacji sieci transportowych. Bez tego pojęcia jest to niemożliwe!

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

Biorąc pod uwagę powyższe argumenty, wyróżniamy dwa równoważne zagadnienia optymalizacji sieci transportowych, a więc możemy stwierdzić, że poszukiwanie struktury optymalnej sieci transportowej według kryterium (8) jest równoważne poszukiwaniu optymalnej struktury według kryterium (9), a więc:

$$\max_{C,R} F = \sum_{j=1}^{m} F_j \equiv \min_{C,R} w = \sum_{i=1}^{n} w_i \qquad (10)$$

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. 5 sprawiła, że praktycznym sposobem optymalizacji sieci transportowych jest budowa modeli Monte Carlo skrzyżowań, takich, jak u Wocha (1975), (1977), (1983), (1996), (1998a), (2001a) (2001b), (2001c), (2004). 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 na minimalizację sumarycznego czasu w i zastąpienie dualnym zagadnieniem maksymalnej sumarycznej płynności ruchu F. Autorowi jasno udało się dopiero dzisiaj to wykazać poprzez ujęcie (8), 9) i (10).

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.

Skrzyżowania 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, Węgierski 1971). Modelowanie matematyczne skrzyżowań transportowych wymaga narzędzi teorii płynności ruchu (patrz Gross i Harris 1974, Heidemann 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, 161-186, 1999.
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. and 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, 103-118, 1996.
9. Heidemann D. and Wegmann H.: Queueing unsignalized intersections. Transportation Research - B 31, 239-263, 1997.
10. Kim T. J. and Suh S.: 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, 1989.
11. Newell G.F.: Approximation methods for queues with application to the fixed-cycle traffic light. SIAM Review 7(4), 223-240, 1965.
12. Stark R. and Nicholls R.: Podstawy projektowania inżynierskiego. PWN, Warszawa 1979.
13. Steenbrink P. A.: Optymalizacja sieci transportowych. WKŁ, Warszawa 1978.
14. Tanner J. C.: A theoretical analysis of queues at an uncontrolled intersection. Biometrica 49, 163-170, 1962.
15. Webster F. W.: Traffic signal settings. *Road Searched Technical Paper No. 39.* Her Majesty's Stationery Office, London 1958.
16. Węgierski 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, 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, Katowice 1998.
25. Woch J.: Compressed queueing processes for single traffic flows. *The Archives of Transport,* Polish Academy of Sciences 10, 3-4, Warsaw 1998, 67-82.
26. Woch J.: Centrum logistyczne w Katowicach jako składnik strategii PKP. Materiały Konferencji Pojazdy Szynowe '98, Gliwice 1998, 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, 177-181.
28. Woch J.: A queueing theory model for traffic flow. *Modelling and Management in Transportation,*Volume 1, Poznań – Kraków 1999, 295-300.
29. Woch J.: Two queueing theory models for traffic flow. *The Archives of Transport* 1999, 11, 1-2, 73-90.
30. Woch J.: Capacity of complex intersections. *The Archives of Transport* 1999, 11, 3-4, 87-100.
31. Woch J.: Optimization algorithm of transportation networks. *The Archives of Transport,* Polish Academy of Sciences 12, 1, Warsaw 2000, 73-93.
32. Woch J.: The maximum freedom of flow. *The Archives of Transport,* Polish Academy of Sciences 12, 3, Warsaw 2000, 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, 87-108.
36. Woch J.: Two models for traffic flow. Transportation Research. Submitted for publication. 2005.

Recenzent: Prof. dr hab. Wiesław Starowicz