

Janusz WOCH

METODY OPTIMALIZACJI SIECI TRANSPORTOWYCH. ANALIZA ZMIENNOŚCI RUCHU W CIĄGU ULIC CHORZOWSKA - ROZDZIENSKIEGO

Streszczenie. W artykule zaprezentowano kilka podstawowych problemów analizowanych w kierunku budowy systemu typu ITS. Systemy te budowane są w celu umożliwienia optymalizacji podróży w sieci transportowej. Badano podstawowe związki pomiędzy parametrami ruchu: średnią prędkością i natężeniem w dobie.

METHODS OF OPTIMIZATION TRANSPORT NETWORKS. TRAFFIC FLOW ANALYSIS AT CHORZOWSKA-ROZDZIENSKIEGO STREET

Summary. In this article has been presented some basic problems in direction to build ITS systems in the future. Intelligent transportation systems ITS provide the technology to enable people to make smart travel choices in road network. The basic problems will have to be considered: analysis of relationship between traffic volume and average speed on DTS highway, impact between signalized intersection and unsignalized etc.

1. WPROWADZENIE

Modelowanie przepustowości, ocena warunków ruchu i efektywności ekonomicznej złożonych węzłów transportowych, istniejących i planowanych, w warunkach jego kongestii, jest przedmiotem zainteresowania teoretyków potoków ruchu, projektantów dróg i ruchu w systemach transportowych. Metody te są z powodzeniem przystosowywane i stosowane w innych zagadnieniach inżynierii ruchu, np. w inżynierii ruchu lotniczego. Stosowane są również przez kolejowe biura projektowe. Temat badawczy oparty jest, co trzeba wyraźnie podkreślić, na oryginalnych metodach opracowanych w ramach prac Katedry Inżynierii Ruchu. Problem poprawy jakości systemów transportowych, w tym również komunikacji zbiorowej, jest głównym polem badawczym w przedmiocie inżynierii ruchu w aspekcie istniejącej potrzeby i tendencji do tworzenia zintegrowanych systemów transportowych (ang. ITS – Intelligence Transport Systems). Jest to złożone zagadnienie wymagające podjęcia działań w wielu aspektach, w tym: badanie oddziaływania kongestii ruchu w aglomeracjach, redukcja liczby ofiar wypadków drogowych, zwiększenie dostępności usług transportowych, zmniejszenie zanieczyszczeń środowiska, poprawienie jakości warunków ruchu drogowego, redukcja wpływu transportu na środowisko, badanie i ocena warunków ruchu, w tym parkowania pojazdów, modele przepustowości węzłów drogowych, bezpieczne dojazdy do

szkół, efektywność tras komunikacji zbiorowej, ekonomiczne aspekty działania systemów transportowych, ze szczególnym naciskiem położonym na zintegrowane systemy transportowe. W pracy omówione zostaną wyłącznie wybrane zagadnienia.

2. WYBRANE CHARAKTERYSTYKI NA SKRZYŻOWANIACH BEZ SYGNALIZACJI ŚWIETLNEJ

W pracy, w celu zbadania wpływu oddziaływania skrzyżowań z sygnalizacją świetlną na skrzyżowania bez sygnalizacji świetlnej, zastosowano symulator typu 3D - opracowany w Katedrze Inżynierii Ruchu. Zdefiniowano obszar symulacji w postaci skrzyżowania bez sygnalizacji świetlnej, gdzie ruch regulowany jest za pomocą znaków A7 i B20. Dopuszczalna prędkość ruchu wynosi od 40 km/h do 90 km/h, na wlotach występują maksimum po 2 pasy ruchu. Parametry struktury rodzajowej, kierunkowej, parametry geometryczne można w przedmiotowym symulatorze zmieniać w szerokim spektrum wartości. Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną wpływają na funkcjonowanie skrzyżowań bez sygnalizacji w dwojaki sposób:

1. Grupują pojazdy w kolumny wypływające na początku sygnału zielonego.
2. Wpływają na cykliczne przerwy występujące w potoku nadrzędnym na skrzyżowaniach bez sygnalizacji [1,2,3]. Oba wymienione przypadki powodują występowanie na wlotach skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej charakterystycznych rozkładów statystycznych zmiennych losowych: odstępu czasu między pojazdami, czasu granicznego itp.

Przyjmuje się, że strefa oddziaływania skrzyżowań z sygnalizacją na skrzyżowania bez sygnalizacji waha się w granicach od 600 m dla dróg jednopasowych do 400 m dla dróg wielopasowych [3]. W pierwszym przypadku odległość ta jest większa z uwagi na ograniczoną dyspersję kolumny pojazdów generowanych na wylocie skrzyżowania z sygnalizacją z uwagi na brak możliwości lub ograniczenia wyprzedzania i duże natężenie ruchu. Zbadano kilka przypadków podstawowych:

- brak wpływu sąsiednich sygnalizacji na skrzyżowanie – założono losowy dopływ pojazdów na wlotach drogi głównej skrzyżowania – przypadek równoznaczny jest z brakiem występowania kolumn pojazdów o jednorodnych charakterystykach ruchu – przypadek A – nierozważny;
- jednostronny dopływ potoków ruchu swobodnego na jednym z wlotów drogi głównej, przy jednoczesnym dopływie potoku sformowanego w kolumnie na drodze przeciwnie-głej – przypadek B;
- równoczesny dopływ potoków ruchu na drodze głównej sformowanych w kolumny – (kolumna traktowana jest jak jednorodny strumień) przypadek C.

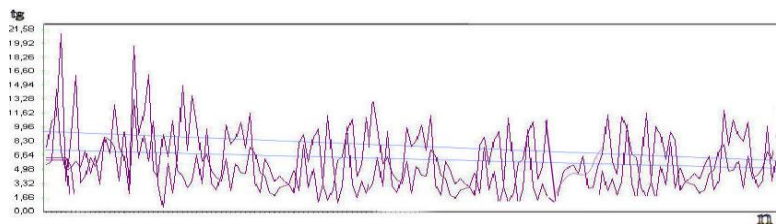
W pracy [3] przyjęto minimalne natężenie potoku ruchu, który może być traktowany jako kolumnowy jako $Q_{\min}=3$, nie mniej niż 900 P/h, co odpowiada wartości czasu granicznego równego 4 s. Założono, że w takim przypadku występuje ciągle blokowanie ruchu z drogi podporządkowanej z uwagi na wartości czasu granicznego i odpowiednio zaimplementowano to założenie w metodzie obliczania przepustowości wlotów podporządkowanych. W przedmiotowej pracy skupiono się na zbadaniu wpływu grupowania pojazdów opuszczających skrzyżowania z sygnalizacją świetlną na wartości czasów: granicznego i czasu następstwa na drodze podporządkowanej. Z uwagi na to rozważano przypadki grupowania pojazdów z czasem granicznym od 4,5 s do 10 s (na granicy ruchu kolumnowego i dalej w kierunku ruchu swobodnego). Odpowiada to natężeniom na drodze głównej rzędu od 800 P/h do 360 P/h. Pytanie, jakie postawiono, dotyczyło stopnia wykorzystania odstępów czasu granicznego w zależności od parametrów kolumny pojazdów na drodze głównej.



Rys. 1. Przykładowe widoki na skrzyżowanie. Po lewej widok z kamery, po prawej z auta testowego
Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Example view on the crossroad from test car
Source: elaboration own

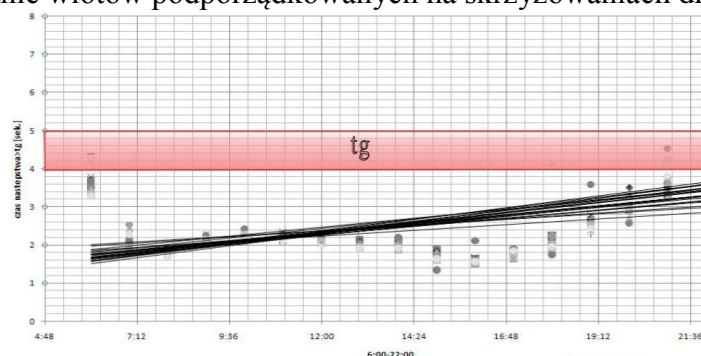
Zgodnie z oczekiwaniami i przebiegiem zmienności funkcji $C_{or}(Q_n)$ [2,3] w miarę zmniejszania się wartości czasu granicznego rośnie przepustowość wyjściowa relacji podporządkowanej. Czy tak jest w istocie? Z przeprowadzonej symulacji wynika to jednoznacznie. W miarę zmniejszania odstępów czasu między pojazdami na drodze głównej, wynikającego ze zwiększania natężenia ruchu, rośnie zdolność do akceptacji przez kierujących pojazdami (z woltów podporządkowanych) coraz to mniejszych wartości czasu granicznego (rys. 2). W przypadku C otrzymano mniejsze wartości czasu t_g (niższa linia trendu).



Rys. 2. Czas graniczny akceptowany przez kierujących w przypadku B i C
Źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Gap time
Source: elaboration own

Na rysunku 3 przedstawiono odstęp czasu (gdzie: czas następstwa $> t_g$) pomiędzy pojazdami formowanymi w kolumny przez skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną (odcinek DTŚ w centrum Katowic) odległy o 520 m od punktu pomiarowego. Zgodnie z [1,2,3] w tej odległości powinien maleć wpływ skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, związany z formowaniem kolumn pojazdów, tym bardziej, że w analizowanej odległości, na całym odcinku, występują 3 pasy ruchu. Okazuje się, że przy występującym na tym odcinku drogi natężeniu ruchu rzędu 15.000-35.000 pojazdów na dobę w okresie od 7:00 do 21:00 następuje całkowite blokowanie wlotów podporządkowanych na skrzyżowaniach drogowych.

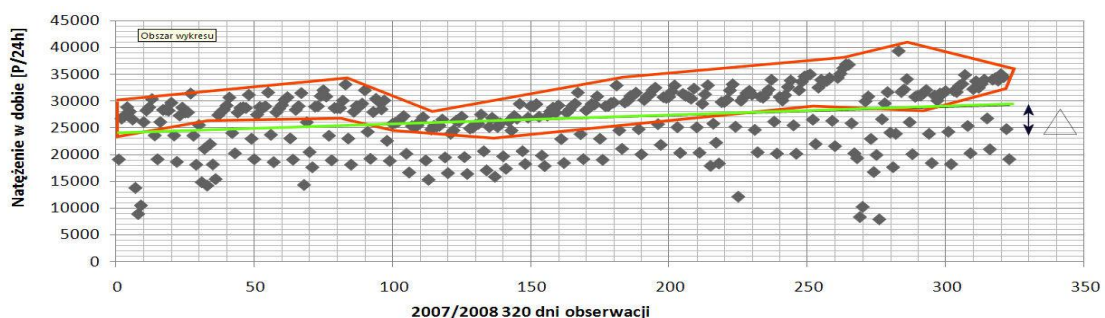


Rys. 3. Czas następstwa w odległości 520 m od skrzyżowania z sygnalizacją
Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Follow up time at 520 m distance form sign. inter
Source: elaboration own

3. PODSTAWOWE ZWIĄZKI POMIĘDZY PARAMETRAMI W STRUMIENIU RUCHU

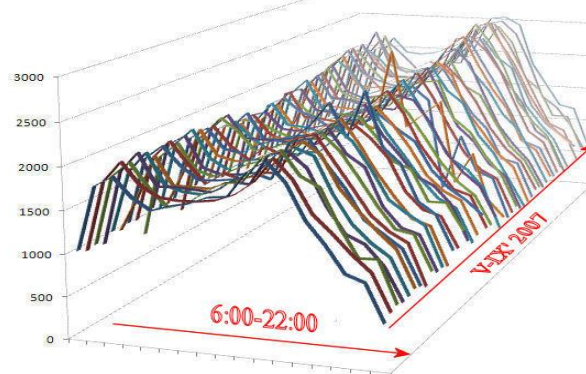
W ostatnich latach w konurbacji górnośląskiej zbudowano jak również buduje się drogi w klasach wyższych, takich jak GP i A – charakterystyczną cechą wspólną tego typu dróg jest szeroki pas dzielący. Przykładami tego typu inwestycji jest: Drogowa Trasa Średnicowa, Autostrada A4, A1 (w budowie) itp. Celem symulacji ruchu w tego typu układach drogowych jest znajomość związków ruchowych pomiędzy podstawowymi parametrami, takimi jak np. prędkość, natężenie ruchu. Temat ten był szeroko dyskutowany w literaturze przedmiotu [2,3,19-22]. Tym niemniej w analizowanym obszarze konurbacji górnośląskiej występują specyficzne rozwiązania i uwarunkowania ruchu, które wymagają powtórnego rozważenia przedmiotowego zagadnienia. W ramach Katedry Inżynierii Ruchu w 2008 r. były prowadzone takie prace badawcze. Przedmiotem szczegółowej analizy w pracy badawczej był odcinek Drogowej Trasy Średnicowej biegnący w centrum Katowic, w którym krzyżują się ważne potoki ruchu z punktu widzenia całej konurbacji w relacjach W-E i N-S (głównie ruch tranzytowy), jak również dopływają inne potoki lokalne o znacznym natężeniu ruchu. W pracy analizowano średnią dobową prędkość ruchu, jak również natężenie ruchu badane w interwałach co godzinę. Rejestrowana średnia prędkość dobowa wahała się w granicach od 61 km/h do 78 km/h, w zależności od relacji i pasa ruchu. Rozpatrywany w pracy odcinek drogi posiada trzy pasy ruchu. Natężenia ruchu – dobowe - wahały się w granicach od 800-1400 P/h w relacji E-W do 800 do 1600 P/h w relacji W-E. Charakterystycznym trendem zaobserwowanym zarówno w przypadku relacji W-E, jak również E-W był znaczny wzrost dobowego natężenia ruchu od poniedziałku do piątku i gwałtowny (rzędu 30-40 %) spadek natężenia dobowego w soboty i niedziele. Wzrost ten miał charakter liniowy, licząc od poniedziałku do piątku. Konsekwencją takiego stanu rzeczy jest spadek prędkości średniej w dni robocze (średnia prędkości ok. 75 km/h) oraz wzrost tej prędkości w dni wolne do ok. 78 km/h. Przeprowadzone analizy korelacji liniowej dobowego natężenia ruchu i prędkości średniej pozwoliły ustalić zależność tych dwóch parametrów na poziomie od 0,4[-] do 0,7[-], czyli zależność ta jest słaba lub umiarkowana (na granicy silnej). Należy zauważyć, że silniejszą – umiarkowaną korelację dla dwóch analizowanych parametrów wykazały dwa niezależne pasy ruchu w różnych relacjach. Należy odnotować, że dwukrotnie zweryfikowano korelacje pomiędzy tymi parametrami na granicy umiarkowanej/wysokiej, tj. rzędu 0,72 i 0,64 odpowiednio dla pasów środkowego w relacji E-W i pasa prawego w relacji W-E. Jak widać, determinantą związków pomiędzy prędkością i natężeniem nie jest w żadnym przypadku organizacja ruchu (pas ruchu, po którym poruszają się pojazdy danej relacji a zatem związana z tym pasem prędkość komunikacyjna). Gdyby tak istotnie było, dla każdego pasa powinna występować silna korelacja pomiędzy parametrem średniej prędkości ruchu i natężeniem dobowym. Na rysunku 4 zaprezentowano dobowy rozkład natężenia ruchu w latach 2007-2008.



Rys. 4. Natężenie dobowe 2007/2008: W-E

Fig. 4. Traffic volume 2007/2008:W-E

Na rysunku 4 zwraca uwagę przede wszystkim wyraźne oddzielenie ruchu w dni robocze od ruchu w dni świąteczne oraz jednorodny charakter trzech zbiorów: natężenia w dni robocze, w soboty i w niedziele (patrzac od góry). Ponadto zauważalny jest znaczny przyrost w ciągu roku średniego natężenia ruchu na tej drodze o 5000 pojazdów, tj. ok. 20%. Na rysunku 5 zaprezentowano rozkład wahań natężenia ruchu w dobie w miesiącach maj – październik 2007 r. Zwraca uwagę wyraźne zaznaczenie szczytów porannego i popołudniowego. Wyniki badań odzwierciedlają powszechnie znane teorie odnośnie do natężenia ruchu w dobie [1,2,3] i inne. Zgodnie z uzyskanymi wynikami w Katedrze kontynuowane będą badania z położeniem nacisku na wpływ struktury kierunkowej i rodzajowej na badanym odcinku na związku pomiędzy analizowanymi parametrami.



Rys. 5. Dobowe wahania natężenia ruchu, 2007 maj-październik: W-E [P/h]

Fig. 5. Traffic volume per hour 2007: W-E [P/h]

4. ODDZIAŁYWANIE SKRZYŻOWAŃ Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNA NA OTOCZENIE ZEWNĘTRZNE

Stosowanie sygnalizacji świetlnej jest jedną z elementarnych form regulacji ruchu na skrzyżowaniach drogowych [4-11]. Zastosowanie takiej organizacji ruchu determinuje obniżenie liczby lub wręcz zupełną eliminację punktów kolizji w węźle drogowym. O ile rondo separuje punkty kolizji w węźle drogowym w przestrzeni, o tyle skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną separuje te punkty kolizji w czasie (w cyklu sygnalizacji). Z jednej strony skrzyżowania takie są czynnikiem regulującym ruch poprzez grupowanie pojazdów, z drugiej jednak strony sygnalizacja świetlna na skrzyżowaniach zakłóca ruch na sąsiednich skrzyżowaniach poprzez celowe tworzenie przerwy w strumieniu ruchu. Zagadnienie to zostało szerzej opisane w poprzedniej części pracy [pkt. 2]. Związane jest z tym powstawanie kolejek pojazdów na skrzyżowaniu. Głównym miernikiem efektywności sygnalizacji świetlnej są straty czasu [16-21].

Podstawowym uproszczeniem w modelach strat czasu na skrzyżowaniach wyposażonych w sygnalizację świetlną jest nieuwzględnianie wariacji czasów obsługi. Poniżej przedstawiono pewien model strat czasu uwzględniający przedmiotową wariację czasów obsługi jako elementu modelu strat czasu – średniego czasu oczekiwania w kolejce dla systemu kolejkowego $M_{+\Delta} / G_{+\Delta} / 1$ z wykorzystaniem teorii zlepionych procesów kolejek [7–15]. Przedstawiony model zakłada minimalny odstęp czasu pomiędzy pojazdami w procesie ich obsługi. Zastosowanie przedmiotowego modelu pozwala uwzględnić wariacje czasów obsługi. Proces obsługi pojazdu w przedmiotowym węźle zdefiniowano jako czas przejazdu liczony od momentu przekroczenia linii zatrzymania (wjazd w obszar kolizji) do chwili opuszczenia skrzyżowania przez pojazd (opuszczenie obszaru kolizji), wliczając w to długość

pojazdu. Mając to na uwadze, średni czas obsługi określono za pomocą następującego równania:

$$\bar{t}_\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_{\mu i} \text{ [s]}, \quad (1)$$

gdzie:

n – liczba obserwacji [-],

$t_{\mu i}$ – czas obsługi i -tego pojazdu [s].

Natomiast wariancję czasów obsługi:

$$\sigma_\mu^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (t_{\mu i} - \bar{t}_\mu)^2 \text{ [s}^2\text{]}, \quad (2)$$

gdzie:

n – liczba obserwacji [-],

\bar{t}_μ – średni czas obsługi [s],

$t_{\mu i}$ – czas obsługi i -tego pojazdu [s].

W pracach [8-11] przeprowadzono i poddano analizie badania empiryczne wariancji czasu obsługi na rzeczywistych węzłach drogowych z sygnalizacją świetlną. Wykonane w ramach tych prac badania symulacyjne umożliwiły zbadanie zjawiska pod kątem parametrów statystycznych. Jednoznacznie wykazano, że wariancja czasów obsługi maleje ze wzrostem intensywności ruchu (relacje bezkolizyjne), co zgodne jest z intuicyjnym podejściem do zagadnienia. W przypadku relacji kolizyjnych skrętu w lewo (kolizja z ruchem nadrzędnym) wariancja czasu obsługi rośnie wprost proporcjonalnie do wzrostu obciążenia pasa ruchu.

5. PORÓWNANIE WYBRANYCH METOD OPTYMALIZACYJNYCH

W ramach prac Katedry w ostatnich latach powstało wiele narzędzi optymalizacji węzłów drogowych (optymalizacja ruchu na skrzyżowaniach typu „rondo”, skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną, metody koordynacji zamknięć drogowych itp.). Generalnie dobre narzędzie optymalizacyjne to takie, które spełnia określone warunki, np. zbieżność stochastyczną, dobroć programu itp. Wiele spośród metod optymalizacyjnych stosowanych na świecie opiera się na wspólnych podstawach, jakimi są, bez wątpienia, instrukcje i wytyczne HCM. Poszczególne zarządy dróg krajowych różnych państw zalecają dostosowywanie tych podstawowych metod do warunków lokalnych (w Polsce zlecenia dla GDKiA wykonywał m.in. zespół prof. M. Tracza). W pracy analizowano wiele zagranicznych aplikacji, w tym: Circular 212, HCM 85, Cinch 88, PICADY, HCS 2,1g, HCS 3,2, HCS 2000, Sidra 5.2, Synchro 5.0, Arcady, Arcady 2, Rodel. Analizowano te programy pod kątem uzyskiwanych parametrów dla badanych węzłów drogowych, jak również zakresu danych wejściowych inwentaryzowanych w poszczególnych typach węzłów. Można zatem opisać zestaw podstawowych danych niezbędnych w analizie węzłów drogowych: uwzględnianie struktury kierunkowej ruchu, struktury rodzajowej ruchu, zdolność modelowania wpływu natężenia ruchu pieszych na skrzyżowaniu, obliczanie opóźnienia pojazdów wynikającego z geometrii, obliczanie liczby oraz częstotliwości zdarzeń drogowych, zdolność uwzględniania w obliczeniach przepustowości lokalnych warunków ruchu, szerokości wlotów, szerokości dróg

dojazdowych do ronda (wlotów i wylotów), średnicę ronda, promienie skrętu na wjazdach na rondo, widoczności na wlotach przy wjeździe itp. Wyniki dotyczące porównania danych otrzymywanych z różnych metod obliczeniowych (programów) [25] skłaniają do ostrożnego stosowania ww. bez przystosowania ich do potrzeb lokalnych. Poniżej przedstawiono porównanie odchyleń minimalnych i maksymalnych od wyników wzorcowych dla danego typu węzła.

Tablica 1

Porównanie wyników obliczania C w różnych programach

Program	1	2	3	0	5	6	7	8	9	10	11	12	13
odch. min	0%	0%	31%	23%	0%	0%	40%	0%	33%	2%	16%	34%	20%
odch. max	114%	32%	69%	42%	114%	31%	150%	40%	56%	37%	134%	41%	153%

Źródło: [25]

Konkludując powyższe, można powiedzieć, że w zależności od wybranej implementacji metody optymalizacji węzła drogowego należy zwrócić szczególną uwagę na uśrednianie poszczególnych charakterystyk w długookresowych czasach symulacji.

6. WNIOSKI

Budowa zintegrowanego systemu transportowego (ITS) to zadanie złożone, składające się z wielu etapów i dotyczące wielu, często różnorodnych zagadnień. W ramach prac statutowych prowadzonych w Katedrze Inżynierii Ruchu w latach 2002-2008 zespół badawczy przedstawił opis i wyniki badań wybranych zagadnień związanych z optymalizacją węzłów i odcinków drogowych. Rozpatrywane były takie zagadnienia, jak: optymalizacja skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej, z sygnalizacją świetlną i rond, na które to węzły położono szczególny nacisk z uwagi na fakt, że takie rozwiązania organizacyjne są promowane przez miejskie zarządy drogowo i stają się dominującym elementem w górnośląskiej sieci drogowo. Poruszono w tych tematach badawczych również kwestie projektowania i optymalizacji sieci tramwajowej, badano parametry przejazdów tego środka transportu przez odcinki ruchu swobodnego (patrz: tramwaj szybki). Innym zagadnieniem, które omawiano, była koordynacja zamknięć w gęstej sieci transportowej – opisano algorytmy wyznaczania optymalnych zamknięć i objazdów. Jednym z tematów badawczych rozpatrywanych specjalnie pod kątem systemów ITS była analiza wykonalności technicznej i ekonomicznej wykorzystania techniki satelitarnej (możliwości wizyjnych satelitów geostacjonarnych) w celu wsparcia procesów decyzyjnych w sterowaniu i optymalizacji ruchu jak również w pomiarach ruchu drogowego. Zauważono, że w chwili obecnej jest to niewykonalne w aspekcie technicznym oraz nieosiągalne w aspekcie ekonomicznym.

Bibliografia

1. Buszma E.: Podstawy inżynierii ruchu drogowego. WKŁ, Warszawa 1971.
2. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1999.
3. GDDKiA, Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej, Warszawa 2004.

4. Luttinen R. T., Nevala R.: Capacity and level of service of finnish signalized intersections. Finnish Road Administration. Finnra Reports 25/2002.
5. Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. GDDKiA, Warszawa 2004.
6. Sierpiński G.: Obsługa pojazdów na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 56, Gliwice 2004, s. 347 – 352.
7. Sierpiński G.: Opóźnienie „kolizyjne” na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną – pojazdy skręcające w lewo. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 57, Gliwice 2005, s. 365 – 370.
8. Sierpiński G.: Użycie modelu kolejkowego M/G/1 do budowy modelu strat czasu pojazdów na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną. Problemy transportu. Półrocznik nr 1 (1), s. 253 – 257, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
9. Sierpiński G.: Zmienność czasów obsługi na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 63, Gliwice 2006, s. 209 – 213.
10. Sierpiński G.: Variance of service times research on signalized intersections. Transport Problems. International Scientific Journal. Volume 2, Issue 1, pp. 79-85, Gliwice 2007.
11. Sierpiński G.: Weryfikacja modelu opóźnień.... Rozprawa doktorska. Instytut Inżynierii Lądowej, Politechnika Wrocławska. Raport serii PRE nr 16/2006.
12. Woch J.: Compresses queueing processes for single traffic flows. The Archives of Transport, Polish Academy of Sciences 10, Warsaw 1998.
13. Woch J.: Narzędzia analizy efektywności i optymalizacji sieci kolejowej. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
14. Woch J.: Nowe ujęcie przepustowości drogi z porównaniem modeli. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 47, Gliwice 2003, s. 43 – 72.
15. Woch J.: Teoria potoków ruchu (w druku).
16. Allsop R. E.: Delay at a fixed time traffic signal – I: Theoretical analysis. Transportation Science, 6, 3, 260-285, London 1972.
17. Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, Council, Washington, D.C. 2000.
18. Praca zbiorowa pod red.: Janecki R., Pawlicki J.: Laboratorium statystyki systemów i procesów transportowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
19. Highway Capacity Manual, Transportation Research Board Special Report 209, Washington, D. C. 1994.
20. Highway Capacity Manual 2000, Transportation Research Board, Highway Capacity Committee, Washington, D. C. 2000.
21. Chodur J.: Funkcjonowanie skrzyżowań drogowych w warunkach zmienności ruchu. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2007.
22. Sabra Z., Wallace Ch., Lin F.: Traffic Analysis software tools. Transportation Research Board/National Research Council. Circular number E - CO14, september 2000.
23. Taekratok T.: Modern Roundabouts for Oregon. Oregon Department of Transportation. Research Unit, 200 Hawthorne SE, Suite B-240 Salem, OR 97310, june 1998.
24. Petraglia Kenneth J: Field validation of MOE's for unsignalized intersection analysis

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Romuald Szopa