

Jacek OSKARBSKI*
Politechnika Gdańska

WPLYW TYPÓW SKRZYŻOWAŃ W SIECI ULIC NA SPRAWNOŚĆ FUNKCJONOWANIA TRANSPORTU INDYWIDUALNEGO W MIASTACH ŚREDNIEJ WIELKOŚCI

Streszczenie. Niniejszy referat dotyczy określenia wpływu rozwoju motoryzacji na funkcjonowanie transportu indywidualnego miast średnich. Analizy przeprowadzone zostały na przykładzie miasta teoretycznego o promienisto – obwodnicowym układzie geometrycznym sieci ulicznej. Autor podjął próbę uzasadnienia tezy, iż prawidłowa lokalizacja poszczególnych typów skrzyżowań w zależności od odległości do obszarów centralnych powoduje poprawę sprawności układu ulicznego miasta. W końcowej części przedstawiono wstępne wyniki wpływu typu skrzyżowań w sieci ulicznej na wybrane miary jej sprawności.

INFLUENCE OF INTERSECTIONS TYPES IN STREET NETWORK ON PRIVATE TRANSPORT EFFICIENCY IN MEDIUM TOWNS

Summary. The paper concerns analysis of motorization development influence on private transport functionality in medium towns. Analysis were carried out with example of theoretical town with circural geometric configuration of street network. Author has attempted to justify thesis that the proper location of different junction type depending on distance from central area make the efficiency of private transport in street network better. There were presented initial results of intersection types influence in street network on some of functionality measures.

1. Wstęp

Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat obserwujemy wzrost ruchu samochodowego. Spowodowany jest on z jednej strony wzrostem motoryzacji, z drugiej zaś wzrostem ruchliwości użytkowników samochodów. Wzrastający popyt na transport indywidualny jest przyczyną zatłoczenia sieci ulicznej, a co za tym idzie zwiększenia uciążliwości środowiskowych. Zatłoczenie sieci ulicznej możemy obserwować przede wszystkim w miastach dużych, szczególnie w okresach szczytów transportowych, jednakże coraz częściej z problemem tym możemy spotkać się w miastach małych i średnich. Postępująca degradacja środowiska oraz pogarszanie jakości życia mieszkańców miast wymagają zdecydowanych działań w zakresie redukcji zatłoczenia. Działania

*Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Ryszard Krystek

takie możliwe są dzięki stosowaniu instrumentów racjonalnej polityki transportowej. Z reguły władze miast, za przykładem miast Unii Europejskiej i innych krajów OECD, deklarują poparcie dla polityki zrównoważonego rozwoju, polegającej na kompromisie między celami społecznymi, ekonomicznymi i ochrony środowiska. Podstawowe zasady tej polityki – to priorytet dla transportu zbiorowego oraz dla ruchu pieszego i rowerowego, ograniczona swoboda korzystania z samochodu w niektórych strefach (zwłaszcza w centrum miasta), polityka parkingowa: płatne parkowanie, ograniczenie liczby parkingów w przeciążonych obszarach, nacisk – zwłaszcza w pierwszym etapie – na rehabilitację i bardziej efektywne wykorzystanie istniejącej infrastruktury (drogi, tramwaje, kolej) i jej modernizację, ułatwienie funkcjonowania transportu zbiorowego w warunkach rosnącego zatłoczenia ulic przez stosowanie rozwiązań zapewniających priorytet w ruchu, stosowanie instrumentów fiskalnych: w pierwszej fazie opłat za parkowanie, w przyszłości opłat za korzystanie z dróg w najbardziej zatłoczonych rejonach miasta [7].

Pośród instrumentów racjonalnej polityki transportowej ważną rolę w ograniczaniu popytu na podróż samochodem osobowym w niektórych obszarach miast można wymienić: priorytety dla transportu zbiorowego, pieszych i rowerzystów, częściowe lub całkowite wyłączenie obszarów z ruchu samochodowego, ograniczanie liczby parkingów, stosowanie odpowiednich środków organizacji ruchu i systemów zarządzania ruchem, usprawnień i rozbudowy połączeń prowadzących ruch tranzytowy poza obszarami centralnymi, stosowanie środków uspokojenia ruchu. Zastosowanie odpowiednich typów skrzyżowań na ciągach ulicznych, przebiegających lub prowadzących do obszarów centralnych, może sprawić, że niektóre ciągi staną się mniej atrakcyjne dla kierowców, którzy wybiorą inną trasę podróży. Zastosowanie skrzyżowań z sygnalizacją świetlną pozwala dodatkowo na sterowanie dostępnością do różnych obszarów miasta. Bardzo ważne jest zatem, aby wypracować prawidłowe scenariusze rozwoju sieci ulicznej, z jednej strony pozwalające na sprawne i efektywne funkcjonowanie transportu, z drugiej strony łagodzące uciążliwości środowiskowe. W tym celu analizie poddano sto kilkadziesiąt wariantów lokalizacji skrzyżowań w mieście modelowym, dla różnych wariantów zagospodarowania przestrzennego oraz kilku scenariuszy wzrostu ruchu.

2. Charakterystyka miasta teoretycznego

Rozkład ruchu w sieci ulicznej jest zależny od wielu czynników, determinujących wybór trasy przejazdu w sieci oraz obciążenie danego odcinka ulic potokiem ruchu. Na rozkład ruchu w sieci ulicznej mają wpływ zagospodarowanie przestrzenne miasta, układ komunikacyjny miasta, podział podróży na poszczególne środki transportu oraz zachowania transportowe mieszkańców.

Modele regresji intensywności zagospodarowania przestrzennego zostały określone na podstawie analizy danych pochodzących z pięciu miast o średniej wielkości. W celu opisanego rozkładu gęstości miejsc zamieszkania zastosowano model [4]:

$$d_{mki} = 112 \cdot e^{-0,89 \cdot x}, \quad (1)$$

gdzie: d_{ki} – gęstość miejsc zamieszkania [osób/ha],

x – odległość środka ciężkości analizowanego rejonu transportowego od centrum miasta [km].

Modele wykładnicze zastosowano również w celu opisanego rozkładu gęstości miejsc pracy, miejsc pracy w sektorze usług oraz rozkładu gęstości miejsc w szkołach ponadpodstawowych. Podczas generowania modeli rozmieszczenia programu urbanistycznego [4] w oparciu o wzór (1) oraz pozostałe modele intensywności zagospodarowania uwzględniono czynnik losowy poprzez wygenerowanie zmiennych losowych o rozkładzie normalnym [4].

Na podstawie powyższych założeń do analiz wybrano 5 modeli zagospodarowania przestrzennego, na podstawie których otrzymano 5 wariantów rozmieszczenia potencjałów ruchotwórczych w mieście teoretycznym. Przykładową więźbę ruchu dla jednego z wariantów zagospodarowania przestrzennego przedstawiono na rys. 1.

Sieć teoretyczną przyjęto na podstawie układów ulicznych następujących miast [4]: Krosno, Nowy Sącz, Ostrowiec Świętokrzyski, Sanok, Tomaszów Mazowiecki, Gorlice, Oświęcim i Sandomierz. Przyjęto, że układ podstawowy sieci ulicznej tworzą ulice zbiorcze, ulice główne ruchu przyspieszonego, ulice główne oraz ulice lokalne, które przenoszą znaczny ruch (pełniąc funkcje ulicy zbiorczej). Przedstawiony model teoretyczny charakteryzuje jeden z możliwych scenariuszy docelowego, pełnego układu ulicznego miasta. Do analiz wybrano promienisto-obwodnicowy model geometryczny sieci ulic, który stanowi rozwinięcie układu promienistego. Układ promienisty i niepełny układ promienisto-obwodnicowy – to najczęściej spotykane układy geometryczne sieci w miastach małych i średnich. Przekształcenia struktury sieci ulicznej w takich miastach zmierzają w kierunku układu promienisto-obwodnicowego. Układ taki pozwala na kształtowanie zarówno sieci transportu indywidualnego, jak i zbiorowego oraz ich rozdzielenie. Umożliwia on również ograniczenie lub wyłączenie zarówno tranzytowego, jak i lokalnego ruchu samochodowego z obszaru centralnego miasta. Dla miasta teoretycznego, w pierwszym podejściu, założono szereg wariantów lokalizacji różnych typów skrzyżowań na przecięciu ulic układu podstawowego (tabela 1, rys. 2). W dalszych badaniach analizie zostanie poddanych kilkanaście wariantów, uwzględniających wymogi racjonalnej polityki transportowej z jednej strony, koszt budowy, warunki ruchu i bezpieczeństwo ruchu z drugiej strony. Z punktu widzenia racjonalnej polityki transportowej niekorzystnie należy oceniać warianty z pierwszeństwem przejazdu wzdłuż ulic promienistych, umożliwiające przejazdy na dalsze odległości przez obszary centralne miasta.



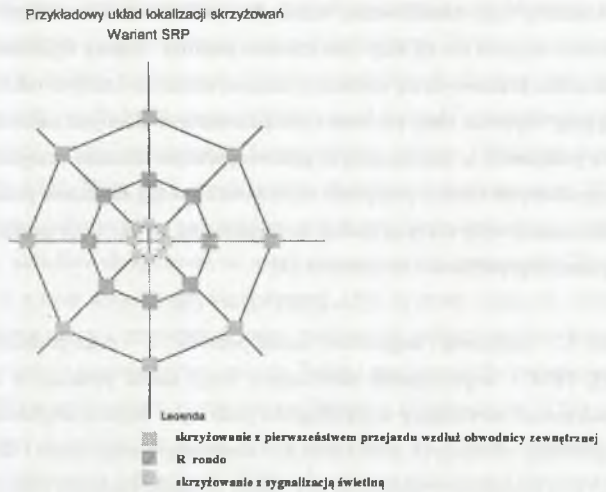
Rys. 1. Wieżba ruchu dla wariantu A zagospodarowania przestrzennego
Fig. 1. Trip distribution in scenario A of land use

Tabela 1

Warianty lokalizacji układów skrzyżowań w mieście teoretycznym

Wariant	Ring wewnętrzny	Ring środkowy	Ring zewnętrzny
WWW (teoretyczny)	węzeł bezkolizyjny	węzeł bezkolizyjny	węzeł bezkolizyjny
SSS	skrzyżowanie z sygn.	skrzyżowanie z sygn.	skrzyżowanie z sygn.
RRR	rondo	rondo	rondo
SRP	skrzyżowanie z sygn.	rondo	skrzyż. bez sygn. z pierwszeństwem wzdłuż ulic promienistych
PPP	skrzyż. bez sygn. z pierwszeństwem wzdłuż ulic promienistych	skrzyż. bez sygn. z pierwszeństwem wzdłuż ulic promienistych	skrzyż. bez sygn. z pierwszeństwem wzdłuż ulic promienistych
TTT	skrzyż. bez sygn. z pierwszeństwem wzdłuż ulic obwodnicowych	skrzyż. bez sygn. z pierwszeństwem wzdłuż ulic obwodnicowych	skrzyż. bez sygn. z pierwszeństwem wzdłuż ulic obwodnicowych

Bazując na doświadczeniach i informacjach o podziale zadań przewozowych w miastach średnich, na potrzeby wstępnych analiz przyjęto następujący podział podróży na poszczególne środki transportu: 30% podróży środkami transportu indywidualnego – samochodem osobowym i ciężarowym, 40% podróży środkami transportu zbiorowego, 30% podróży pieszych. Przyjęty udział samochodu osobowego jest zbyt mały w stosunku do rzeczywistych wartości, występujących obecnie w miastach średnich (wynosi on powyżej 40%). Autor w swoich dalszych pracach zamierza zweryfikować przyjęty podział modalny.



Rys. 2. Przykładowy układ lokalizacji skrzyżowań

Fig. 2. Example of junction location in street network

3. Modelowanie ruchu w mieście teoretycznym

W procesie przekształcania sieci ulicznej tym bardzo ważnym elementem jest właściwe prognozowanie ruchu oraz kompleksowe analizy ruchu drogowego, wspomagane modelowaniem systemów transportowych oraz symulacjami przeprowadzonymi za pomocą ciągle udoskonalanych pakietów planistycznych. Analizy ruchu dla różnych wariantów rozmieszczenia funkcji i potencjałów oraz poszczególnych typów skrzyżowań w mieście modelowym przeprowadzono za pomocą pakietu SATURN, który został stworzony i rozwijany jest w Instytucie Badań Transportowych na Uniwersytecie Leeds w Anglii.

Na podstawie danych oraz założeń opisanych powyżej estymowano macierzjazd w mieście teoretycznym. Analizy modeli gravitacyjnych przeprowadzone przez Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej w Krakowie wykazują, że w miastach małych i średnich rozkład przestrzenny podróży niewiele odbiega od rozkładu proporcjonalnego. Głównym czynnikiem jest tutaj jedynie potencjał wyrażony liczbą mieszkańców i zatrudnieniem [2]. Wielkość potoków rozkładu proporcjonalnego pomiędzy rejonami i, j można określić wzorem [5]:

$$T_{ij} = \frac{P_i A_j}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{P_i A_j}{\sum_{j=1}^n A_j}, \quad (2)$$

gdzie: P_i - potencjał generujący podróże, A_j - potencjał absorbujący.

Ostatnią fazą modelowania ruchu jest rozłożenie ruchu między rejonami na sieć drogową. Punktem wyjścia do tej fazy jest macierz podróży między rejonami danym środkiem transportu. Produktem końcowym są wielkości natężeń ruchu na każdym odcinku sieci [6]. Podstawową zasadą przy wyborze trasy podczas rozkładu ruchu w sieci jest założenie, że osoba podróżująca wybiera połączenie o najmniejszym przewidywanym koszcie przejazdu. Podczas analiz systemów transportowych można przypisać odpowiednią wagę do czasu podróży i jej długości w celu zamodelowania wpływu tych dwóch czynników na wybór trasy przez kierowcę [1]. Powyższą sytuację można przedstawić równaniem [3]:

$$C = PPM \cdot T + PPK \cdot D, \quad (3)$$

gdzie: C – całkowity, uogólniony koszt podróży, T – czas podróży [min], D – długość podróży [km], PPM – współczynnik określający wagę czasu podróży w koszcie uogólnionym, PPK – współczynnik określający wagę długości podróży w koszcie uogólnionym.

Na potrzeby niniejszych analiz przyjęto następujące wagi czasu i długości podróży: $PPM=1$, $PPK = 0,5$ [3]. Kolejnym problemem jest wybór techniki rozkładu ruchu w sieci ulicznej. Czynnikiem załoczenia w sieci ulicznej decyduje o tym, iż koszt przejazdu różnymi trasami w sieci może się zmieniać w zależności od obciążenia poszczególnych tras (im większy potok ruchu, tym dłuższy czas podróży) oraz istnienia tras alternatywnych (efekt przerzucenia części potoku na trasy o niższym koszcie przejazdu). Czynnikiem zmienności kosztu podróży daną trasą zadecydował o wyborze metody deterministycznej. Podczas przeprowadzenia rozkładu zastosowano metodę równowagi Wardropa, w której dla nieziennej macierzy podróży poszukiwany jest minimalny generalny koszt podróży dla całej sieci wg wzoru [1]:

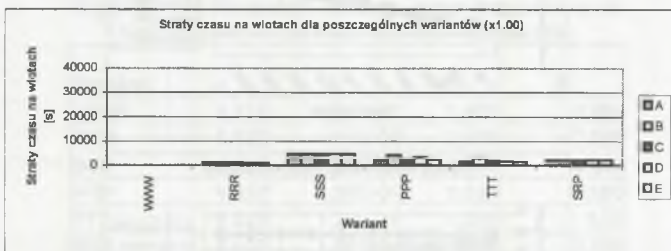
$$Z = \sum_a \int_0^{V_a} Ca(V) dV, \quad (4)$$

gdzie: Z – minimalny ogólny koszt podróży w sieci, $Ca(V)$ – koszt podróży dla odcinka „a” w sieci ulic, zdeterminowany wielkością potoku ruchu, V – wielkość potoku ruchu na odcinku.

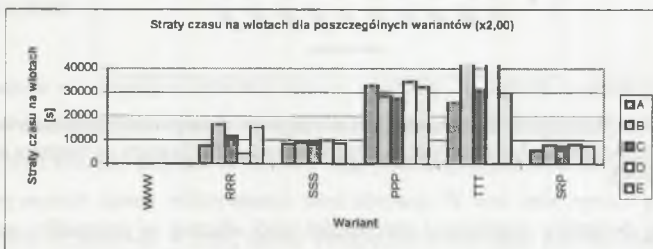
4. Miary sprawności i efektywności sieci ulicznej

Dla poszczególnych wariantów sieci i zagospodarowania przestrzennego obliczono miary, na podstawie których można porównać sprawność i efektywność sieci w różnych warunkach obciążenia ruchem i zmian jej struktury. Analizy przeprowadzone zostały za pomocą pakietu programów SATURN. Pakiet pozwala na modelowanie symulacyjnej i buforowej sieci ulicznej. W sieci symulacyjnej, oprócz rozkładu ruchu, przeprowadzona zostaje symulacja ruchu na skrzyżowaniach. W tym celu konieczne jest szczegółowe zamodelowanie organizacji ruchu na skrzyżowaniach oraz ich parametrów ruchowych (np. granicznych odstępów czasowych, natężenia nasycenia na pasach). Parametry ruchowe dla warunków polskich przyjęto na podstawie obowiązujących wytycznych obliczania przepustowości oraz literatury [8], [9]. Na potrzeby analizy obliczono

szereg miar sprawności sieci ulicznej: praca przewozowa, stopień obciążenia sieci, średnia prędkość podróży, całkowity czas podróży w sieci ulicznej, miary topologiczne (dyspersja sieci, niedorozwój sieci), zużycie paliwa, kolejki pozostające, liczba przeciążonych skrzyżowań, straty czasu na wlotach, liczba zatrzymań, wydłużenie czasu podróży ponad warunki swobodne, średni i maksymalny czas podróży w sieci, średni i maksymalny koszt podróży w sieci. Obliczono ponadto wielkości emisji spalin (CO, CO₂, NO_x, HC), czyli miar o charakterze ekologicznym. W niniejszym referacie przedstawiono jedynie kilka przykładów zależności, które świadczą o znacznym wpływie zastosowanych układów skrzyżowań w sieci ulicznej na jej sprawność. Poniżej przedstawiono wielkości jednej z miar sprawności sieci ulicznej, jaką są straty czasu na wlotach na skrzyżowania. Wielkości strat czasu i pozostałych miar ruchowych obliczono przy pomocy pakietu SATURN, bazując na modelu symulacyjnym miasta. Zadana macierz ruchu proporcjonalnie zwiększano (od 0% do 100% w porównaniu ze stanem wyjściowym z krokiem co 25 %), używając sytuację, w której w sieci pojawiało się coraz więcej pojazdów, co z kolei rzutowało na stopniowe nasycanie sieci i powstawanie zatłoczenia. Wskutek wzrostu obciążenia sieci ruchem ulicznym pogarszają się warunki ruchu na skrzyżowaniach i rosną straty czasu. Wielkości strat czasu rosną w miarę wzrostu obciążenia sieci i największą wartość przyjmują w przypadku założonego, maksymalnego obciążenia, które reprezentuje macierz zadana, zwiększona proporcjonalnie o 100% (rys. 4). Wyraźne różnice występują również pomiędzy różnymi wariantami układów skrzyżowań. Największą dynamikę wzrostu strat czasu możemy zaobserwować dla sieci ulicznej ze skrzyżowaniami zwykłymi bez sygnalizacji świetlnej.

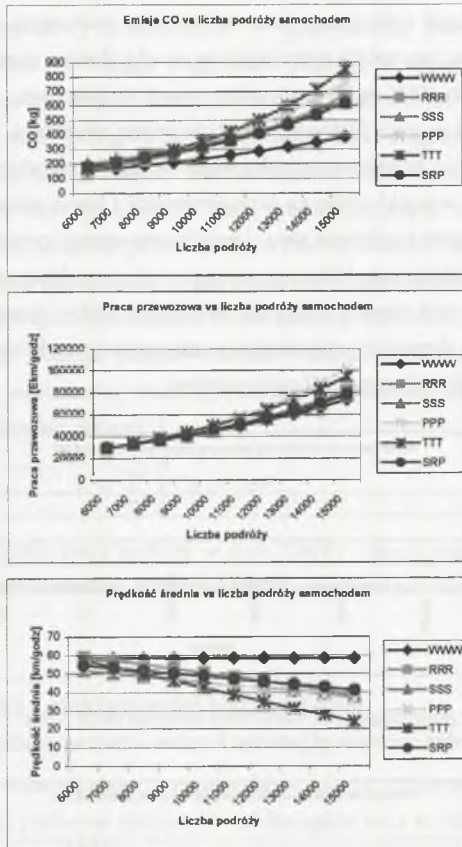


Rys. 3. Straty czasu w poszczególnych wariantach układów skrzyżowań – obciążenie minimalne
 Fig. 3. Delays in different scenarios of junction location – minimal loading



Rys. 4. Straty czasu w poszczególnych wariantach układów skrzyżowań – obciążenie maksymalne
 Fig. 4. Delays in different scenarios of junction location – maximal loading

Jak wspomniano powyżej, znaczny wpływ na sprawność sieci ulicznej ma jej obciążenie ruchem, które można przedstawić globalnie jako liczbę podróży odbywanych samochodem osobowym. Wzrost liczby podróży przyczynia się do pogorszenia warunków ruchu w sieci ulicznej, lecz w zależności od typu układów skrzyżowań sprawność sieci pogarsza się z różną dynamiką. W niniejszym referacie przedstawiono zmienność kilku miar dla godziny szczytu popołudniowego. Liczbę podróży przedstawiono w pojazdach umownych E (model potencjałów ruchotwórczych pojazdów ciężarowych przyjęto zgodnie z pozycją [4]).



Rys. 5. Wpływ liczby podróży samochodem w sieci na wybrane miary sprawności

Fig. 5. Influence of number of private car trips on some of efficiency parameters in the street network

Największą dynamikę pogarszania sprawności sieci ulicznej w przypadku wszystkich miar możemy zaobserwować dla układów skrzyżowań zwykłych bez sygnalizacji świetlnej. Najwolniej sprawność pogarsza się w przypadku zastosowania węzłów bezkolizyjnych, jednakże wariant

WWW jest wariantem teoretycznym, niemożliwym do zrealizowania w rzeczywistości ze względu na wysokie koszty. Na uwagę zasługuje układ sieci z wariantu SRP (tab. 1, rys. 2). W miarę wzrostu ruchu w sieci ulicznej w wariantcie tym miary sprawności wydają się być coraz bardziej korzystne w porównaniu do układów z innych wariantów.

W przypadku zmienności emisji CO i pracy przewozowej otrzymano model wykładniczy:

$$Y = \exp(a + b \cdot X) , \quad (5)$$

gdzie: Y – w zależności od modelu emisje CO, praca przewozowa, czas podróży, X – liczba podróży samochodem, a, b – współczynniki.

W przypadku zależności prędkości od liczby podróży w sieci otrzymano model liniowy:

$$Y = a + b \cdot X , \quad (6)$$

gdzie: Y – średnia prędkość pojazdów w sieci, X – liczba podróży samochodem, a, b – współczynniki.

We wszystkich przedstawionych modelach współczynnik R^2 przyjął wartość powyżej 80%, w większości przypadków powyżej 90%, natomiast współczynnik korelacji R w większości przypadków przyjął wartości od 0,950 – 0,999. Uzyskane wyniki świadczą zatem o silnych zależnościach statystycznych pomiędzy zmiennymi oraz trafności dopasowania uzyskanych modeli. W poniższej tabeli przedstawiono przykładowe wartości współczynników dla modelu odzwierciedlającego zależność pracy przewozowej od liczby podróży samochodem w sieci ulicznej.

Tabela 2
Współczynniki dla modelu zależności pracy przewozowej od liczby podróży w sieci oraz zgodność statystyczna

Wariant	a	b	R^2	R
WWW	9,714	9,93E-05	0,988	0,994
RRR	9,600	1,14E-04	0,993	0,996
SSS	9,663	1,06E-04	0,993	0,996
PPP	9,457	1,38E-04	0,990	0,995
TTT	9,527	1,29E-04	0,980	0,99
SRP	9,653	1,08E-04	0,992	0,996

5. Zakończenie

Przedstawione w niniejszym referacie analizy pokazały, iż istnieje związek pomiędzy typem skrzyżowań w sieci ulicznej a sprawnością jej funkcjonowania. W dalszych badaniach autor przeanalizuje siłę tego związku poprzez określenie wagi poszczególnych miar sprawności i stworzenie kompleksowej metody oceny efektywności sieci ulicznej. W tym celu, oprócz przedstawionych wariantów typów skrzyżowań w sieci, należy uwzględnić scenariusze rozwoju sieci, które wpłyną pozytywnie na jakość życia mieszkańców obszarów najbardziej zaludnionych, jakimi są obszary

centralne miasta. W dalszych badaniach autor uwzględni zatem konieczność uspokojenia ruchu w obszarze miasta oraz wyłączenia obszarów centralnych z ruchu samochodowego.

LITERATURA

1. Hensher D.A., Button K.J.: *Handbook of Transport Modelling*. Pergamon, UK 2000.
2. Goras E., Waltz A.: Metoda budowy baz danych o drogowym ruchu miejskim. *Zeszyty Naukowo-Techniczne oddziału SiTK w Krakowie*. Nr 7 (zeszyt 80). Kraków 2000.
3. Van Vliet D., Hall M.: *SATURN 9.3. user manual*. Leeds/Surrey 1997.
4. Dudek M.: *Współzależność struktury i funkcji sieci ulic miasta*. Praca doktorska. Politechnika Krakowska, 1998.
5. Podolski J.: *Transport w miastach*. WKiŁ, Warszawa 1985.
6. Suchorzewski W. i inni: *Planowanie systemów transportu w miastach*. Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, Warszawa 1992.
7. Suchorzewski W. i inni: *Raport o stanie komunikacji miejskiej w 2000 roku*. Warszawa 2000-2001.
8. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: *Inżynieria ruchu*. WKiŁ, Warszawa 1999.
9. Tracz M., Chodur J., Tarko A.: *Przepustowość skrzyżowań z sygnalizacją świetlną*. IGPIK, Warszawa 1992.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Rudnicki

Abstract

The paper concerns analysis of motorization development influence on private transport functionality in medium towns. Analysis were carried out with example of theoretical town with circular geometric configuration of street network. Author has attempted to justify thesis that the proper location of different junction type depending on distance from central area make the efficiency of private transport in street network better. There were presented initial results of intersection types influence in street network on some of functionality measures. However there will be considered the effect of traffic calming in the future analysis to make inhabitants quality of life better. The analysis will be continued to create a complex method of street network efficiency evaluation.