

CHALFEN Mieczysław, KAMIŃSKA Joanna

## WPLYW PARAMETRÓW OBWODNICY ŚRÓDMIEJSKIEJ NA GĘSTOŚĆ RUCHU SAMOCHODOWEGO

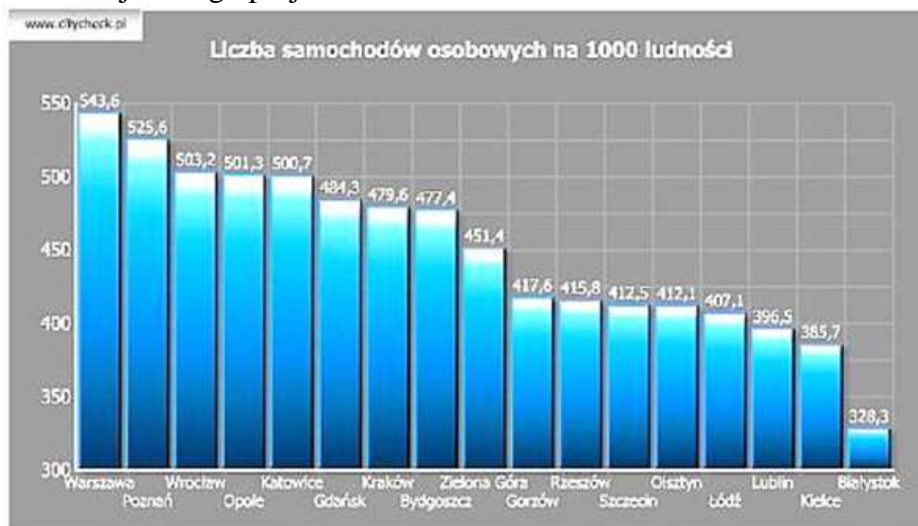
### Streszczenie

*W pracy wykorzystano matematyczny model ruchu samochodowego na terenie zurbanizowanym do wyznaczenia przestrzennego rozkładu gęstości ruchu. Założono zróżnicowane pole prędkości poruszania się pojazdów i niejednorodną sieć ulic w mieście. Do wyznaczenia najkrótszej w czasie trasy przejazdu w modelu zastosowano algorytm Dijkstry wyszukiwania najtańszej ścieżki w grafie reprezentującym układ ulic i skrzyżowań. Wyznaczone optymalne ze względu na czas przejazdu trasy zagregowano dla poszczególnych węzłów i krawędzi grafu otrzymując mapę gęstości ruchu. Opracowany model ruchu miejskiego zastosowano do analizy wpływu parametrów obwodnicy śródmiejskiej na średni i maksymalny czas przejazdu, średnią lokalną gęstość ruchu na terenie miasta oraz inne parametry ruchu. Uwzględniono promień obwodnicy oraz różne dopuszczalne prędkości poruszania się pojazdów na obwodnicy. Wybrano optymalną lokalizację obwodnicy ze względu na redukcję średniego czasu przejazdu.*

### WSTĘP

Dynamiczny rozwój cywilizacyjny nierozzerwalnie związany jest z szeroko rozumianym transportem. Wśród całego transportu drogowego w ujęciu liczby pojazdów gro stanowi transport indywidualny. Wskaźnik zmotoryzowania społeczeństwa polskiego wzrósł ze 160 w 1991 roku do 451 zarejestrowanych samochodów na 1000 mieszkańców w 2012 roku [3]. Oczywistym jest, że rozkład wartości wskaźnika nie jest równomierny na terenie całego kraju, a skoncentrowany jest głównie w aglomeracjach miejskich (rys.1.). Skutkuje to znacznym zagęszczeniem ruchu samochodowego w dużych miastach i co za tym idzie znacznym wydłużeniem czasu przejazdu od punktu startowego do punktu docelowego. Jedną z metod rozwiązywania problemu licznych zatorów ulicznych jest budowanie sieci dróg z dużą przepustowością umożliwiających szybkie przemieszczanie się między daleko położonymi od siebie punktami w mieście oraz wyłączenie z centrum miast ruchu tranzytowego. Rolę taką pełnią obwodnice miast, które można podzielić na: śródmiejskie, miejskie, pozamiejskie [4]. Ze względu na modelowanie ruchu pojazdów w obszarze miasta w dalszej części pracy rozważane będą obwodnice śródmiejskie oraz miejskie. Rozbudowa ich systemu napotyka niestety wiele trudności ekonomicznych, społecznych, urbanistycznych, czy planistycznych. W efekcie lokalizacja obwodnicy na obszarze miasta wynika z kompromisu pomiędzy wymienionymi czynnikami i ograniczeniami z jednej strony, a jej optymalnym położeniem ze względu na skrócenie czasu podróży z drugiej strony. Nie zmienia to potrzeby poszukiwań rozwiązań optymalnych, które poprzez czynniki ekonomiczne – skrócenie czasu przejazdu – zachęcałyby kierowców do korzystania z obwodnicy bez konieczności stosowania administracyjnych ograniczeń ruchu w ścisłym centrum miasta – płatne strefy, zakazy

wjazdu, itp. Takie ekonomiczne zachęty będą jednak skuteczne jedynie w przypadku optymalnej lub quasi optymalnej lokalizacji obwodnicy. W prezentowanej pracy przedstawiono zagadnienie optymalizacji położenia obwodnicy w aglomeracji miejskiej na podstawie minimalizacji czasu przejazdu przy założonych modelach ruchu (prędkości przejazdu) w mieście. Nie rozpatrywano technicznych, ekonomicznych i technologicznych możliwości realizacji takiego projektu.

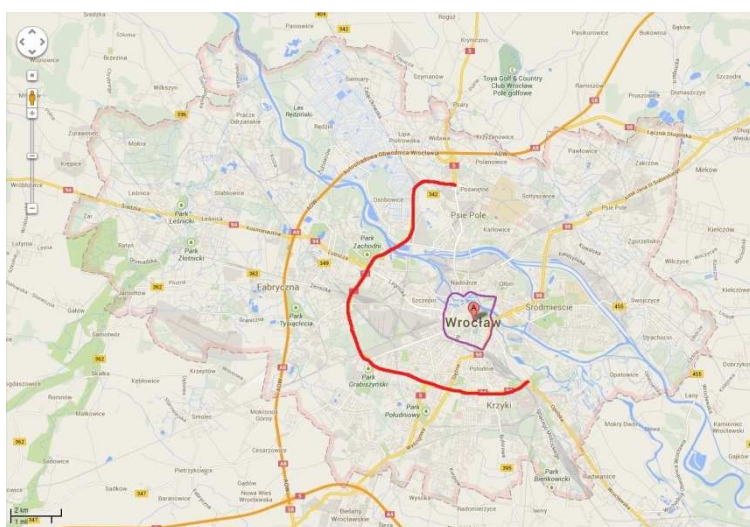


**Rys.1.** Wskaźnik zmotoryzowania w Polsce

**Źródło:** www.citycheck.pl

## 1. RZECZYWISTE OBWODNICE MIAST

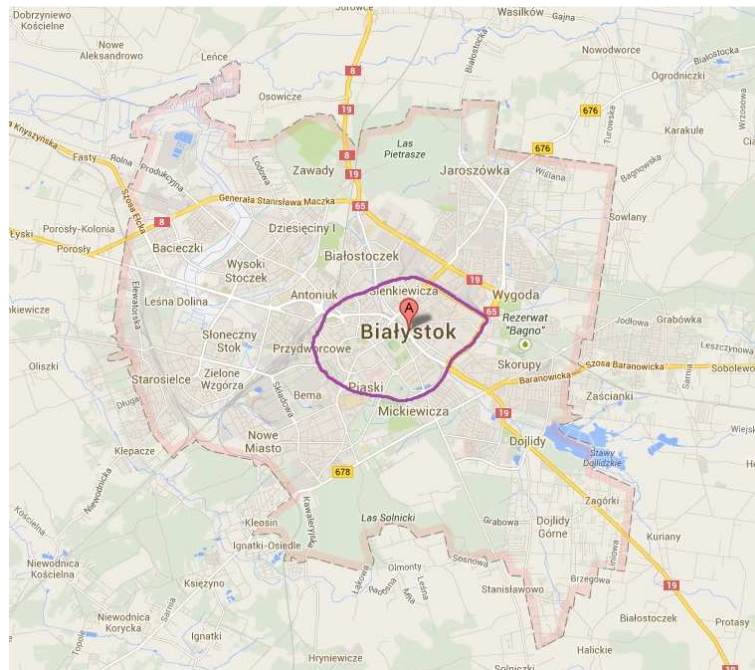
Coraz więcej polskich miast posiada obwodnice umożliwiające przemieszczanie się pojazdów w sposób bardziej płynny, a co za tym idzie redukującym czas przejazdu od startu do końca podróży. Jako przykład podać można Wrocław posiadający obwodnicę zarówno śródmiejską jak i miejską (rys.2.). Przy przeciętnym promieniu miasta (odległość od centrum do granic administracyjnych) wynoszącym ok. 8 km, odległość obwodnicy śródmiejskiej od centrum, umownie zwaną promieniem obwodnicy mimo, że obwodnica nie jest okręgiem a nawet linią zamkniętą, wynosi około 1 km, a miejskiej około 3,5 km.



**Rys.2.** Mapa Wrocławia z zaznaczoną obwodnicą śródmiejską (fioletowy) oraz miejską (czerwony)

**Źródło:** www.maps.google.pl

Innym przykładem miasta z obwodnicą śródmiejską jest Białystok (rys.3.). Średni promień miasta wynosi 5,5 km a odległość obwodnicy od jego centrum 1,5 km.



Rys.3. Mapa Białegostoku z zaznaczoną obwodnicą śródmiejską

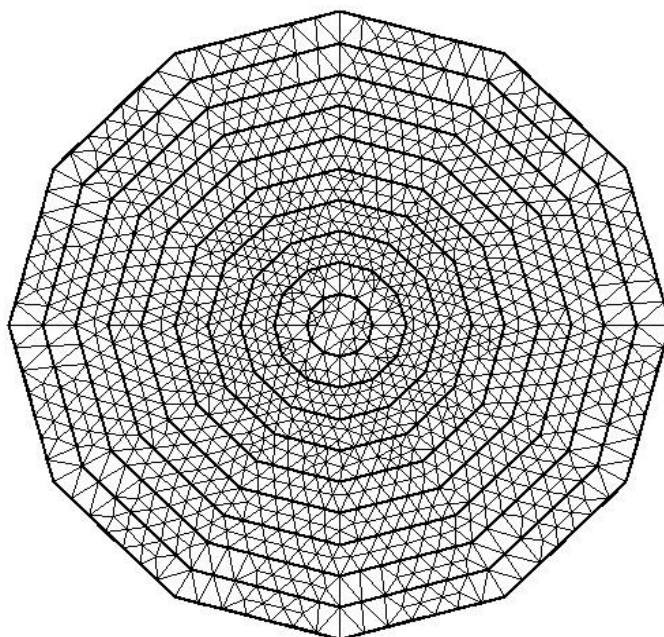
Źródło: [www.maps.google.pl](http://www.maps.google.pl)

Przedstawiona powyżej lokalizacja obwodnic była zapewne uwarunkowana możliwościami finansowymi i planistycznymi, a model opisywany w pracy pozwala zbadać, na ile ich położenie jest optymalne.

## 2. MODELOWANIE RUCHU MIEJSKIEGO

Obliczenia symulacyjne ruchu samochodowego wykonano na przykładzie hipotetycznego miasta średniej wielkości w kształcie koła o średnicy 20 km. Zróżnicowaną w obrębie miasta gęstość sieci ulic reprezentuje w modelu niejednorodna siatka trójkątów, zagęszczona w centrum miasta i rozrzedzona na jego peryferiach. (rys.4.) Z punktu widzenia stawianych w pracy celów (optymalna lokalizacja obwodnicy) nie jest istotny konkretny układ ulic charakterystyczny dla wybranego miasta, lecz jedynie gęstość sieci ulic. Takie podejście do modelowania pozwala uogólnić otrzymane rezultaty na miasta o zbliżonym kształcie i układzie komunikacyjnym.

W pracy analizowano miejski ruch samochodowy podczas porannego szczytu. Badano przejazdy odpowiednio dużej, dla założonej wielkości miasta, liczby pojazdów z domu (punkt startowy S) do pracy (punkt końcowy K) w dni powszednie. Punkty startowe i końcowe losowano eliminując te pary, dla których odległość była mniejsza niż 2 km. Założono, że lokalizacja punktów startowych S ma dwuwymiarowy rozkład normalny ze średnią w centrum miasta i odchyleniem standardowym wzdłuż osi OX i OY ( $\sigma_x = \sigma_y = 4,14 \text{ km}$ ), tak by przyjęty rozkład zbliżony był do jednostajnego. Taki rozkład charakteryzuje zbliżony do równomiernego rozkład gęstości zaludnienia z niewielkim wzrostem gęstości w centrum. Rozkład rozrzutu punktów docelowych K również przyjęto jako dwuwymiarowy normalny ze średnią w centralnej części miasta, z tym, że przyjęto mniejsze odchylenia ( $\sigma_x = \sigma_y = 3,34 \text{ km}$ ). W efekcie takich założeń otrzymano w wyniku losowania trasy przejazdu z terenu całego miasta głównie w kierunku centrum [1].



**Rys.4.** Sieć ulic hipotetycznego miasta

**Źródło:** opracowanie własne

Założono, że każdy kierowca w momencie rozpoczęcia podróży podejmuje decyzję o wyborze najszybszej (najkrótszej w czasie) trasy przejazdu i wie, którą taką optymalną trasą będzie. Zaplanowanej trasy nie zmienia mimo różnych losowych zdarzeń jakie może napotkać po drodze. Po założonej trasie pojazd porusza się z prędkością przyjętą w modelu, charakterystyczną dla poszczególnych regionów miasta.

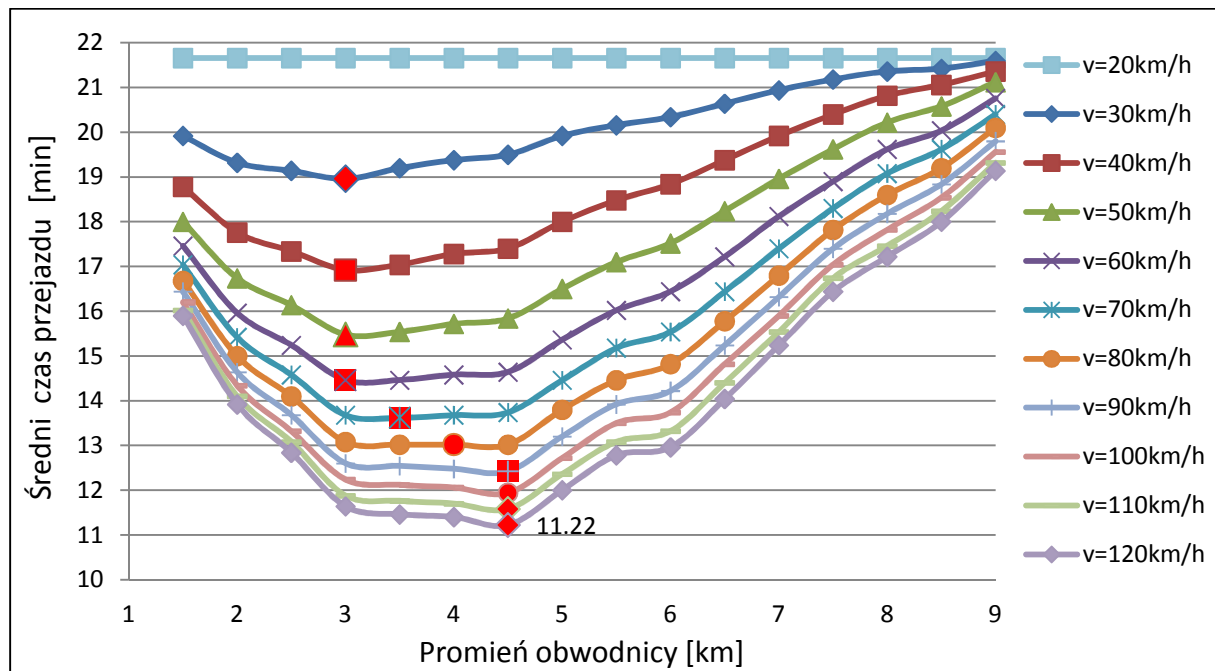
W prezentowanym modelu symulującym rzeczywiste postępowanie kierowców, do wyznaczenia tak zdefiniowanej trasy optymalnej wykorzystano algorytm Dijkstry wyszukiwania najtańszego (o najmniejszym koszcie) połączenia dwóch wierzchołków w grafie nieskierowanym. W modelu grafem jest sieć ulic, wierzchołkami - skrzyżowania, ramionami – odcinki ulic łączące skrzyżowania. Koszt połączenia dwóch sąsiadujących ze sobą wierzchołków to czas przejazdu wyznaczony przy założonych średnich rzeczywistych prędkościach poruszania się pojazdów. W tak zdefiniowanym zagadnieniu, algorytm Dijkstry [2] w sposób efektywny wyszukuje ścieżkę łączącą dwa dowolne punkty o najkrótszym czasie przejazdu. Gęstość ruchu wyrażono w procentach całkowitej liczby pojazdów poruszających się po mieście na kilometr długości drogi [%·km<sup>-1</sup>].

### **3. OPTIMALIZACJA POŁOŻENIA OBWODNICY DLA JEDNORODNEGO POLA PRĘDKOŚCI PRZEJAZDU W MIEŚCIE**

Opisany powyżej model ruchu samochodowego w mieście wykorzystano do wyznaczenia optymalnej lokalizacji obwodnicy śródmiejskiej. Badano przypadek, gdy miasto posiada tylko jedną obwodnicę. Przyjęto, że obwodnica zawsze jest okręgiem o środku w centrum miasta i zmiennym promieniu, czyli jest linią domkniętą, choć w praktyce nie zawsze tak jest – patrz rys.2. Założono jednorodne pole prędkości poruszania się pojazdów w mieście  $v=20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , oczywiście poza obwodnicą. Badano różne promienie obwodnicy: od 1,5 km do 9 km co 0,5 km. W każdym przypadku analizowano różne prędkości poruszania się pojazdów na obwodnicy: od  $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  do  $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Dla każdego wariantu obliczeń losowano 10000 pojazdów, wyznaczono dla każdego z nich najkrótszą w czasie trasę przejazdu, wyznaczono mapy gęstości ruchu i określono inne charakterystyki ruchu. Jako kryterium wyboru obwodnicy optymalnej wybrano najmniejszy średni czas przejazdu. Dla tak zdefiniowanego



kryterium dla każdej założonej prędkości poruszania się na obwodnicy wyznaczono jej promień optymalny, czyli taki, przy którym średni czas przejazdu jest najmniejszy (rys.5.).

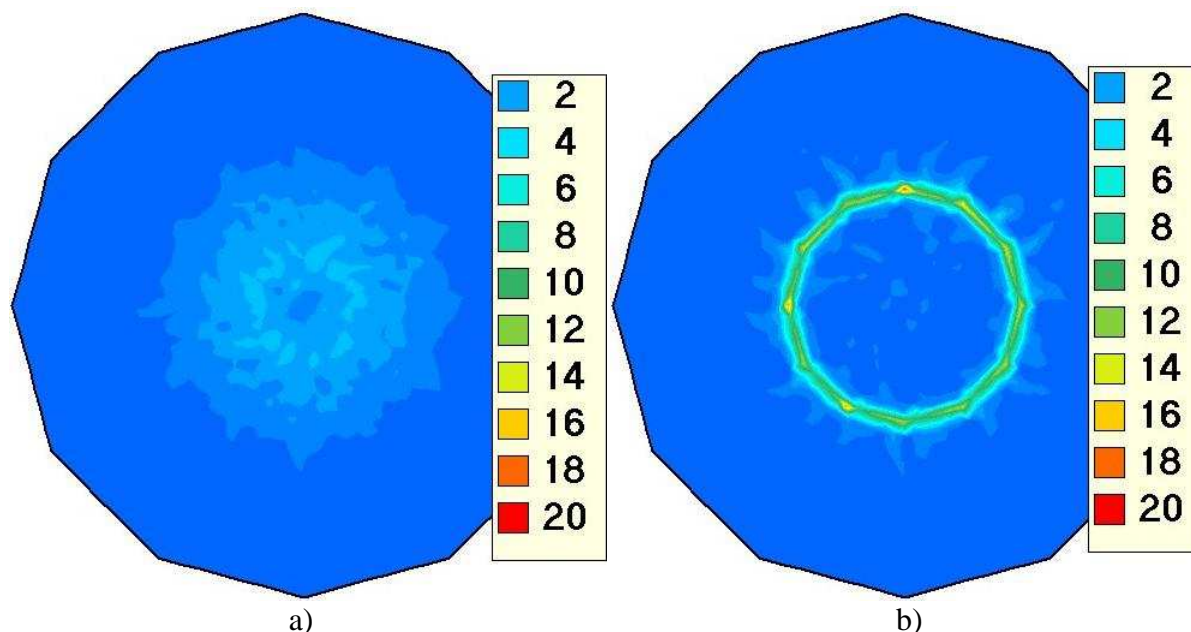


Rys.5. Średni czas przejazdu jako funkcja promienia obwodnicy

Źródło: opracowanie własne

Dla prędkości przejazdu na obwodnicy równej  $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , czyli równej prędkości przejazdu na pozostałym obszarze miasta, położenie takiej umownej obwodnicy, która de facto obwodnicą wówczas nie jest, nie ma znaczenia. Tak więc średni czas podróży w mieście bez obwodnicy wynosi  $t_{sr}=21,66 \text{ min}$  i wraz ze wzrostem rzeczywistej prędkości przejazdu na obwodnicy jej znaczenie w ruchu rośnie. Lokalne zwiększenie prędkości sprawia, że wiele tras optymalizujących czas przejazdu prowadzi przez obwodnicę w celu zmniejszenia czasu kosztem wydłużenia drogi (rys.6.). Do prędkości  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  optymalne położenie obwodnicy kształtuje się w odległości 3 km od centrum. Następnie wraz ze wzrostem rzeczywistej prędkości w celu optymalizacji - minimalizacji średniego czasu przejazdu - obwodnica powinna oddalać się od centrum do 4,5 km. Jednak w przedziale 3 - 4,5 km od centrum redukcja średniego czasu jest, dla każdej obwodnicy analizowanej oddzielnie, w zasadzie podobna. Różnice czasów średnich pomiędzy 3 a 4,5 km są do pominięcia. Można zatem spróbować uogólnić wniosek z przeprowadzonych symulacji podając, że optymalny promień obwodnicy powinien stanowić 30-45% promienia miasta. Oczywiście redukcja średniego czasu jest proporcjonalna do założonej prędkości na obwodnicy. Dla prędkości  $v=50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  czas średni zostaje zredukowany do 71% czasu bez obwodnicy, dla  $v=70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  zredukowany do 63%, a przy  $v=120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  prawie do połowy czasu początkowego. Warto też zwrócić uwagę na fakt, że odejście od optymalnego położenia obwodnicy znacznie pogarsza jej efektywność (rys.5.). Dla przykładu, przy założonej prędkości  $v=50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  obwodnica o zbyt małym promieniu  $r=1,5 \text{ km}$  redukuje średni czas tylko do 83% czasu początkowego. Z kolei zbyt duże oddalenie obwodnicy od centrum, np.  $r=8-9 \text{ km}$ , pozbawia obwodnicę jakiegokolwiek wpływu na zmniejszenie średniego czasu przejazdu liczonego dla całego miasta. Nie ulega zatem wątpliwości, że optymalna, lub prawie optymalna, lokalizacja obwodnicy korzystnie wpływa na skrócenie czasów przejazdu, z drugiej jednak strony pojawiają się rejony miasta o znacznie podwyższonej gęstości ruchu, czyli liczbie pojazdów na km biegnący ulicy. Na rys.6. przedstawiono mapy gęstości wyrażone w liczbie pojazdów na km ulicy w stosunku do

całkowitej liczby pojazdów w ruchu ( $\% \cdot \text{km}^{-1}$ ). W przeprowadzonych obliczeniach symulowano ruch 10000 pojazdów, stąd np. wartość 10 na poniższych mapach oznacza, że w danym punkcie miasta w określonym przedziale czasowym gęstość ruchu wyniosła 1000 pojazdów na km ulicy.



**Rys.6.** Mapa gęstości ruchu [ $\% \cdot \text{km}^{-1}$ ]

a) bez obwodnicy

b) dla obwodnicy optymalnej przy prędkości  $v=70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $r=3,5 \text{ km}$ .

**Źródło:** opracowanie własne

Na prezentowanym na rys.6 przykładzie widać, że bez obwodnicy gęstość ruchu w rejonie 3,5 km od centrum wynosiła 4-6  $\% \cdot \text{km}^{-1}$ , a z obwodnicą wzrosła lokalnie nawet do 20  $\% \cdot \text{km}^{-1}$ . Mamy zatem prawie czterokrotny wzrost gęstości na obwodnicy i trzeba ten fakt uwzględnić przy projektowaniu przepustowości obwodnicy śródmiejskiej. Z drugiej strony obserwuje się znaczny spadek gęstości ruchu w ścisłym centrum miasta.

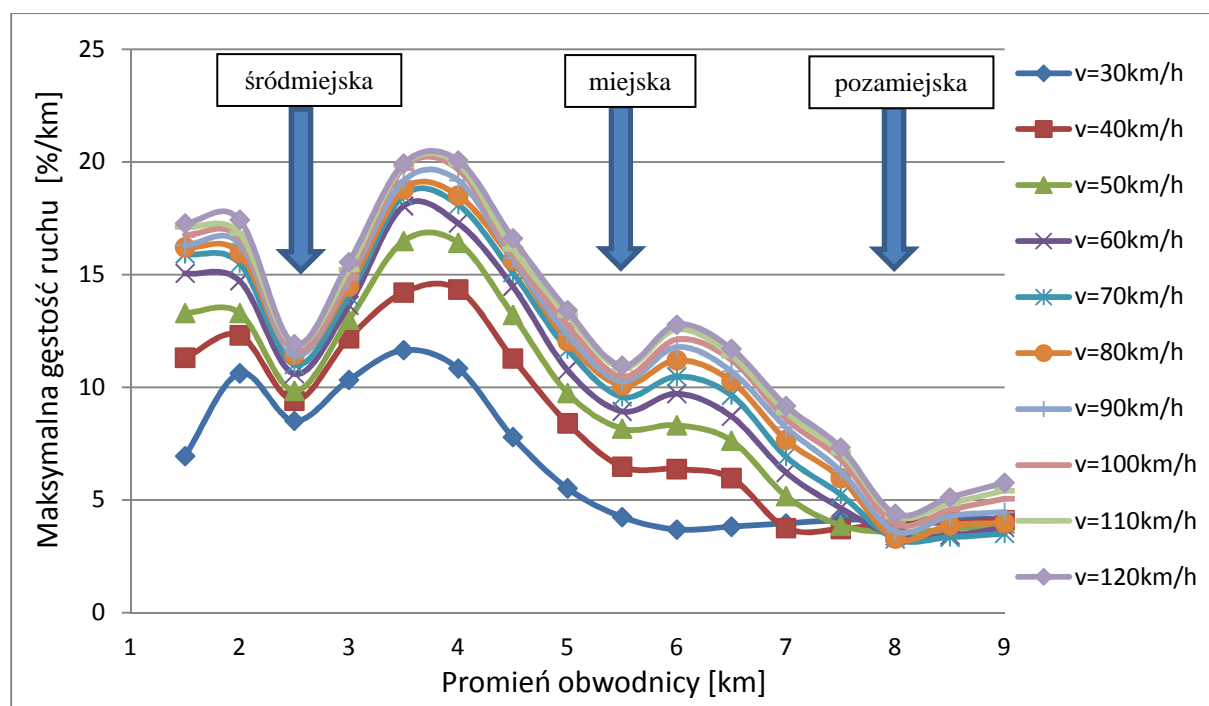
Zmiana parametrów obwodnicy, jej położenia i założonej prędkości przejazdu, skutkuje zmianą wszystkich parametrów ruchu w mieście (tab.1.).

**Tab.1.** Parametry ruchu dla obwodnic optymalnych

Prędkość na obwodnicy [ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ]	Optimalny promień obwodnicy [km]	Średni czas przejazdu [min]	Średnia długość przejazdu [km]	Średnia prędkość w całym mieście [ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ]	Maksymalna gęstość ruchu [ $\% \cdot \text{km}^{-1}$ ]
20	-	21,7	7,22	20,0	4,1
30	3	19,0	7,57	23,8	10,3
40	3	16,9	7,83	28,0	12,2
50	3	14,5	8,00	31,9	13,0
60	3	14,5	8,12	35,3	13,6
70	3,5	13,6	8,50	39,0	18,5
80	4	13,0	8,85	42,5	18,5
90	4,5	12,4	9,30	46,9	15,7
100	4,5	11,9	9,37	49,9	15,9
110	4,5	11,6	9,50	52,9	16,2
120	4,5	11,2	9,59	55,8	16,6

Wzrost prędkości przejazdu powoduje skrócenie średniego czasu przejazdu, nawet o 50%, wydłużając jednocześnie przebytą drogę między punktem startowym i końcowym, w skrajnym przypadku o 33%. Przy czym największą redukcję czasu zanotowano w przedziale 30-60 km·h<sup>-1</sup>, dalsze zwiększanie prędkości na obwodnicy skutkuje coraz wolniejszym spadkiem średniego czasu. Przeniesienie części ruchu na obwodnicę powoduje zwiększenie średniej prędkości ruchu w mieście jednak kosztem zwiększenia maksymalnej oraz średniej gęstości ruchu. Szczególnie jest to widoczne przy założonych prędkościach na obwodnicy w przedziale 70-80 km·h<sup>-1</sup>, dla których obserwujemy wyraźny, skokowy wzrost maksymalnej gęstości ruchu. Można stwierdzić, że najlepszym rozwiązaniem problemu wyboru optymalnej lokalizacji byłaby obwodnica o promieniu 3 km i założonej rzeczywistej prędkości poruszania się pojazdów  $v=60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Na podstawie zależności pomiędzy promieniem obwodnicy, a obliczoną maksymalną gęstością ruchu, zanotowaną zwykle na obwodnicy, określić można optymalne, ze względu na ograniczenie korków drogowych, położenie każdej z wymienionych rodzajów obwodnic w mieście (rys.7.).



Rys.7. Maksymalna gęstość ruchu jako funkcja promienia obwodnicy

Źródło: opracowanie własne

Wyraźnie zaznacza się obwodnica śródmiejska o promieniu 2,5 km oraz miejska w odległości 5,5 km od centrum. Odsunięcie obwodnicy o co najmniej 8 km od centrum nadaje jej charakter pozamiejskiej. Niestety, wyniki optymalizacji ze względu na zminimalizowanie maksymalnej gęstości ruchu są w wyraźnej sprzeczności z wynikami optymalizacji względem średniego czasu przejazdu. Ta ostatnia dawała najlepsze rezultaty dla promienia obwodnicy z przedziału 3-4,5 km, podczas gdy optymalizacja ze względu na gęstość ruchu akurat w tym przedziale daje wartości najgorsze, tzn. największe gęstości. W przyszłości należało by podjąć próbę wyznaczenia optymalnej lokalizacji obwodnicy uwzględniającej oba wyżej wymienione czynniki, zarówno średni czas przejazdu jak i gęstość ruchu, której zbyt duża wartość może zredukować założoną prędkość ruchu i w konsekwencji wydłużyć czas przejazdu.

## PODSUMOWANIE

Zagadnienie optymalizacji infrastruktury drogowej jest złożone, wielokryterialne oraz ograniczone sprzecznymi interesami różnych grup użytkowników. W prezentowanej pracy skoncentrowano się na obwodnicach oraz zależności pomiędzy ich parametrami: położeniem oraz prędkością przejazdu, a rozkładem gęstości ruchu samochodowego w mieście podczas porannego szczytu. Ze względu na modelowy charakter rozważań oraz makroskopowe podejście do zagadnienia nie analizowano ograniczeń związanych z praktyczną możliwością lokalizacji wskazanych arterii. Rozważono dwa kryteria optymalizacyjne do wyznaczenia parametrów obwodnicy: minimalizacja średniego czasu przejazdu od punktu startowego do końcowego oraz minimalizacja maksymalnej lokalnej gęstości ruchu. Każde z przyjętych kryteriów wskazało na inne optymalne położenie obwodnicy śródmiejskiej: 2,5 km oraz 3-4,5 km odpowiednio. Rezultat ten wskazuje na złożoność zjawiska i konieczność rozważenia w przyszłości modelu z uwzględnieniem optymalizacji wielowymiarowej obu czynników jednocześnie oraz procesu korkowania się odcinków dróg przy znaczącym wzroście gęstości ruchu na obwodnicy.

## BIBLIOGRAFIA

1. Chalfen M., Kamińska J., 2013. *Algorytm Dijkstry w modelowaniu samochodowego ruchu miejskiego*. Autobusy Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 3/2013 p. 1885-1893
2. Dijkstra E. W., 1959. *A note on two problems in connection with graphs*. In Numerische Mathematik, 1, s. 269–271.
3. [www.stat.gov.pl](http://www.stat.gov.pl)
4. Wyszomirski O. (red.). *Transport miejski. Ekonomia i organizacja*. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2008

## THE INFLUENCE OF INTERCITY RINGROAD'S PARAMETERS ON THE TRAFFIC DENSITY

### *Abstract*

*The paper uses mathematical model of traffic density within urban area in order to determine the spatial density of traffic. Diversified field of vehicles' velocity was assumed as well as heterogeneous street network within the city. Dijkstra's algorithm for searching the shortest path in graph representing the streets and crossings configuration was used in order to determine the shortest route as far as time is concerned. The optimal routes were aggregated for given nodes and graph's edges in order to draw traffic density map. The resulting model of urban traffic was used to analyze the influence of the parameters of the intercity ring-road on average and maximum travel time, average local traffic density within the city and other parameters of traffic. The road-ring radius as well as various acceptable speeds on the ring-road were taken into consideration. The optimal location of the ring-road was chosen in order to minimize the average time travel.*

### **Autorzy:**

dr **Mieczysław Chalfen** – Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Matematyki, 50-357 Wrocław, ul. Grunwaldzka 53, email: [mieczyslaw.chalfen@up.wroc.pl](mailto:mieczyslaw.chalfen@up.wroc.pl)

dr inż. **Joanna Kamińska** – Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Matematyki, 50-357 Wrocław, ul. Grunwaldzka 53, email: [joanna.kaminska@up.wroc.pl](mailto:joanna.kaminska@up.wroc.pl)