

## KONGESTIA A CZAS TRWANIA PODRÓŻY – PODEJŚCIE MODELOWE

W artykule przedstawiono model ruchu w mieście w 4 wariantach natężenia ruchu. Przeprowadzono dwugodzinne symulacje ruchu na sieci ulic miasta Wrocławia przy utrzymywanej w ruchu liczbie pojazdów 5, 10, 20 oraz 30 tysięcy. Analizowano wpływ liczby pojazdów w sieci drogowej na długość czasu postoju na światłach, jazdy z prędkością ograniczoną przez gęstość ruchu oraz jazdy z prędkością swobodną. Wykazano, że wraz ze wzrostem obciążenia sieci drogowej pojazdami w ruchu rośnie czas trwania przejazdu, a maleją średnia długość trasy i średnia prędkość. Zwiększenie liczby pojazdów w symulacji z 5 do 30 tysięcy skutkuje ponad trzykrotnym zwiększeniem średniego czasu, w którym prędkość poruszającego się pojazdu jest ograniczona przez gęstość ruchu. O 40% wzrósł czas oczekiwania na skrzyżowaniach w wariantcie maksymalnego natężenia w porównaniu z wariantem minimalnego ruchu, co oznacza, że nie sygnalizacja świetlna jest przyczyną powstających zatorów drogowych, ale gęstość ruchu wyrażona liczbą pojazdów na kilometr drogi.

### WSTĘP

Kierowcy spędzając czas w samochodach w drodze do i z pracy tracą czas ponosząc, w związku z tym, znaczne koszty. Na podstawie badań przeprowadzonych w 7 największych miastach Polski [5] oszacowano, że kierowcy tracili w korkach w 2015 r. 14,6 mln PLN dziennie, 321 mln PLN miesięcznie i ponad 3,8 mld PLN rocznie. W porównaniu z rokiem 2014 jest to wzrost kosztów aż o 12%.

Na poziomie mikroekonomicznym, koszt korków dla statystycznego kierowcy tych miast wzrósł aż o 18% i wynosił średnio 3 350 PLN rocznie w porównaniu z 2 848 PLN rocznie w 2014 r. W świetle tych faktów należy rozważyć, jakie znaczenie ma liczba pojazdów w mieście na czas przejazdu, a w szczególności na udziały procentowe w całkowitym czasie przejazdu: czasu postojów związanych ze znajdującą się na trasie sygnalizacją świetlną, czasem zredukowanej prędkości w związku z dużą gęstością ruchu oraz czasu jazdy swobodnej. W celu dokonania takiej analizy posłużono się modelem ruchu. Na rynku dostępne są liczne pakiety symulacyjne uwzględniające ruch pojazdów od skali mikro do makro. Jako najbardziej znany przykład można podać system symulacji przepływu ruchu drogowego VISSIM [4], którego główną wadą leży w kosztach zakupu i eksploatacji. W niniejszej pracy zastosowano autorski makroskopowy model ruchu w mieście oparty na teorii grafów oraz rachunku prawdopodobieństwa.

## 1. MODELOWANIE RUCHU

### 1.1. Opis modelu

Ruch samochodowy w mieście modelowano z zastosowaniem autorskiego, makroskopowego, ciągłego, deterministyczno-losowego modelu ruchu w mieście. Czas jest kwantowany dowolnie ustalonym krokiem czasowym  $\Delta t$ , położenie pojazdów na grafie opisane jest ruchem ciągłym. Model składa się z trzech zasadniczych modułów: sieć ulic, charakterystyka zachowania się pojazdu w ruchu, algorytm wyznaczania tras pojazdów. Sieć ulic reprezentowana jest w postaci grafu skierowanego. Węzły grafu odpowiadają skrzyżowaniom ulic lub ich punktom charakterystycznym takim jak łuki, zmiana liczby pasów itp. Każdy węzeł ma określoną nazwę, lokalizację we współrzędnych geograficznych oraz listę węzłów, z którymi jest bezpośrednio połączony. Łuki grafu odpowiadają odcinkom ulic. Każdy odcinek ma zdefiniowaną długość, liczbę pasów ruchu w każdym kierunku oraz

maksymalną dopuszczalną prędkość poruszania się po nim. Każdy pojazd w modelu ma określoną maksymalną prędkość poruszania się ( $t_{max}$ ), której nie może przekroczyć nawet gdy parametry drogi na to pozwalają. Założono, że każdy pojazd porusza się po odcinku drogi z maksymalną dopuszczalną przez model na tym odcinku prędkością.

- Algorytm modelowania ruchu zawiera następujące komponenty:
- określenie węzłów startowych i docelowych – mogą być podane jako identyfikator węzła lub losowane z zadaną i zmienną w czasie symulacji, dwuwymiarową funkcją gęstości,
  - wyznaczenie trajektorii ruchu każdego pojazdu od startu do celu według ustalonego kryterium (w przykładach – o najkrótszym czasie przejazdu) stosując algorytm Dijkstry [3] wyszukiwania najkrótszej ścieżki w grafie,
  - modelowanie zmiennej prędkości ruchu pojazdów podczas symulacji zgodnie z założoną zależnością prędkości od gęstości.

Prędkość przejazdu przez każdy odcinek ulicy uzależniona jest od aktualnej w chwili przejazdu gęstości ruchu na tym odcinku według zależności (1) oraz dopuszczalnej prędkości na odcinku drogi i dla samochodu.

$$v(k) \leq \frac{1}{k} \cdot \frac{3600}{E(T)} - \frac{3,6\bar{d}}{E(T)} \quad (1)$$

- gdzie:  $v(k)$  – prędkość [km/h],  
 $k$  – gęstość ruchu [poj/km],  
 $E(T)$  – wartość średnia zmiennej losowej opisującej odległość pomiędzy pojazdami wyrażoną w jednostkach czasu, w obliczeniach przyjęto  $E(T) = 2$  s,  
 $\bar{d}$  – średnia długość pojazdów, w symulacjach  $\bar{d} = 5$  m.

Pojazd przemieszcza się po wyznaczonej w chwili startu trajektorii ruchem ciągłym, tzn. obliczane jest miejsce, do którego pojazd dotrze w ustalonym odcinku czasu  $\Delta t$ .

### 1.2. Opis symulacji

Stosując opisany w 1.1. model przeprowadzono 4 dwugodzinne symulacje ruchu w mieście oznaczając je S0 – S3. W celu zapewnienia porównywalności wyników symulacji utworzono zbiór 100 tysięcy par punktów: start – meta, z którego pobierano pary do wyznaczania tras przejazdu. Podczas symulacji utrzymywano stałą liczbę pojazdów w ruchu. Po wyznaczeniu początkowych trajektorii, przy każdym

ukończeniu trasy przez pojazd wprowadzano do ruchu kolejny pobierając dla niego parę star – meta ze zbioru. Rozważano następujące symulacje:

- S0 – utrzymywano 5000 pojazdów w ruchu,
- S1 – w ruchu było 10 000 pojazdów,
- S2 – 20 000 pojazdów,
- S3 – 30 000 pojazdów.

Dla każdej symulacji zapisywano dla każdego pojazdu:

- $t$  [min] – czas przejazdu,
- $s$  [km] – długość trasy,
- $v$  [ $km \cdot h^{-1}$ ] – średnią prędkość pojazdu na całej trasie,
- $t_{ogr}$  [min] – czas kiedy pojazd jechał z prędkością wyznaczoną wg funkcji (1) czyli gęstość ruchu wymusiła redukcję prędkości w stosunku do dopuszczalnej na danym odcinku drogi,
- $t_{max}$  [min] – czas, kiedy pojazd poruszał się z maksymalną dopuszczalną na danym odcinku drogi prędkością,
- $t_{skrzyż}$  [min] – sumaryczny czas oczekiwania na skrzyżowaniach

## 2. WYNIKI SYMULACJI

Podstawowe statystyki dla każdego z wariantów obliczeń uwzględniające wszystkie ukończone w czasie trwania dwugodzinnej symulacji trasy.

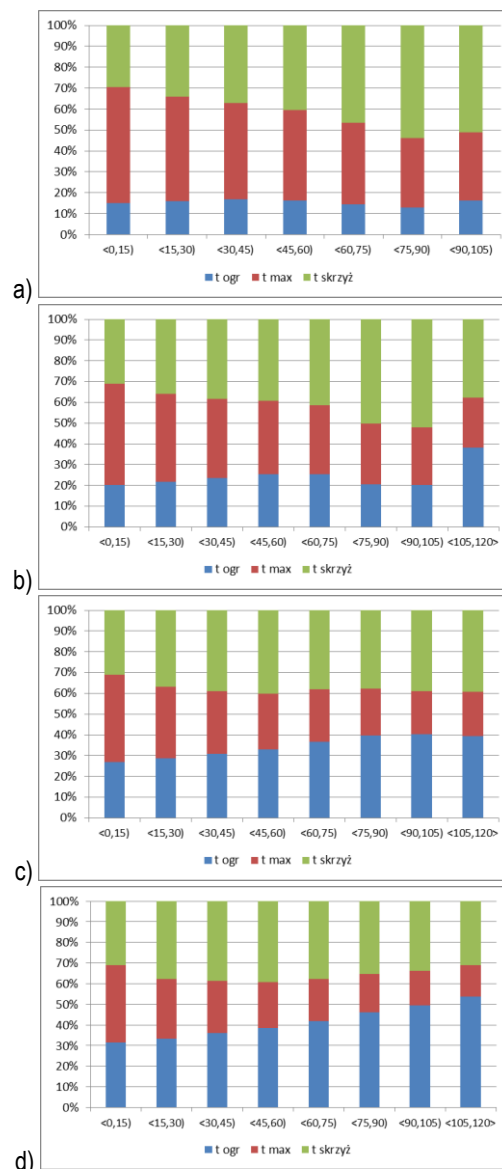
Tab. 1. Podstawowe statystyki symulowanych tras przejazdów

n	Wariant S0		Wariant S1		Wariant S2		Wariant S3	
	Średnia	Odch. stand.	Średnia	Odch. stand.	Średnia	Odch. stand.	Średnia	Odch. stand.
$t$ [min]	32,7	15,9	36,5	17,8	42,3	21,3	47,2	24,3
$s$ [km]	12,4	7,6	12,1	7,5	11,4	6,9	10,9	6,6
$v$ [ $kmh^{-1}$ ]	23,9	11,6	20,9	10,3	17,1	8,0	14,6	6,7
$t_{ogr}$ [min]	5,2	4,1	8,7	7,1	14,3	12,2	19,2	16,0
$t_{max}$ [min]	15,0	7,8	13,6	7,0	11,7	6,2	10,5	5,5
$t_{skrzyż}$ [min]	12,5	10,3	14,2	11,4	16,3	12,7	17,5	13,3

n – liczba ukończonych tras przejazdu

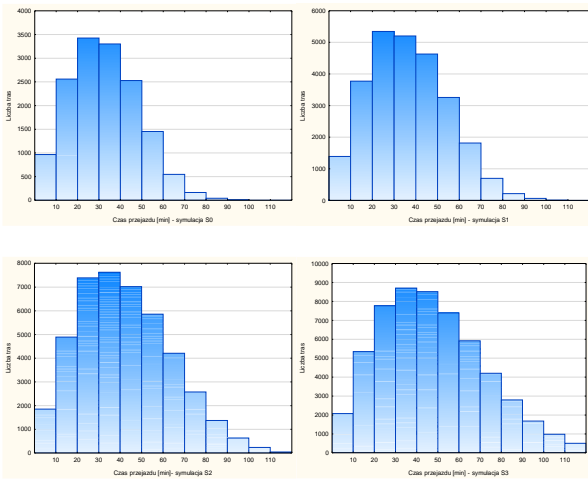
Wraz ze wzrostem obciążenia sieci drogowej pojazdami w ruchu średni czas trwania przejazdu rośnie od 33 do 47 min, czyli o ponad 40%. Maleje średnia prędkość z 23,9 do 14,6 km/h i co ciekawe, także średnia długość trasy od 12,4 do 10,9 km. Ta ostatnia obserwacja wynika z faktu, że, mówiąc kolokwialnie, przy małych prędkościach poruszania się w całym mieście kierowcom nie opłaca się nakładać drogi w poszukiwaniu objazdów. Zwiększenie liczby pojazdów w symulacji z 5 do 30 tysięcy skutkuje prawie czterokrotnym zwiększeniem średniego czasu, w którym prędkość poruszającego się pojazdu jest ograniczona gęstością ruchu. O 40% wzrósł czas oczekiwania na skrzyżowaniach w wariantcie S3 w porównaniu z S0 co oznacza, że nie sygnalizacja świetlna jest przyczyną powstających zatorów drogowych, a wzrastająca gęstość ruchu.

W celu graficznego przedstawienia procentowego podziału czasu przejazdu na omówione wyżej składowe, podzielono wszystkie zarejestrowane trasy na podzbiory według czasu trwania przejazdu co 15 minut i dla tych podzbiorów wyznaczono średnie czasy trwania składowych  $t_{ogr}$ ,  $t_{max}$ ,  $t_{skrzyż}$ . Rezultaty dla każdej symulacji przedstawiono na rysunku 1. Dla S0 odnotowano jedną trasę trającą dłużej niż 105 min i nie umieszczano jej na rysunku.



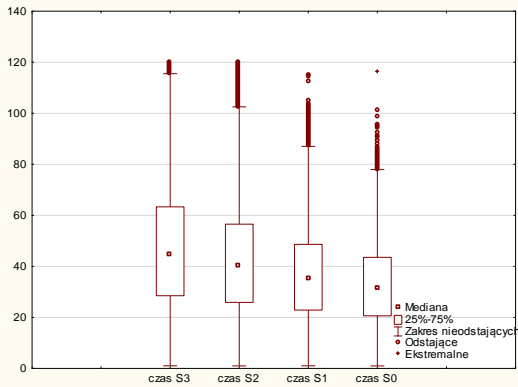
Rys. 1. Podział czasu trwania podróży na składowe zależne od prędkości dla a) S0, b) S1, c) S2, d) S3.

Dla najmniej obciążonego w wariantcie S0 grafu, wraz ze wzrostem czasu trwania przejazdu wyraźnie maleje udział czasu, gdy pojazd jechał z maksymalną dopuszczalną prędkością, jednocześnie rośnie udział czasu oczekiwania na skrzyżowaniach. Dla tras najkrótszych stanowi to 30%, a dla najdłuższych ponad połowę. Jest to logicznie uzasadnione. Im dłuższa trasa, tym więcej sygnalizacji świetlnych się na niej znajduje, a zatem zwiększa się udział czasu postoju w całkowitym czasie przejazdu. W wariantach S3 oraz S4 zauważalna jest dodatkowa tendencja wzrostu udziału czasu jazdy z prędkością ograniczoną gęstością ruchu kosztem udziału czasu jazdy swobodnej. Interesujące jest zjawisko procentowej niezależności udziału czasu oczekiwania na skrzyżowaniach od czasu trwania podróży przy największym zagęszczeniu pojazdów w symulacjach S2 i S3. Przy dużej gęstości ruchu wraz ze wzrostem czasu trwania podróży rośnie odsetek czasu poruszania się z prędkością ograniczoną kosztem czasu jazdy z prędkością swobodną (z 31% do 53%).



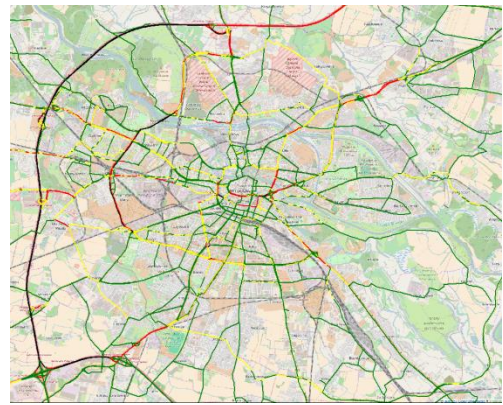
**Rys. 2.** Histogramy czasu trwania podróży dla wszystkich wariantów.

Wraz z rosnącą gęstością ruchu wydłuża się oczywiście czas przejazdu. Na przedstawionych na rysunku 2 histogramach widoczne jest przesuwanie się mody w stronę większych wartości. Wszystkie rozkłady empiryczne czasów trwania podróży cechuje skośność prawostronna ze współczynnikiem skośności od 0,39 dla wariantu S0 do 0,47 dla S3. Wykres pudełkowy przedstawiony na rysunku 3 wskazuje istniejące w każdym wariantcie wartości odstające, a dla wariantu S0 jedną ekstremalną. Trasa ta o długości 27,6 km prowadziła z położonego na południu węzła Bielany do osiedla Mirków zlokalizowanego na wylocie w kierunku Warszawy, czyli po przekątnej miasta. Czas przejazdu wynosił 116 min, z czego 93,5 min jazdy z prędkością ograniczoną przez gęstość ruchu, 15,0 min jazdy swobodnej i 7,5 min oczekiwania na skrzyżowaniach. Prędkość podróży na tej ekstremalnej trasie wyniosła 14,3 km/h.

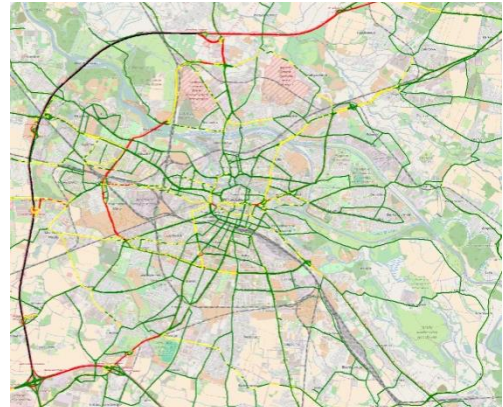


**Rys. 3.** Wykresy ramka-wąsy czasu trwania podróży dla wszystkich wariantów.

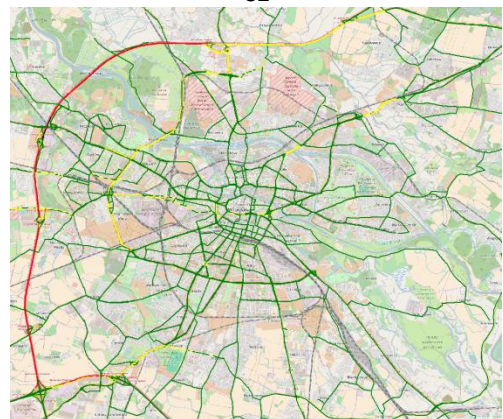
Wraz ze wzrostem liczby pojazdów rośnie obciążenie dróg. Na rysunku 4 przedstawiono obciążenie grafu wyznaczone jako liczba pojazdów, które w ciągu dwugodzinnej symulacji przejechały przez odcinek drogi. Wyraźnie zaznacza się obwodnica autostradowa AOW i to bez względu na symulowane natężenie ruchu. Dla wariantów S2 oraz S3 natężenie przekraczające 1000 poj/h odnotowano również na obwodnicy śródmiejskiej. Uznać zatem należy, że arterie te spełniają swoje zadanie obsługując znaczną część ruchu jednocześnie odciążając centrum miasta.



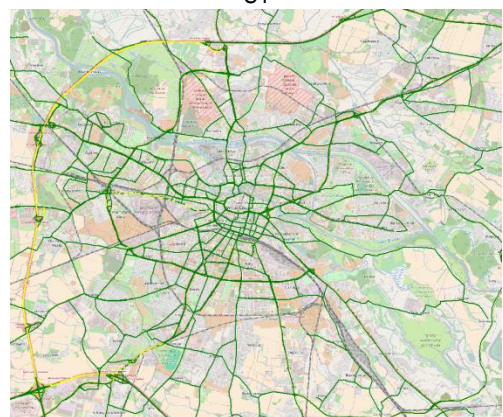
S3



S2



S1



S0

**Rys. 4.** Mapy sumarycznego obciążenia grafu. Kolor czarny powyżej 1500 poj/h, czerwony powyżej 1000, Żółty powyżej 500, pozostałe zielony.

## PODSUMOWANIE

Wraz ze wzrostem liczby pojazdów poruszających się po mieście, w podziale czasu podróży znaczenia nabiera czas spędzony w pojeździe poruszającym się z prędkością ograniczoną przez gęstość ruchu: od 31 do 57% czasu jazdy. Zmienia się udział czasu oczekiwania na skrzyżowaniach: od 46-71% dla wariantu S0 do 60-69% dla S3. Zwiększenie liczby pojazdów w ruchu powoduje zmniejszenie udziału czasu jazdy swobodnej na rzecz czasu jazdy z ograniczoną prędkością.

Sieć drogowa Wrocławia, w ujęciu makroskopowym, spełnia zadanie odciążenia centrum miasta poprzez częściową translokację ruchu na obwodnice: autostradową oraz śródmiejską.

## BIBLIOGRAFIA

1. Kamińska J., Chalfen M., *Wpływ bezpiecznej odległości między pojazdami na gęstość i prędkość ruchu*. Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 6/2016 p. 578-582,
2. Kamińska J., Chalfen M., 2016. *Wpływ rozkładu prawdopodobieństwa odległości między pojazdami na prędkość ruchu*. Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. 12/2016 p.635-639,
3. Dijkstra E. W., 1959. *A note on two problems in connection with graphs*. In NumerischeMathematik, 1, pp. 269–271,
4. Wiedemann R., *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Schriftenreihe des IfV, 8, 1974. Institut für Verkehrswesen. Universität Karlsruhe.
5. Raport o korkach w 7 największych miastach Polski Warszawa, Wrocław, Kraków, Poznań, Gdańsk, Łódź, Katowice. Deloitte

Targeo.pl <https://www2.deloitte.com/pl/pl/pages/public-sector/articles/korki-w-polskich-miastach.html>

### Congestion versus travel time – modelling approach

*The article presents 4 traffic modelling variants in the city in. Conducted a two-hour simulation of traffic in the city based of the road network of the city of Wrocław. The number of vehicles changed from 5 to 30 thousand. It was analyzed the influence of the number of vehicles on the road network on share time stop at traffic lights, driving at a speed limited by the density of traffic and driving at a free flow. It has been shown that with the increase of network load of road vehicles in traffic increases the duration of the journey, and decreases the average route length and average speed. Increasing the number of vehicles in the simulation of 5 to 30,000 results in an increase of over three times the meantime, wherein the speed of moving vehicle traffic density is limited. About 40% increase a waiting time at intersections in S3 variant in comparison with the S0 which means that no traffic lights is generating congestion but the density of traffic flow.*

Autorzy:

dr inż. **Joanna Kamińska** – Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Matematyki, joanna.kaminska@upwr.edu.pl

dr **Mieczysław Chalfen** – Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Matematyki, mieczyslaw.chalfen@upwr.edu.pl