

Model matematyczny przepływu ruchu ulicznego w skali makroskopowej

Ewa Abrahamowicz, Przemysław Orłowski

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313, Szczecin

Streszczenie: Modele matematyczne, będące uproszczoną reprezentacją zachodzących zjawisk, pozwalają na prognozowanie przyszłych stanów. Jest to szczególnie istotne w odniesieniu do problemu przeciążonej infrastruktury drogowej w obszarach miejskich oraz możliwości poprawy tej sytuacji przez zastosowanie inteligentnych algorytmów sterowania. Zaproponowany autorski, dyskretny, nieliniowy model matematyczny reprezentujący przepływ ruchu ulicznego w skali makroskopowej umożliwia przeprowadzenie testowania nowych rozwiązań sterowania przed ich wdrożeniem do realnego systemu. Badania symulacyjne, przeprowadzone z wykorzystaniem środowiska MATLAB, zostały wykonane w celu weryfikacji poprawności działania modelu. Obejmują one scenariusze wolnego przepływu pojazdów oraz blokowania się drogi. Wskazana została również możliwość rozbudowy modelu o złożone ciągi dróg oraz skrzyżowań.

Słowa kluczowe: model matematyczny, modelowanie makroskopowe, ruch uliczny, układ dyskretny, symulacja

1. Wprowadzenie

Transport i motoryzacja stanowią jedną z najszybciej rozwijających się gałęzi gospodarki. Ciągłe rosnąca liczba pojazdów na drogach oraz wzrastające potrzeby komunikacyjne społeczeństwa sprawiają, że istniejąca infrastruktura drogowa staje się przeciążona. Jest to szczególnie widoczne w obszarach miejskich, gdzie w tak zwanych godzinach szczytu obserwuje się powstawanie zatorów drogowych, potocznie nazywanych korkami. Jednym z podstawowych, negatywnych skutków występowania zatorów, bądź zbyt dużego zagęszczenia pojazdów, jest wydłużenie czasu podróży. Wpływa to nie tylko na frustrację kierowców czy pasażerów komunikacji miejskiej, ale także powoduje nadmierne zanieczyszczenie środowiska przez zwiększenie ilości spalin i hałasu [1–4]. Rozwiązanie powyższych problemów może stanowić rozbudowa istniejących ciągów komunikacyjnych o dodatkowe pasy ruchu lub ich całkowita modyfikacja. Jednak jest to rozwiązanie niezwykle kosztowne i bardzo często nierealne do wykonania ze względu na zagęszczenie urbanistyczne. Alternatywę stanowi rozwój algorytmów sterowania ruchem ulicznym [1–3].

Podstawowym narzędziem stosowanym do sterowania ruchem jest sygnalizacja świetlna. Wpływa ona na poprawę bezpieczeństwa, ułatwia wjazd na skrzyżowanie pojazdom znajdującym się na drogach podporządkowanych oraz pozwala na faworyzowanie

dróg o większym natężeniu ruchu. Jednak źle skoordynowana sygnalizacja może znacznie pogarszać płynność ruchu przez powodowanie dużej liczby zatrzymań, co może prowokować kierowców do łamania przepisów ruchu drogowego, a w konsekwencji prowadzić do sytuacji niebezpiecznych [5, 3]. Dlatego coraz częściej klasyczny, cykliczny system sterowania sygnalizacją świetlną zastępuje się systemem akomodacyjnym, współpracującym z urządzeniami monitorowania natężenia ruchu i/lub wykorzystującym inteligentne systemy zarządzające.

Inteligentne systemy transportowe ITS stanowią rozwiązania wykorzystujące w swojej strukturze zarówno technologie informatyczne, telekomunikacyjne, jak i elektronikę pojazdową. Celem stosowania ITS jest zwiększenie przepustowości istniejącej infrastruktury drogowej, poprawa bezpieczeństwa oraz ograniczenie emisji spalin i hałasu [6, 7]. Do istniejących wykorzystywanych systemów inteligentnego sterowania ruchem można zaliczyć m.in.: SCOOT, TRACS, SIGOP-U, RTOP [8].

Nieodłącznym elementem ITS jest system modelowania ruchu drogowego, który umożliwia przetestowanie nowych rozwiązań, sprawdzenie ich efektywności, niezawodności oraz rentowności przed wdrożeniem do realnego systemu sterowania ruchem ulicznym. Symulację przepływu drogowego można przeprowadzić dla dużej liczby scenariuszy zdarzeń i okoliczności, co pozwala na podjęcie pewnych decyzji. Celem działania systemu modelowania ruchu drogowego jest wytworzenie rzetelnej prognozy stanu ruchu ulicznego, przy zadanej geometrii dróg oraz wartościach przepływu [2–4, 9].

Modele przepływu można podzielić ze względu na skalę modelowania, gdzie głównie można wyróżnić podejście mikro- i makroskopowe. Modelowanie mikroskopowe polega na identyfikowaniu poszczególnych pojazdów, zachowania ich kierowców oraz interakcji pomiędzy innymi uczestnikami ruchu [9]. Podejście makroskopowe, zaprezentowane w pracach [1, 2, 10–12], nie wyróżnia poszczególnych pojazdów, lecz traktuje je jako strumień przepływu, opisywany za pomocą gęstości, natężenia

Autor korespondujący:

Ewa Abrahamowicz, eabrahamowicz@onet.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 05.06.2017 r., przyjęty do druku 24.07.2017 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

oraz prędkości. Zaburzenie pojedynczego parametru modelu makroskopowego ma wpływ na cały modelowany układ.

Rosnące w siłę problemy transportowe przedstawione w pierwszej części wprowadzenia oraz stale zwiększające się zapotrzebowanie komunikacyjne społeczeństwa stanowią niewątpliwą motywację autorów do podjęcia się pracy nad ulepszonym makroskopowym systemem modelowania ruchu drogowego. Dotychczas prezentowane modele [1, 2, 10–12] nie charakteryzują się w pełni wiernym odtworzeniem rzeczywistości. W modelach tych nie zostały uwzględnione ograniczenia wynikające z fizycznych aspektów drogi, tj. ograniczona gęstość pojazdów na skończonym odcinku lub maksymalna przepustowość. Brak hybrydowości proponowanych modeli skutkowało uzyskiwaniem nierzeczywistych, w tym ujemnych, wartości prędkości oraz gęstości pojazdów. Przedstawione modele nie realizowały także wstecznej propagacji pojazdów w przypadku zablokowanej drogi.

Celem niniejszej pracy jest opracowanie udoskonalonego modelu ruchu ulicznego w skali makroskopowej oraz przedstawienie stosowanego aparatu matematycznego. Stworzony przez autorów model został zainspirowany makroskopowym symulatorem METANET [2, 1]. Do tego modelu autorzy wprowadzili szereg modyfikacji omówionych w podpunkcie drugim. W finalnej części pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych na podstawie stworzonego modelu.

2. Model matematyczny

Zaproponowany poniżej deterministyczny, dyskretny model matematyczny o parametrach rozłożonych bazuje na podstawowych prawach fizyki: zachowania masy i zachowania pędu zaadaptowanych na potrzeby symulacji ruchu drogowego. Do stworzenia poniższego modelu wykorzystano wybrane zależności opublikowane wcześniej dla modelu METANET [1, 2, 12]. Przedstawiony przez autorów analityczny makroskopowy model może być użyty do opisu sieci drogowych. Ponadto zapewnia on rzetelną prognozę stanu ruchu ulicznego przy zachowaniu relatywnie niewielkich nakładów obliczeniowych.

W modelu zakłada się, że sieć drogowa składa się z M dróg. Każda z dróg m podzielona jest na N_m odcinków o długości L_m spełniającej następującą zależność:

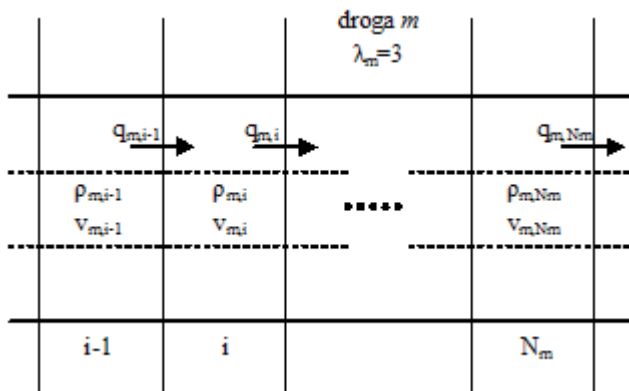
$$L_m > v_{free,m} T \quad (1)$$

gdzie:

m – numer analizowanej drogi,

$v_{free,m}$ – średnia prędkość wolnego przepływu drogi m [km/h],

T – okres dyskretyzacji [h].



Rys. 1. Schemat drogi zdyskretyzowanej

Fig. 1. Schematic diagram of discretized motorway link

Liczbę pasów ruchu każdej drogi określa wartość λ_m . Schemat poglądowy tak określonej drogi przedstawiony został na rysunku 1.

Każdy z i segmentów drogi m w dowolnej chwili k określony jest przez dwie zmienne stanu: gęstość $\rho_{m,i}(k)$ [poj./km/pas] oraz prędkość $v_{m,i}(k)$ [km/h]. Ponadto na podstawie zmiennych stanu wyznaczana jest dodatkowa wielkość określająca natężenie ruchu pojazdów $q_{m,i}(k)$ [poj./h] na danym odcinku drogi. Natężenie to definiowane jest w postaci:

$$q_{m,i}(k) = \rho_{m,i}(k) v_{m,i}(k) \lambda_m \quad (2)$$

Wartości powyższych zmiennych stanu mogą być wyznaczone w kolejnych chwilach czasu na podstawie dyskretnych, nieliniowych równań stanu. W oryginalnym zaproponowanym w niniejszej pracy modelu uwzględniono dodatkowo ograniczenia i nasycenia sygnałów. Dodane w zależności (3) warunki logiczne gwarantują, że wyznaczone gęstości pojazdów w poszczególnych segmentach drogi nie będą przyjmować wartości ujemnych oraz większych od gęstości maksymalnej, co prowadziło do niepoprawnych wyników podczas symulacji. Zmienna stanu $\rho_{m,i}$ w dowolnej chwili $k+1$ wyznaczana jest według następującego schematu:

$$\rho_{m,i}(k+1) = \begin{cases} \rho_{m,i}(k+1) & \text{dla } 0 \leq \rho_{m,i}(k+1) < \bar{\rho}_{m,i} \\ 0 & \text{dla } \rho_{m,i}(k+1) < 0 \\ \bar{\rho}_{m,i} & \text{dla } \rho_{m,i}(k+1) > \bar{\rho}_{m,i} \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:

$\bar{\rho}_{m,i}$ – maksymalna gęstość na i -tym segmencie drogi m ,
 $\rho_{m,i}(k+1)$ – pomocnicza wartość gęstości pojazdów wyznaczona zgodnie z zasadą przepływu bez uwzględnienia ograniczeń, określona zależnością:

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m \lambda_m} [q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k) + q_{m,i+1}(k)] \quad (4)$$

$q_{m,i}(k)$ – wielkość nadwyżki w bilansie przepływu, pojawiająca się po osiągnięciu maksymalnej gęstości pojazdów. W dowolnym segmencie drogi przyjmuje ona następującą postać:

$$q_{m,i}(k) = \frac{L_m \lambda_m}{T} [\rho_{m,i}(k+1) - \rho_{m,i}(k+1)] \quad (5)$$

Z równania (4) wynika, że wartość gęstości dowolnego i -tego segmentu m -tej drogi w kolejnym kroku czasowym jest aktualizowana z uwzględnieniem pojazdów wjeżdżających z segmentu poprzedniego $q_{m,i-1}(k)$, pojazdów wyjeżdżających do segmentu następnego $q_{m,i+1}(k)$, okresu dyskretyzacji T , parametrów drogi: L_m i λ_m oraz nadwyżki pojazdów $q_{m,i+1}(k)$ pojawiającej się w wyniku osiągnięcia maksymalnej gęstości w segmencie następnym. Zastosowanie autorskich zmiennych oraz zależności (4), (5) wprowadza do modelu mechanizm wstecznej propagacji nadwyżki pojazdów, który wykorzystany zostaje m.in. w przypadku powstawania zatoru drogowego. Innowacje te zapobiegają powstawaniu nierealizowalnych fizycznie wartości zmiennych stanu na danym skończonym odcinku drogi.

Druga zmienna stanu określająca średnią prędkość pojazdów na odcinku i drogi m w dowolnej chwili $k+1$ bazuje na prędkościach i gęstościach uzyskiwanych w poprzednim kroku czasowym oraz na wartości prędkości oczekiwanej, a wyrażana jest na podstawie wzoru:

$$v_{m,i}(k+1) = \begin{cases} v_{m,i}(k+1) & \text{dla } q_{m,i}(k+1) = 0 \\ 0 & \text{dla } q_{m,i}(k+1) > 0 \vee v_{m,i}(k+1) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

gdzie: $v_{m,i}(k+1)$ – pomocnicza wartość prędkości grupy pojazdów wyznaczona bez uwzględnienia ograniczeń w następujący sposób:

$$v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} [\vartheta_{m,i}(k) - v_{m,i}(k)] + \frac{T}{L_m} v_{m,i}(k) [v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)] - \frac{\gamma T}{\tau L_m} \frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \kappa} \quad (7)$$

gdzie γ [km²/h], κ [poj./km/pas] oraz τ [h] stanowią parametry modelu.

W równaniu (7) wyróżnić można trzy podstawowe bloki składowe:

$$\frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \kappa}$$

– człon korygujący prędkość uzyskiwaną w segmencie i w chwili $k+1$ w zależności od różnicy gęstości występującej między i -tym oraz kolejnym $i+1$ odcinkiem drogi w chwili k ,

$$v_{m,i}(k) [v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)]$$

– człon realizujący aktualizację prędkości w kolejnym momencie na podstawie różnicy prędkości w chwili k między poprzednim $i-1$ oraz i -tym segmentem drogi,

$$\vartheta_{m,i}(k) - v_{m,i}(k)$$

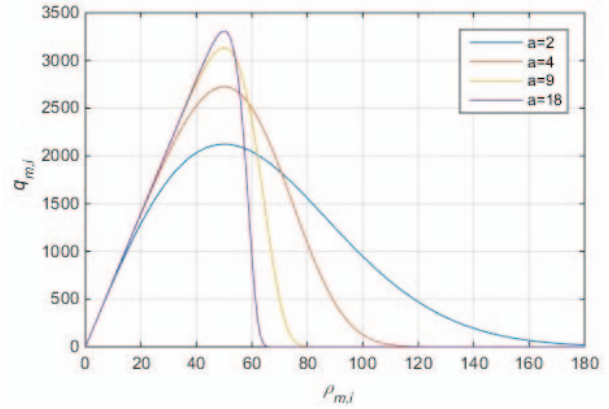
– człon korygujący prędkość $v_{m,i}(k+1)$ proporcjonalnie do różnicy między wartością teoretyczną prędkości $\vartheta_{m,i}(k)$ pojazdów, a prędkością rzeczywistą uzyskiwaną na danym odcinku drogi w chwili k . Prędkość $\vartheta_{m,i}(k)$ jest prędkością zależną od aktualnej wartości gęstości na i -tym segmencie i analogicznie do zależności (3) wyraża się wzorem:

$$\vartheta_{m,i}(k) = \begin{cases} v_{free,m} \exp\left(-\frac{1}{a_m} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{crit,m}}\right)^{a_m}\right) & \text{dla } \rho_{m,i} < \bar{\rho}_{m,i} \\ 0 & \text{dla } \rho_{m,i} \geq \bar{\rho}_{m,i} \end{cases} \quad (8)$$

W powyższym wyrażeniu a_m jest parametrem wykresu fundamentalnego, za to $\rho_{crit,m}$ określa gęstość, dla której osiągany przepływ jest największy. Wykres fundamentalny zaprezentowany został na rysunku 2.

Wzór (6) zapewnia zerowanie wartości prędkości $v_{m,i}$ w kolejnym kroku czasowym po wykryciu wystąpienia dodatniej wartości nadwyżki $q_{m,i}(k)$ na odcinku $i+1$, bądź wystąpienia negatywnych wartości prędkości pomocniczej. Ponadto wyznaczona wartość nadwyżki $q_{m,i+1}(k)$ wpływa na zwiększenie wartości zmiennej $q_{m,i}(k+1)$, zgodnie ze wzorem (4). Podobnie jak w przypadku zależności (3), nowatorskie warunki logiczne widoczne we wzorze (6) oraz nowe zmienne reprezentowane przez wzory (7), (8) wpływają na uzyskiwanie realnych wyników wartości prędkości pojazdów.

Ukazany na rysunku 2 wykres fundamentalny prezentuje zależność natężenia przepływu pojazdów od ich gęstości na danej drodze. W zależności od parametru a_m charakterystyka przyjmuje różny kształt, jednak niezależnie od tego parametru każdy wykres charakteryzuje zbiór takich samych cech. Dla małych gęstości pojazdy poruszają się z prawie maksymalną prędkością, która zmniejsza się wraz ze wzrostem zagęszczenia. Zależność ta nie wpływa jednak na zmniejszenie przepływu pojazdów. Dopiero po przekroczeniu wartości gęstości krytycznej $\rho_{crit,m}$ dalszy spadek prędkości powoduje redukcję natężenia przepływu, co w konsekwencji skutkuje całkowitym zablokowaniem drogi.



Rys. 2. Wykresy fundamentalne
Fig. 2. Fundamental diagrams

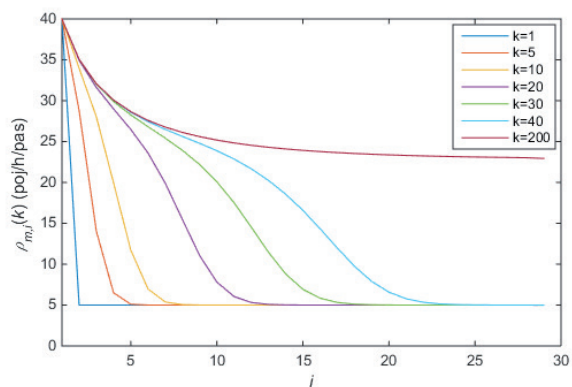
Zastosowanie powyższego autorskiego modelu pozwala zapobiegać zjawisku nadmiernego gromadzenia się pojazdów na danym odcinku drogi oraz powstawania nierzeczywistych przepustowości, co miało miejsce w przypadku stosowania bazowego symulatora zgodnie z opisem w pracach [2, 12].

3. Badania symulacyjne

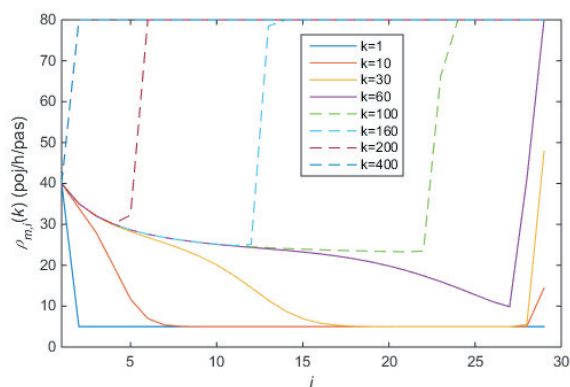
Celem badań jest przeprowadzenie symulacji numerycznej przepływu, co umożliwi weryfikację poprawności działania zaproponowanego modelu. Badania zostały przeprowadzone w środowisku obliczeniowym MATLAB na podstawie modelu matematycznego opisanego równaniami (2)–(8).

Przedmiotem analizy jest dwupasmowa droga jednokierunkowa ($m=1$, $\lambda_1=2$) zgodna ze schematem przedstawionym na rysunku 1. Droga ta podzielona została na 29 odcinków o długości $L_1=0,5$ km. Na potrzeby symulacji przyjęto następujące wartości parametrów modelu: $a_1=9$, $\tau=0,05$, $\gamma=17$, $\kappa=25$, gęstość krytyczna $\rho_{crit,1}=50$, gęstość maksymalna $\bar{\rho}_{1,i}=80$, dla $i=1, 2, \dots, 29$ prędkość wolnego przepływu $v_{free,1}=70$, okres próbkowania $T=0,003$. Do badań przyjęte zostały dwa scenariusze: scenariusz pierwszy zakłada wolny przepływ drogi, natomiast drugi symuluje brak wpływu z końcowego odcinka drogi. Dla obu scenariuszy przyjęto, że gęstość oraz prędkość pierwszego odcinka drogi wynoszą 40. Odpowiada to niustającemu zewnętrznemu napływowi pojazdów do analizowanej drogi. Dla kroku czasowego $k=1$, dla wszystkich pozostałych segmentów drogi $i=2, \dots, 29$ przyjęto gęstość pojazdów wynoszącą $\rho_{1,i}(1)=5$, natomiast ich prędkość równą $v_{1,i}(1)=30$.

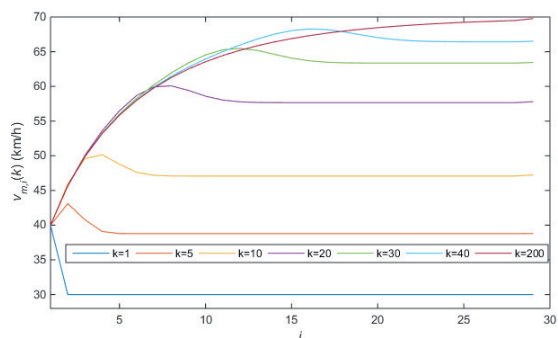
Na rysunkach 3–5 przedstawiono wartości gęstości, prędkości oraz natężenia przepływu pojazdów dla każdego segmentu drogi i w wybranych chwilach czasu k uzyskane podczas symulacji pierwszego scenariusza badań. Analiza rysunku 3 pozwala zauważyć stopniową propagację gęstości pojazdów na kolejne odcinki drogi m . W chwili $k=200$, dla odcinków o numerze porządkowym większym niż $i=10$, przy stałym napływie pojazdów, gęstość rozkłada się równomiernie, aż do końcowego odcinka drogi. Na rysunku 4 przedstawiającym prędkość grupy pojazdów można zaobserwować ciągle przyrost prędkości na każdym odcinku drogi m . W ostatnim kroku czasowym $k=200$ pojazdy znajdujące się w końcowych segmentach drogi uzyskują prędkość zbliżoną do prędkości wolnego przepływu, który dla analizowanego przypadku wynosi 70 km/h. Rysunek 5 prezentujący natężenie przepływu pojazdów, zgodnie ze wzorem (2), łączy ze sobą zależności ukazane na rysunkach 3 i 4. Widoczna jest na nim propagacja pojazdów na kolejne odcinki drogi, co wraz ze wzrostem prędkości pojazdów powoduje wzrost natężenia przepływu, który dla $k=200$ równy jest maksymalnej



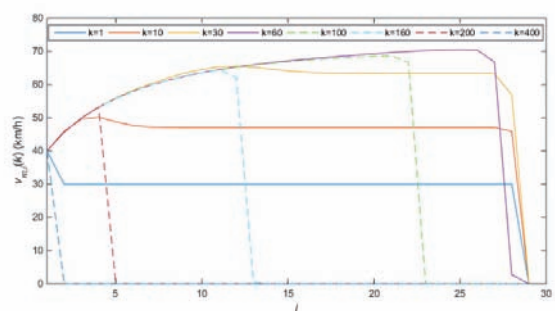
Rys. 3. Gęstości pojazdów w poszczególnych i segmentach drogi wygenerowane dla scenariusza wolnego przepływu
Fig. 3. Density of each segment i generated for a free flow case



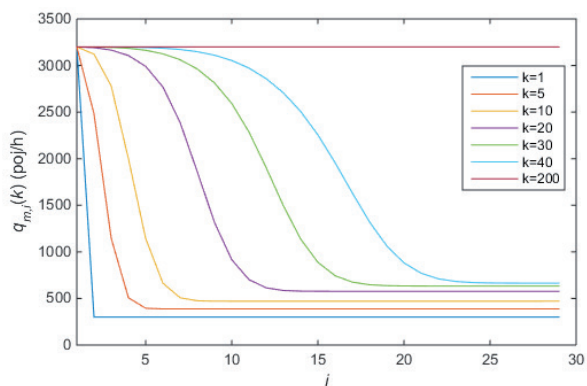
Rys. 6. Gęstości pojazdów w poszczególnych i segmentach drogi wygenerowane dla scenariusza braku wypływu
Fig. 6. Density of each segment i generated for a blocked road case



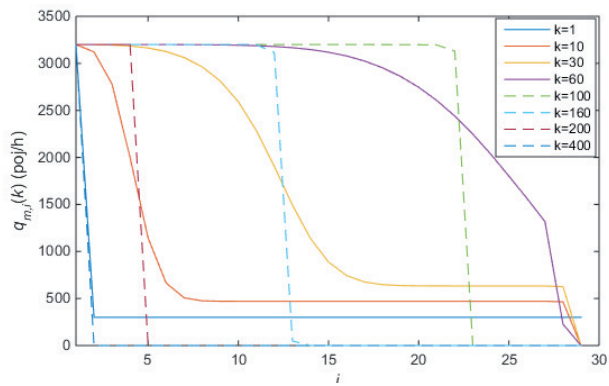
Rys. 4. Prędkość grupy pojazdów w poszczególnych i segmentach drogi wygenerowane dla scenariusza wolnego przepływu
Fig. 4. Speed of the vehicles group included in each segment i generated for a free flow case



Rys. 7. Prędkość grupy pojazdów w poszczególnych i segmentach drogi wygenerowane dla scenariusza braku wypływu
Fig. 7. Speed of the vehicles group included in each segment i generated for a blocked road case



Rys. 5. Natężenie przepływu pojazdów w poszczególnych i segmentach drogi wygenerowane dla scenariusza wolnego przepływu
Fig. 5. Traffic volume of flow for each segment i generated for a free flow case



Rys. 8. Natężenie przepływu pojazdów w poszczególnych i segmentach drogi wygenerowane dla scenariusza braku wypływu
Fig. 8. Traffic volume of flow for each segment i generated for a blocked road case

pojemności przepływu wynikającej z przebiegu wykresu fundamentalnego dla $a_m = 9$.

Na rysunkach 6–8 zaprezentowane zostały wyniki symulacji uzyskane dla drugiego analizowanego scenariusza realizującego blokowanie drogi poprzez brak wypływu pojazdów z końcowego segmentu $i = 29$. Na rysunku 6 widoczna jest propagacja gęstości pojazdów na kolejne odcinki drogi wraz ze wzrostem czasu. Od chwili $k = 10$ zauważyć można nasycenie

się liczby pojazdów w końcowych odcinkach drogi. W kolejnych momentach czasu w segmentach o coraz mniejszych numerach porządkowych i gęstość osiąga wartość maksymalną $\bar{\rho}_{1,1:29} = 80$. Analiza rysunku 7, prezentującego prędkość osiąganą przez grupę pojazdów na każdym odcinku drogi w wybranych chwilach czasu k , pozwala zauważyć przyrost prędkości w segmentach $i = 1, 2, \dots, 28$ dla $k \leq 60$. Pojazdy znajdujące się na końcowych odcinkach drogi, ze względu na brak możliwości

wypływu, osiągają zerową średnią prędkość grupową przemieszczenia. Zjawisko to, wraz ze wzrostem czasu, propaguje się wstecznie na pozostałe odcinki drogi prowadząc do powstania całkowitego zatoru. Opisane zjawiska potwierdza rysunek 8 reprezentujący natężenie przepływu pojazdów. W każdej chwili czasu końcowe odcinki drogi są blokowane, natężenie przepływu tych odcinków wynosi 0, a fenomen ten rozprzestrzenia się wstecznie wraz ze wzrostem wartości k .

4. Podsumowanie

Zaprezentowany w pracy dyskretny, nieliniowy model matematyczny umożliwia przeprowadzenie symulacji ruchu drogowego w skali makroskopowej. Przeprowadzona analiza literaturowa pozwoliła zidentyfikować słabe strony istniejących już modeli, co z kolei przyczyniło się do wprowadzenia szeregu ulepszeń, m.in. do zapobiegania uzyskiwaniu abstrakcyjnych wartości przepustowości dróg przy dużych gęstościach pojazdów. Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych potwierdzają poprawność działania modelu zarówno w warunkach swobodnego przepływu, jak i blokowania się dróg. W sytuacji wolnego przejazdu pojazdów zauważalna jest ich propagacja do kolejnych odcinków drogi oraz zwiększanie gęstości na poszczególnych segmentach pod wpływem ciągłego zewnętrznego napływu pojazdów. Wraz z upływem czasu pojazdy te zwiększają swoją prędkość, aż do uzyskania ustalonej prędkości maksymalnej. W warunkach braku ujścia pojazdów z końcowego odcinka drogi widoczne jest tworzenie się zatoru ulicznego propagującego wstecznie od odcinków o najwyższych numerach porządkowych. Zablokowanie drogi powoduje wyzerowanie prędkości przemieszczania oraz natężenia przepływu pojazdów. Uzyskane wyniki pokrywają się z założeniami przedstawionego wykresu fundamentalnego.

W kolejnych pracach planowana jest rozbudowa modelu o kolejne drogi i skrzyżowania. Ponadto zamiarem autorów jest symulacja sygnalizatorów świetlnych oraz identyfikacja parametrów modelu na podstawie rzeczywistego przepływu wybranej drogi.

Bibliografia

- Hegyí A., *Model predictive control for integrating traffic control measures*. PhD thesis, TRAIL Thesis Series T2004/2. Delft University of Technology, Netherlands, 2004.
- Kotsialos A., Papageorgiou M., Diakaki C., Pavlis Y., Michalopoulos F., *Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool METANET*. "IEEE Transactions on intelligent transportation systems", Vol. 3, No. 4, 2002, 282–292, DOI: 10.1109/TITS.2002.806804.
- Ziemska M., *Cele stosowania inteligentnych systemów transportowych i koordynowania sygnalizacji świetlnej*. „Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni”, Z. 29, 2014, 107–112, DOI: 10.12716/1002.29.10.
- Oskarbski J., Kuprewicz G., *Priorytety dla transportu zbiorowego z wykorzystaniem systemu sterowania ruchem*. „Logistyka”, Nr 3, 2014, 4878–4887.
- Topolska K., Topolski M., Błachut B., Haber M., Piekarcz A., *Zastosowanie fuzji klasyfikatorów rozmytych i genetycznych w zadaniu sterowania sygnalizacją świetlną*. „Biuletyn Naukowy Wrocławskiej Wyższej Szkoły Informatyki Stosowanej. Informatyka”, Vol. 2, 2012, 30–33.
- Krawiec S., Celiński I., *Alternatywny rozwój systemów obszarowego sterowania ruchem drogowym*. „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport”, Z. 73, 2010, 45–60.
- Marczak M., Kozłowski R., *Budowa inteligentnych systemów transportowych jako szansa dla zrównoważonego rozwoju regionów*. „Ekonomia i Zarządzanie”, Nr 2, 2014, 34–42, DOI: 10.12846/j.em.2014.02.03.
- Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa 2011.
- Benaich H., Pruyt E., *Exploring Traffic and Congestion Policies. An entity-based SD Approach*. 33rd International Conference of the SD Society, Cambridge 2015.
- Payne H., *Models of freeway traffic and control*. Simulation Council Proc., Vol. 1, 1971, 51–61.
- Papageorgiou M., *Dynamic modelling assignment, and route guidance in traffic networks*. Transportation Research. Part B: Methodological”, Vol. 24, Iss. 6, 1990, 471–495, DOI: 10.1016/0191-2615(90)90041-V.
- Messemmer A., Papageorgiou M., *METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks*. Traffic Engineering & Control., Vol. 31, Iss. 9, 1990, 466–470.

Mathematical Model of Traffic Flow in a Macroscopic Scale

Abstract: Mathematical models, which are a simplified representation of the phenomena, allow to predict future states. This is particularly important with regard to the problem of congested road infrastructure in urban areas and the possibility of improving this situation through the use of intelligent control algorithms. The proposed discrete, nonlinear mathematical model representing traffic flow on a macroscopic scale enables the testing of new control solutions prior to implementation to the real system. MATLAB simulations are performed to validate the model. These include scenarios of a free flow of vehicles and road blockages.

Keywords: mathematical model, macroscopic modelling, traffic flow, discrete-time system, simulation

inż. Ewa Abrahamowicz

eabrahamowicz@onet.pl

Studentka studiów magisterskich na kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Laureatka Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz sześciokrotna zdobywczyni stypendium Rektora ZUT dla najlepszych studentów. Aktualne zainteresowania naukowe obejmują układy dyskretne oraz układy niecałkowitego rzędu.



dr hab. inż. Przemysław Orłowski, prof. ZUT

przemyslaw.orlowski@zut.edu.pl

Profesor nadzwyczajny w Katedrze Sterownia i Pomiarów Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Główne kierunki badań naukowych to analiza i synteza układów sterowania, w szczególności układy dyskretne, układy niestacjonarne, układy nieliniowe i układy niepewne.

