

PRZEPUSTOWOŚĆ WLOTÓW NADRZĘDNYCH W MODELACH WYKORZYSTUJĄCYCH AUTOMATY KOMÓRKOWE

W artykule przedstawiono metodę obliczania przepustowości wlotów nadrzędnych w modelu ruchu wykorzystującym automat komórkowy. Sposoby obliczania przepustowości i warunków ruchu dla skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej określa instrukcja wydana przez Generalną Dyрекję Dróg Krajowych i Autostrad. Nie może zostać ona użyta w pewnych przypadkach, związanych szczególnie z blokowaniem strumienia pojazdów na wylotach skrzyżowania. Nie może być ona także wykorzystana dla zmiennych obciążeń ruchem. Zaproponowano użycie automatu komórkowego do modelowania skrzyżowań tego typu. Podstawowy model Nagela-Schreckenberga uzupełniono o zasady ruchu na skrzyżowaniach z pierwszeństwem przejazdu, możliwość uwzględnienia pojazdów ciężkich oraz procedury zachowania bezpiecznej odległości pomiędzy pojazdami. Przewidziano możliwość stosowania w modelu obiektów blokujących strumień pojazdów – na przykład przejść dla pieszych. Zaproponowano i szczegółowo omówiono sposób obliczenia przepustowości wlotów nadrzędnych skrzyżowań z pierwszeństwem przejazdu. Przygotowano i przetestowano uproszczony model małego, jednopasowego, czterowlotowego skrzyżowania bez sygnalizacji świetlnej. Przeprowadzono szereg symulacji, które pokazały podobieństwa i różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem obowiązującej procedury obliczeniowej oraz automatu komórkowego. Uzyskano dobrą zgodność z obowiązującą procedurą obliczeniową, szczególnie w zakresie średnich i małych obciążeń. Wyniki uzyskiwane z symulacji dla dużych obciążeń były mniejsze niż uzyskiwane zgodnie z obowiązującą instrukcją. Przetestowane elementy składowe po walidacji pozwolą na budowanie modeli skrzyżowań dowolnego rodzaju, nawet nietypowych oraz symulację sytuacji nieuwzględnionych w obowiązującej instrukcji obliczeniowej.

WSTĘP

Metoda obliczeniowa zawarta w instrukcji Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad umożliwia analizę większości rodzajów skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej [3]. Nie można jej jednak stosować podczas oceny warunków ruchu w przypadku jego chwilowych przeciążeń oraz dużej zmienności. Nie precyzuje sposobu obliczeń przepustowości oraz oceny warunków ruchu w przypadku wystąpienia dodatkowych strat czasu związanych z przejazdem przez skrzyżowanie tego typu lub tuż po jego opuszczeniu. W takich przypadkach zalecane jest wykorzystanie metod symulacyjnych.

Modele ruchu drogowego zbudowane w oparciu o automaty komórkowe należą do grupy mikroskopowych modeli ruchu. Wykorzystywane są także do symulacji ruchu na skrzyżowaniach [2].

Przedstawione w poprzednich pracach [8, 9] modele ruchu na rondzie jednopasowym oraz małym skrzyżowaniu jednopasowym zbudowano z wykorzystaniem automatu komórkowego. Są one próbą pokonania części ograniczeń związanych z zalecanymi metodami obliczeniowymi.

Jednym z parametrów wyznaczanych podczas obliczeń skrzyżowań i rond jest ich przepustowość. Proponowany model powinien umożliwić obliczenie przepustowości relacji, pasów, grupy pasów, wlotów oraz ewentualnie całego skrzyżowania. Prezentowany artykuł omawia sposób obliczeń przepustowości wlotów nadrzędnych skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej modelowanych z wykorzystaniem automatów komórkowych.

1. AUTOMAT KOMÓRKOWY W MODELOWANIU RUCHU DROGOWEGO

Coraz częściej do modelowania ruchu drogowego wykorzystuje się automaty komórkowe zaproponowane przez Nagela i Schreckenberga [4]. Pojawia się coraz więcej prób wykorzystania takich modeli do wyznaczania parametrów oraz warunków ruchu także na skrzyżowaniach. Stosunkowo proste modele są więc coraz bardziej komplikowane [1]. Proponowane są sposoby modelowania wpływu warunków pogodowych lub sterowania ruchem na strumień pojazdów [5, 6, 7].

Cechą charakterystyczną takiego automatu komórkowego jest zastąpienie ciągłego w czasie i przestrzeni ruchu pojazdu przez algorytm krokowy. Droga jest dzielona na odcinki o jednakowej długości 7,5 m. Jako mechanizm kontroli czasu stosuje się stały krok czasowy wynoszący 1 s. Reguły ruchu pojazdów implementowane w modelu wyrażają dążenie kierowcy każdego pojazdu do utrzymania maksymalnej dopuszczalnej prędkości. Zakładana jest odpowiedzialność każdego kierującego pojazdem, co wyraża się poprzez implementację algorytmu utrzymującego bezpieczny odstęp pomiędzy pojazdami [10]. Dodatkowo symuluje się wystąpienie nieprzewidzianych zdarzeń przez wymuszenie losowego zmniejszenia prędkości. Ponieważ prosty model wykorzystujący automat komórkowy jest modelem dyskretnym, o skokowej zmianie prędkości poruszania się pojazdów, losowe zmniejszanie prędkości umożliwia modelowanie strumieni pojazdów poruszających się z dowolnymi prędkościami średnimi [10].

Modelowany strumień pojazdów w skali makroskopowej opisywany jest przez trzy parametry:

- natężenie ruchu pojazdów,
- gęstość strumienia pojazdów,

– średnią prędkość ruchu pojazdów.

W ruchu jednorodnym parametry te łączy zależność zwana równaniem strumienia ruchu pojazdów [2]. Wstępne badania modelu ruchu strumienia pojazdów zbudowanego z wykorzystaniem automatu komórkowego pokazały, że przebiegi zależności pomiędzy tymi trzema parametrami uzyskane podczas badań symulacyjnych są zbliżone do przebiegów uzyskiwanych z badań [10]. Dodatkowo poprzez dobór prawdopodobieństwa zmniejszenia prędkości pojazdu możliwe jest kształtowanie tych przebiegów.

2. OBOWIĄZUJĄCY SPOSÓB OBLICZEŃ PRZEPUSTOWOŚCI SKRZYŻOWAŃ BEZ SYGNALIZACJI ŚWIETLNEJ

Obowiązująca instrukcja, przygotowana przez Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad, umożliwia obliczanie przepustowości typowych rodzajów skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej, na których manewry wykonywane są w sposób hierarchiczny, zgodnie ze znakami podporządkowania STOP oraz USTĄP PIERWSZEŃSTWA PRZEJAZDU [3].

Na skrzyżowaniach tego typu pojazdy strumieni podporządkowanych przecinają strumień pojazdów relacji nadrzędnych. Włączają się do ruchu wykorzystując odpowiednie przerwy w strumieniu (strumieniach) nadrzędnych. W opisach ruchu na takich skrzyżowaniach przeważają modele odstępów czasów pomiędzy pojazdami i ich akceptacji [2].

Obowiązującą instrukcją [3] wyróżnia i podaje sposób obliczenia przepustowości rzeczywistych: poszczególnych relacji, pasów ruchu, wlotu podporządkowanego oraz wlotu drogi z pierwszeństwem przejazdu. Przepustowość całego skrzyżowania wyznacza się w obliczeniach iteracyjnych i nie jest omówiona szczegółowo w instrukcji.

Przepustowość poszczególnych relacji podporządkowanych C_r zależy od natężenia relacji nadrzędnych (pojazdów, którym pojazdy relacji podporządkowanej muszą ustąpić pierwszeństwa przejazdu) oraz odstępów czasu między pojazdami niezbędnych do wykonania manewru. Dotyczy hipotetycznej sytuacji nasycenia pojazdami badanej relacji podporządkowanej. Wyznacza się je z wykorzystaniem wzoru:

$$C_r = \prod f \cdot \frac{3600}{t_f} \cdot e^{-X \cdot \frac{Q_n}{3600} \left(t_g - \frac{t_f}{2} \right)} \quad [\text{P/h}] \quad (1)$$

gdzie:

Q_n – natężenie nadrzędne na wlocie [P/h],

t_g – graniczny odstęp czasu [s],

t_f – odstęp czasu pomiędzy kolejnymi pojazdami z kolejki [s],

X – współczynnik zależny od obliczanej relacji podrzędnej [-],

f – współczynniki korygujące [-].

Przepustowość relacji nadrzędnych C_r (jazda na wprost i skręt w prawo z drogi nadrzędnej) zaleca się obliczać ze wzoru:

$$C_r = 1700 \cdot f_c \quad [\text{P/h}] \quad (2)$$

gdzie:

f_c – współczynnik uwzględniający wpływ struktury rodzajowej ruchu [-].

Widać wyraźnie, że w przypadku relacji nadrzędnych ich przepustowość zależy wyłącznie od struktury rodzajowej ruchu i nie uwzględnia się innych warunków geometryczno-ruchowych.

W przypadku, kiedy z jednego pasa ruchu korzysta więcej relacji, jego przepustowość C_j oblicza się ze wzoru:

$$C_j = \frac{I}{\sum \frac{m_r}{C_r}} \quad [\text{P/h}] \quad (3)$$

gdzie:

m_r – udziały poszczególnych relacji w ruchu na pasie j [-],

C_r – przepustowości poszczególnych relacji uczestniczących w ruchu na pasie j [P/h].

Gdy na wlocie podporządkowanym występują przynajmniej dwa pasy ruchu, jego przepustowość C_{wl} wyznacza się ze wzoru:

$$C_{wl} = \min_j \left\{ \frac{C_j}{m_j} \right\} \quad [\text{P/h}] \quad (4)$$

gdzie:

m_j – udziały poszczególnych pasów w ruchu na wlocie wl [-],

C_j – przepustowości poszczególnych pasów w ruchu na wlocie wl [P/h].

Oznacza to, że przepustowość wlotów odpowiada sytuacji, gdy w miarę wzrostu ruchu na jednym z pasów nastąpi stan nasycenia ruchem. Taki pas stanie się pasem krytycznym.

Obowiązująca instrukcja [3] podaje sposób obliczeń przepustowości skrzyżowań o trzech lub czterech wlotach. Umożliwia uwzględnienie szerokiego pasa dzielącego, poszerzeń pasów ruchu, wpływu przystanków autobusowych, sąsiednich skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, itp.

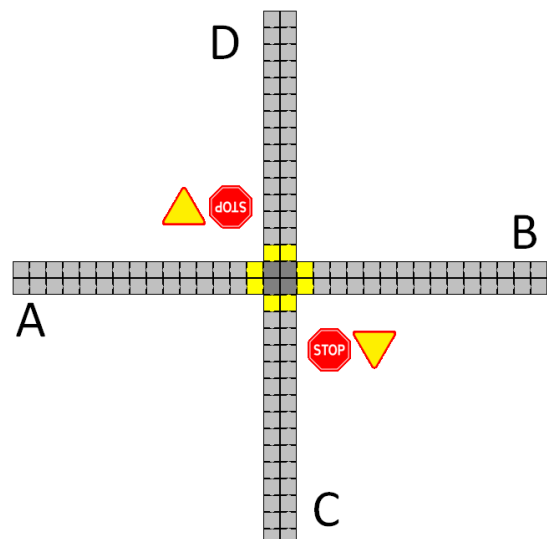
Sąsiedztwo skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, sterowanego przejazdu kolejowego oraz bardzo duże natężenia ruchu mogą dać wyniki odbiegające od rzeczywistości.

Instrukcja nie uwzględnia także zjawisk mogących spowodować utrudniony odpływ strumienia pojazdów z wylotu skrzyżowania, takich jak wpływ bliskiej sygnalizacji świetlnej, przejścia dla pieszych lub wjazdów intensywnie użytkowanych.

W takich przypadkach zaleca się stosować inne metody, na przykład symulacyjne.

3. MODEL MAŁEGO SKRZYŻOWANIA Z PIERWSZEŃSTWEM PRZEJAZDU

Na rysunku 1 przedstawiono typową strukturę modelu małego skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu. Siatka komórek składa się z czterech wlotów, czterech wylotów oraz obszaru jezdni skrzyżowania [8].



Rys. 1. Budowa modelu małego skrzyżowania

W komórkach wlotów i wylotów, przylegających do skrzyżowania właściwego, ulokowano przejścia dla pieszych oraz linie zatrzymań warunkowych dla wlotów podporządkowanych C i D. Zaimplementowano ruch pojazdów różnych kategorii (zajmujących dwie lub trzy komórki). Wprowadzono możliwość zdefiniowania prędkości dopuszczalnej oraz prawdopodobieństwa zdarzenia losowego (zahamowania) dla strumieni pojazdów poruszających się po poszczególnych wlotach i wylotach, ale bez rozróżnienia dla poszczególnych typów pojazdów. Aby umożliwić symulację niewielkich prędkości przejazdu pojazdów długich przez stosunkowo małe skrzyżowania, umożliwiono wybór prawdopodobieństwa zdarzenia losowego osobno dla poszczególnych typów pojazdów uczestniczących w ruchu. Dla modeli większych skrzyżowań przewidziano także możliwość wyboru maksymalnej prędkości przejazdu dla poszczególnych typów pojazdów.

Dla strumienia pojazdów zaimplementowano reguły umożliwiające jego bezkolizyjny ruch. Omówiono je szczegółowo w pracach [8,10]. Algorytm sterujący ruchem dobierał bezpieczną prędkość i odległość od pojazdu poprzedzającego. Dodatkowo sprawdzał maksymalną dopuszczalną prędkość na aktualnym pasie ruchu. Losowe zmniejszanie prędkości wybranych pojazdów symulowało nieprzewidziane sytuacje i zdarzenia. Ponadto algorytm realizował reguły dla pojazdów poszczególnych relacji wjeżdżających na i opuszczających skrzyżowanie, a wynikających z przepisów oraz organizacji ruchu drogowego na symulowanym skrzyżowaniu. Reguły te omówiono ogólnie w pracy [8].

4. ORGANIZACJA MODELU SYMULACYJNEGO

Analiza rodzajów obliczanych przepustowości pokazuje wyraźnie, jakie wyniki obliczeń powinny być możliwe do uzyskania w przypadku proponowanego modelu wykorzystującego automat komórkowy. Organizacja modelu powinna pozwalać na wielokrotne obliczenia i zapamiętywanie ich wyników, ponieważ konieczna jest ich dodatkowa analiza, służąca znajdowaniu stanów nasycenia dla różnych elementów. Model umożliwiał wyznaczenie przepustowości relacji, pasów, wlotów oraz całego skrzyżowania dzięki stopniowemu zwiększaniu liczby pojazdów generowanych dla badanego elementu, aż do osiągnięcia jego stanu nasycenia. Uzyskane wyniki pozwalają także na wskazanie elementu krytycznego i obliczenie rezerwy przepustowości. Model umożliwia wyznaczenie parametrów identycznych z parametrami uzyskiwanymi podczas obliczeń zgodnie z zalecaną metodą obliczeniową. Dodatkową zaletą modelu jest możliwość prostej wizualizacji zachowania poszczególnych pojazdów.

5. PRZYKŁADOWE WYNIKI SYMULACJI

Wykorzystując przygotowany model ruchu na małym skrzyżowaniu, przeprowadzono badania sposobu wyznaczania przepustowości na jego wlotach nadrzędnych. Uzyskane wyniki porównywano z wynikami uzyskiwanymi dzięki metodzie obliczeniowej zawartej w obowiązującej instrukcji [3].

5.1. Przepustowość relacji nadrzędnych

Przeprowadzono symulacje, w których zwiększano ilość generowanych pojazdów dla relacji pierwszego rzędu: AW oraz AP, aż do osiągnięcia stanu jej nasycenia. Maksymalna liczba pojazdów, które wjechały na skrzyżowanie, była jednocześnie przepustowością badanej relacji.

W przypadku jazdy na wprost dla wlotu nadrzędnego (relacja AW) nie zmniejszano prędkości przejazdu przez skrzyżowanie, natomiast w przypadku skrętu w prawo z wlotu nadrzędnego (relacja AP) dopuszczalna prędkość ruchu na jezdni skrzyżowania włą-

ściwego wynosiła 1 komórka/s (ze względu na mały promień skrętu wynikający z wielkości skrzyżowania). Dodatkowo implementowano regułę, że pojazd dłuższy (zajmujący dwie lub trzy komórki) nie zwiększa prędkości powyżej dopuszczalnej, dopóki całkowicie nie opuści skrzyżowania (nie znajdzie się na wylocie). Symulacje przeprowadzono dla różnych prawdopodobieństw zdarzenia losowego. Ze względu na stochastyczny charakter modelu przeprowadzono wiele prób, a jako wynik przyjmowano wartość średnią. Przykładowe wyniki symulacji pokazano w tabelach 1 i 2.

Tab. 1. Przepustowość relacji nadrzędnej AW (na wprost) [P/h]

| V _{max} | [kom/s] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---------|------|------|------|-------|-------|
| | [m/s] | 7,5 | 15,0 | 22,5 | 30,0 | 37,5 |
| | [km/h] | 27,0 | 54,0 | 81,0 | 108,0 | 135,0 |
| Prawdopodobieństwo zdarzenia losowego [%] | 0 | 1800 | 2400 | 2700 | 2880 | 3000 |
| | 1 | 1626 | 2159 | 2486 | 2643 | 2578 |
| | 2 | 1451 | 1990 | 2181 | 2243 | 2214 |
| | 3 | 1334 | 1629 | 1946 | 2132 | 2134 |
| | 4 | 1218 | 1689 | 1842 | 1685 | 1642 |
| | 5 | 1073 | 1369 | 1531 | 1536 | 1275 |
| | 10 | 559 | 706 | 912 | 700 | 682 |
| | 20 | 234 | 294 | 296 | 205 | 227 |
| | 40 | 25 | 45 | 42 | 32 | 50 |

Przyjęte do symulacji prędkości maksymalne jazdy na wlotach i wylotach oraz przejazdu na wprost wzdłuż nadrzędnej osi skrzyżowania mogą odpowiadać następującym drogom:

1. w strefie zamieszkania,
2. w terenie zabudowanym,
3. poza terenem zabudowanym,
4. szybkiego ruchu (wielopasowym),
5. autostradom.

Analizując wyniki zawarte w tabeli 1 można zauważyć następujące prawidłowości. W przypadku modelu deterministycznego (braku możliwości zajścia zdarzenia losowego) uzyskane wyniki przepustowości dla relacji na wprost (bez zmniejszania prędkości pojazdów) oraz na odcinku wlotu i wylotu nadrzędnych są zdecydowanie zawyżone w stosunku do przepustowości określanych przez obowiązującą instrukcję (wiersz tabeli zaznaczony jasnoczerwonym tłem). Zgodnie z obowiązującą instrukcją [3] i wzorem (2) przepustowość relacji nadrzędnej może wynosić maksymalnie 1700 P/h. W przypadku odcinków dróg zgodnie z metodą HCM-2000 [2], ich przepustowość może wynosić maksymalnie: 1600-1700 P/h dla dróg dwukierunkowych dwupasowych; 2200 P/h dla dróg wielopasowych i 2400 P/h dla autostrad. Ale już w przypadku wystąpienia stosunkowo niewielkiego prawdopodobieństwa zdarzeń losowych (wynoszącego kilka procent) uzyskiwane przepustowości są zgodne z obowiązującymi instrukcjami (zawyżone wartości zaznaczono w tabeli żółtym tłem). Zwiększenie prawdopodobieństwa zajścia zdarzeń losowych wyraźnie zmniejsza przepustowość, symulując trudności w przejeździe przez skrzyżowanie z dopuszczalną prędkością na wprost.

Tab. 2. Przepustowość relacji nadrzędnej AP (w prawo) [P/h]

| V _{max} | [kom/s] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---------|------|------|------|-------|-------|
| | [m/s] | 7,5 | 15,0 | 22,5 | 30,0 | 37,5 |
| | [km/h] | 27,0 | 54,0 | 81,0 | 108,0 | 135,0 |
| Prawdopodobieństwo zdarzenia losowego [%] | 0 | 1800 | 1800 | 1800 | 1800 | 1800 |
| | 1 | 1603 | 1652 | 1677 | 1628 | 1576 |
| | 2 | 1493 | 1543 | 1461 | 1489 | 1497 |
| | 3 | 1304 | 1411 | 1409 | 1376 | 1390 |
| | 4 | 1241 | 1226 | 1232 | 1266 | 1158 |
| | 5 | 1111 | 1206 | 1042 | 1118 | 1157 |
| | 10 | 687 | 760 | 750 | 579 | 665 |
| | 20 | 269 | 272 | 297 | 248 | 261 |
| | 40 | 51 | 63 | 50 | 62 | 49 |

Analizując wyniki zawarte w tabeli 2 można zauważyć następujące prawidłowości. W przypadku modelu deterministycznego (braku możliwości zajścia zdarzenia losowego) uzyskane wyniki przepustowości dla skrętu w prawo z drogi nadrzędnej skrzyżowania ze zmniejszaniem prędkości są nieznacznie zawyżone w stosunku do przepustowości określanych przez obowiązującą instrukcję [3] (wiersz tabeli zaznaczony żółtym tłem) i wynoszących 1700 P/h. Zwiększanie prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia losowego powoduje zmniejszenie przepustowości ze względu na mniejszą prędkość przejazdu podczas skrętu (małe skrzyżowanie). Ta cecha modelu symulacyjnego, umożliwiającą urealnienie przepustowości wybranych relacji, wydaje się zdecydowanie korzystna podczas modelowania rzeczywistych sytuacji ruchowych.

Ponieważ zgodnie ze wzorem (2) o przepustowości relacji nadrzędnych decyduje także struktura rodzajowa ruchu, przeprowadzono symulacje sprawdzające, a ich wyniki pokazano w tabeli 3.

W tabeli 3 zawarto uśrednione wyniki przepustowości dla różnych udziałów pojazdów ciężkich u_c i ciężkich wielozłonowych u_{cp} , dla różnych prawdopodobieństw zdarzeń losowych. Jako prędkość dopuszczalną przyjęto prędkość 2 kom/s – jak dla terenu zabudowanego. Każda komórka tabeli 3 zawiera przepustowość obliczoną zgodnie ze wzorem (2) – zaznaczoną pogrubieniem oraz wyniki przepustowości uzyskane dla prawdopodobieństw zdarzeń losowych wynoszących odpowiednio: 3, 4 i 5%. Porównując uzyskane

wyniki można zauważyć, że przepustowości uzyskane dla prawdopodobieństwa zdarzenia losowego wynoszącego 3% są zdecydowanie za wysokie (kolor czerwony), dla prawdopodobieństwa zdarzenia losowego wynoszącego 5% – już zdecydowanie za niskie (kolor zielony). Tak więc dla prawdopodobieństwa zdarzenia losowego wynoszącego 4% średnie przepustowości odpowiadają, co do wartości i przebiegów zmienności, przepustowościom obliczanym zgodnie z obowiązującą instrukcją obliczeniową [3].

5.2. Przepustowość relacji podrzędnej

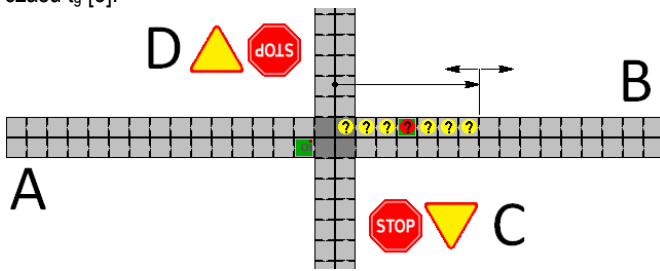
Przepustowość relacji podrzędnej na drodze głównej zbadano dla relacji skrętu w lewo AL. Zastosowano reguły ruchu identyczne jak dla relacji skrętu w prawo AP (zmniejszenie prędkości, dopóki pojazd nie opuści całkowicie skrzyżowania). Dodatkowo dla relacji AL, jako relacji drugiego rzędu, zaimplementowano reguły pierwszeństwa przejazdu pojazdów zgodnie z zasadami ruchu drogowego. Pojazdy relacji AL ustępowały pierwszeństwa przejazdu pojazdom jadącym z wlotu przeciwnego na wprost BW i w prawo BP. Ignorowały pojazdy skręcające w lewo z wlotu przeciwnego BL. Możliwość zablokowania skrzyżowania przez pojazdy chcące jednocześnie skręcić w lewo z wlotów głównych algorytm rozstrzygał podczas wyboru pojazdu wykonującego zamierzony manewr (dodatkowego losowania), co opisano w pracy [8].

Parametrem decydującym o podjęciu lub rezygnacji z manewru skrętu w lewo AL była ilość komórek wolnych na przeciwnym

Tab. 3. Przepustowość relacji nadrzędnej AW (na wprost) w zależności od struktury rodzajowej oraz zdarzeń losowych [P/h]

| Przepustowość [P/h] | Udział pojazdów ciężkich wielozłonowych (zajmujących trzy komórki) w ruchu u_{cp} [%] | | | | | | | | | | | |
|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | |
| Udział pojazdów ciężkich (zajmujących dwie komórki) w ruchu u_c [%] | 0 | 1700 | 1478 | 1307 | 1172 | 1062 | 971 | 894 | 829 | 772 | 723 | 680 |
| | | 1694 | 1565 | 1493 | 1408 | 1326 | 1192 | 1072 | 1000 | 1082 | 886 | 858 |
| | | 1560 | 1428 | 1203 | 1207 | 1111 | 1011 | 893 | 878 | 773 | 782 | 810 |
| | 10 | 1434 | 1230 | 1165 | 1053 | 954 | 913 | 847 | 744 | 723 | 604 | 572 |
| | | 1588 | 1393 | 1240 | 1118 | 1017 | 934 | 862 | 801 | 748 | 702 | - |
| | | 1706 | 1526 | 1520 | 1374 | 1198 | 1116 | 1079 | 929 | 939 | 758 | - |
| | 20 | 1473 | 1373 | 1198 | 1260 | 1080 | 1034 | 872 | 816 | 782 | 735 | - |
| | | 1232 | 1279 | 1188 | 940 | 873 | 903 | 801 | 764 | 706 | 643 | - |
| | | 1491 | 1317 | 1180 | 1069 | 977 | 899 | 833 | 776 | 726 | - | - |
| | 30 | 1575 | 1398 | 1334 | 1291 | 1129 | 1193 | 1037 | 958 | 829 | - | - |
| | | 1413 | 1231 | 1234 | 1160 | 953 | 931 | 812 | 776 | 705 | - | - |
| | | 1295 | 1126 | 1052 | 879 | 785 | 898 | 635 | 718 | 667 | - | - |
| 40 | 1404 | 1250 | 1125 | 1024 | 939 | 867 | 805 | 752 | - | - | - | |
| | 1482 | 1518 | 1342 | 1278 | 1223 | 1106 | 1037 | 868 | - | - | - | |
| | 1263 | 1223 | 1232 | 1053 | 986 | 821 | 807 | 832 | - | - | - | |
| 50 | 1119 | 1086 | 1024 | 878 | 804 | 771 | 724 | 654 | - | - | - | |
| | 1328 | 1188 | 1075 | 982 | 904 | 837 | 779 | - | - | - | - | |
| | 1417 | 1362 | 1395 | 1226 | 1180 | 1003 | 1006 | - | - | - | - | |
| 60 | 1297 | 1216 | 1142 | 1024 | 986 | 940 | 858 | - | - | - | - | |
| | 1157 | 908 | 975 | 835 | 809 | 743 | 608 | - | - | - | - | |
| | 1259 | 1133 | 1030 | 944 | 871 | 809 | - | - | - | - | - | |
| 70 | 1458 | 1324 | 1170 | 1006 | 1091 | 917 | - | - | - | - | - | |
| | 1306 | 1172 | 975 | 974 | 911 | 860 | - | - | - | - | - | |
| | 1201 | 1019 | 829 | 788 | 731 | 769 | - | - | - | - | - | |
| 80 | 1197 | 1082 | 988 | 909 | 841 | - | - | - | - | - | - | |
| | 1518 | 1182 | 1152 | 1206 | 1021 | - | - | - | - | - | - | |
| | 1292 | 1089 | 884 | 1021 | 897 | - | - | - | - | - | - | |
| 90 | 1070 | 929 | 896 | 703 | 722 | - | - | - | - | - | - | |
| | 1140 | 1036 | 949 | 876 | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1341 | 1132 | 1113 | 1041 | - | - | - | - | - | - | - | |
| 100 | 1277 | 1017 | 993 | 924 | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 964 | 884 | 836 | 790 | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1089 | 994 | 913 | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 100 | 1262 | 1203 | 1057 | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1160 | 1003 | 891 | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 930 | 938 | 862 | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 100 | 1042 | 955 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1276 | 1196 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1001 | 917 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 100 | 837 | 772 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1000 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1134 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 100 | 1019 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 873 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |

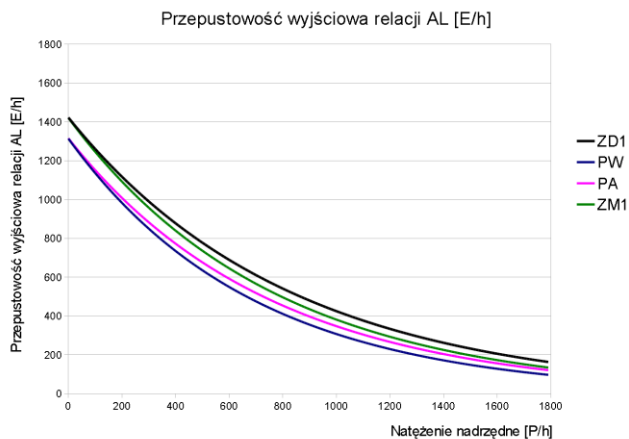
wlocie (rys.2), większa dla pojazdów ciężkich, zajmujących więcej niż jedną komórkę drogi. Odpowiada ona granicznemu odstępowi czasu t_g [3].



Rys. 2. Ustępowanie pierwszeństwa przejazdu dla relacji AL

Przerwa w potoku ruchu niezbędna do zrealizowania manewru AL jest tak dobierana, aby nie zakłócić ruchu pojazdu posiadającego pierwszeństwo przejazdu na wlocie B. Zależna jest oczywiście także od kategorii pojazdu relacji AL. Jej zmniejszenie może np. oznaczać wzrost agresji kierowcy pojazdu AL, a zwiększenie – niepewność kierowcy lub ograniczoną widoczność. W przypadku pokazanym na rysunku 2 w komórkach sprawdzanych wlotu przeciwnego B zauważono pojazd relacji nadrzędnej i zaniechano manewru.

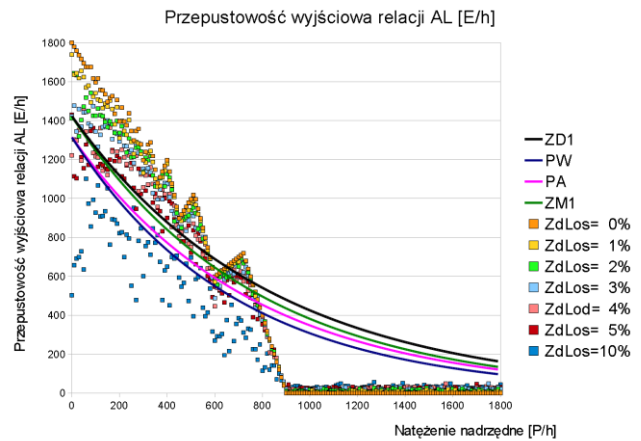
Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi przepustowości wyjściowej dla relacji skrzyżowania w lewo z drogi nadrzędnej w funkcji natężenia nadrzędnej, obliczone z wykorzystaniem obowiązującej instrukcji [3].



Rys. 3. Przepustowość wyjściowa relacji skrzyżowania w lewo z drogi nadrzędnej w zależności od natężenia nadrzędnej [3]

Zestawione na rysunku 3 przebiegi przepustowości wyjściowej dla relacji skrzyżowania w lewo z drogi nadrzędnej pokazano dla wybranych przypadków dla jednego pasa z relacjami nadrzędnymi [3]: ZD1 – teren zabudowy, miejscowość duża; ZM1 – teren zabudowy, miejscowość mała; PA – poza terenem zabudowy, strefa dużej aglomeracji; PW – poza terenem zabudowy i strefą aglomeracji.

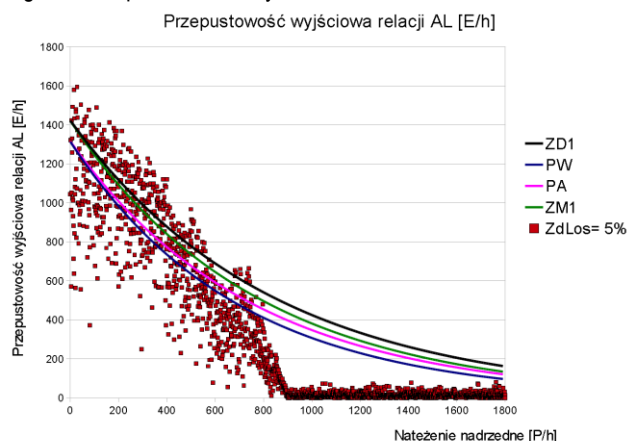
Na przepustowość wyjściową nałożono wyniki symulacji, co pokazano na rysunku 4. W przypadku badań symulacyjnych zmieniano prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia losowego $ZdLos$ [%].



Rys. 4. Porównanie przepustowości wyjściowych relacji skrzyżowania w lewo z drogi nadrzędnej, uzyskanych za pomocą obu metod

Analizując przedstawione na rysunku 4 przebiegi przepustowości wyjściowej można zauważyć pewne prawidłowości. Przebiegi przepustowości uzyskane za pomocą modelu symulacyjnego dla modelu deterministycznego (prawdopodobieństwo zdarzeń losowych wynoszące 0) pokazują bardzo wyraźnie krokowość modelu wykorzystującego automat komórkowy. W przypadku zadania prawdopodobieństwa zdarzenia losowego wynoszącego około 5%, przebiegi przepustowości częściowo pokrywają się z przebiegami uzyskanymi za pomocą obowiązującej instrukcji. Są silnie liniowe, a także wyraźnie załamują się przy natężeniach nadrzędnych wynoszących około 900 P/h. Pojazdy w strumieniu nadrzędnym pojawiają się w zbyt małych odstępach czasowych, a pojazdy relacji podrzędnej AL nie mają wystarczającego odstępu czasowego, aby zrealizować zamierzony manewr. Dopiero większe wartości prawdopodobieństwa zdarzenia losowego powodują powstawanie odstępów umożliwiających skręt w lewo. Zjawisko to powoduje uzyskanie niewielkiej przepustowości wyjściowej, co najwyżej 50 E/h.

Na przepustowość wyjściową nałożono wyniki wielokrotnych symulacji dla prawdopodobieństwa zdarzenia losowego wynoszącego 5%, co pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Porównanie przepustowości wyjściowych relacji skrzyżowania w lewo z drogi nadrzędnej dla wybranego prawdopodobieństwa zdarzenia losowego 5%

Analizując wykres pokazany na rysunku 5 można zauważyć wyraźnie stochastyczny charakter modelu. Wielokrotne symulacje przeprowadzone dla podobnych wartości natężenia nadrzędnej dają wyniki znacznie się od siebie różniące. Uzyskane w ten sposób zależności mają podobnie rozproszony charakter, co prezentowane w literaturze wyniki pomiarów drogowych. Widoczne bardzo wyraź-

nie załamanie przepustowości wynika z nieuwzględnionych na razie w modelu zjawisk: wykonywania manewrów podrzędnych na zasadzie wymuszenia oraz ustępowania pierwszeństwa przez pojazdy nadrzędne na zasadzie uprzejmości. Potwierdza to wartość przepustowości uzyskiwana zgodnie z obowiązującą instrukcją i wynosząca niecałe 200 E/h przy skrajnie dużych natężeniach nadrzędnych. Oznacza to, że pojazdy nadrzędne zachowują odstęp czasowy wynoszący średnio 2 sekundy, co wyklucza możliwość wykonania jakiegokolwiek manewru przez pojazdy relacji podrzędnej (przy granicznych odstępach czasu t_g wynoszących powyżej 5 i poniżej 7 sekund [3]). Wydaje się, że obliczana dla takiego przypadku przepustowości wyjściowa jest wyraźnie zawyżona, co wynika z wykładniczego charakteru zależności (1).

5.3. Przepustowość pasa / wlotu

Ponieważ dla małego skrzyżowania wszystkie relacje na drodze nadrzędnej poruszają się w ramach jednego pasa, przepustowość tego pasa wyznaczona z zależności (3) jest jednocześnie przepustowością wlotu. Zależy ona silnie od struktury kierunkowej ruchu na omawianym wlocie.

Porównanie wyników symulacji z wynikami uzyskanymi zgodnie z obowiązującą instrukcją pokazano w tabeli 4. Założono brak natężenia nadrzędnego oraz stałą wartość prawdopodobieństwa zdarzenia losowego wynoszącą 5%. Dla każdego przypadku struk-

tury kierunkowej podawano kolejno: zakres przepustowości obliczoną zgodnie z obowiązującą instrukcją (zakres wartości pogrubionych), minimalną przepustowość (kolor zielony), średnią (kolor czarny) oraz maksymalną (kolor czerwony). Widać wyraźnie, że ze wzrostem udziału pojazdów skręcających w prawo przepustowość wyjściowa pasa / wlotu obliczona zgodnie z obowiązującą instrukcją nie zmniejsza się, natomiast wyznaczona z modelu symulacyjnego – wyraźnie zmniejsza się, co wynika z wymuszenia zmniejszenia prędkości pojazdów skręcających w prawo, w stosunku do pojazdów jadących przez skrzyżowanie drogą nadrzędną na wprost. Ze wzrostem udziału pojazdów skręcających w lewo wyniki przepustowości wyjściowej pasa / wlotu mają podobny charakter, choć wyznaczone z symulacji zmniejszają się bardziej zdecydowanie. Zależność ta jest jeszcze wyraźniejsza w przypadku zwiększania natężenia nadrzędnego w stosunku do pojazdów skręcających w lewo, ze względu na zjawisko blokowania pojazdów jadących na wprost i skręcających w prawo przez pojazdy oczekujące na możliwość skrętu w lewo.

PODSUMOWANIE

Zalecana metoda obliczania przepustowości i oceny warunków ruchu na skrzyżowaniach bez sygnalizacji świetlnej zawiera pewne ograniczenia. Nie uwzględnia na przykład zjawisk powodujących

Tab. 4. Przepustowość pasa / wlotu A w zależności od struktury kierunkowej ruchu [E/h]

| Przepustowość [E/h] | Udział pojazdów skręcających w prawo (relacja AP) w ruchu u_{AP} [%] | | | | | | | | | | | |
|---|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | |
| Udział pojazdów skręcających w lewo (relacja AL) w ruchu u_{AL} [%] | 0 | 1700..1700 | 1700..1700 | 1700..1700 | 1700..1700 | 1700..1700 | 1700..1700 | 1700..1700 | 1700..1700 | 1700..1700 | 1700..1700 | 1700..1700 |
| | | 1163 | 1005 | 749 | 1073 | 925 | 506 | 566 | 929 | 708 | 673 | 578 |
| | | 1556 | 1481 | 1291 | 1272 | 1250 | 1161 | 1255 | 1247 | 1163 | 1135 | 1158 |
| | 10 | 1649..1671 | 1649..1671 | 1649..1671 | 1649..1671 | 1649..1671 | 1649..1671 | 1649..1671 | 1649..1671 | 1649..1671 | 1649..1671 | 1649..1671 |
| | | 417 | 1038 | 894 | 170 | 860 | 871 | 968 | 631 | 673 | 655 | - |
| | | 1373 | 1359 | 1250 | 1177 | 1267 | 1231 | 1279 | 1248 | 1252 | 1200 | - |
| | 20 | 1601..1643 | 1601..1643 | 1601..1643 | 1601..1643 | 1601..1643 | 1601..1643 | 1601..1643 | 1601..1643 | 1601..1643 | 1601..1643 | 1601..1643 |
| | | 788 | 870 | 692 | 757 | 1100 | 1062 | 398 | 744 | 816 | - | - |
| | | 1369 | 1228 | 1225 | 1285 | 1301 | 1333 | 1174 | 1217 | 1179 | - | - |
| | 30 | 1556..1616 | 1556..1616 | 1556..1616 | 1556..1616 | 1556..1616 | 1556..1616 | 1556..1616 | 1556..1616 | 1556..1616 | 1556..1616 | 1556..1616 |
| | | 953 | 1018 | 688 | 987 | 933 | 980 | 822 | 633 | - | - | - |
| | | 1249 | 1249 | 1224 | 1260 | 1204 | 1309 | 1215 | 1239 | - | - | - |
| 40 | 1513..1590 | 1513..1590 | 1513..1590 | 1513..1590 | 1513..1590 | 1513..1590 | 1513..1590 | 1513..1590 | 1513..1590 | 1513..1590 | 1513..1590 | |
| | 886 | 638 | 629 | 817 | 588 | 853 | 833 | - | - | - | - | |
| | 1269 | 1223 | 1234 | 1155 | 1176 | 1231 | 1152 | - | - | - | - | |
| 50 | 1473..1565 | 1473..1565 | 1473..1565 | 1473..1565 | 1473..1565 | 1473..1565 | 1473..1565 | 1473..1565 | 1473..1565 | 1473..1565 | 1473..1565 | |
| | 683 | 522 | 664 | 912 | 995 | 664 | - | - | - | - | - | |
| | 1250 | 1198 | 1256 | 1226 | 1187 | 1185 | - | - | - | - | - | |
| 60 | 1435..1540 | 1435..1540 | 1435..1540 | 1435..1540 | 1435..1540 | 1435..1540 | 1435..1540 | 1435..1540 | 1435..1540 | 1435..1540 | 1435..1540 | |
| | 830 | 652 | 944 | 849 | 825 | - | - | - | - | - | - | |
| | 1256 | 1182 | 1228 | 1208 | 1170 | - | - | - | - | - | - | |
| 70 | 1398..1516 | 1398..1516 | 1398..1516 | 1398..1516 | 1398..1516 | 1398..1516 | 1398..1516 | 1398..1516 | 1398..1516 | 1398..1516 | 1398..1516 | |
| | 652 | 921 | 978 | 469 | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1190 | 1184 | 1237 | 1167 | - | - | - | - | - | - | - | |
| 80 | 1364..1493 | 1364..1493 | 1364..1493 | 1364..1493 | 1364..1493 | 1364..1493 | 1364..1493 | 1364..1493 | 1364..1493 | 1364..1493 | 1364..1493 | |
| | 869 | 717 | 907 | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1191 | 1217 | 1220 | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 90 | 1331..1471 | 1331..1471 | 1331..1471 | 1331..1471 | 1331..1471 | 1331..1471 | 1331..1471 | 1331..1471 | 1331..1471 | 1331..1471 | 1331..1471 | |
| | 672 | 835 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1203 | 1228 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 100 | 1299..1450 | 1299..1450 | 1299..1450 | 1299..1450 | 1299..1450 | 1299..1450 | 1299..1450 | 1299..1450 | 1299..1450 | 1299..1450 | 1299..1450 | |
| | 822 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1214 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | 1418 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |

blokowanie ruchu na wylotach ze skrzyżowania. Dlatego zaproponowano wykorzystanie automatu komórkowego do modelowania ruchu na skrzyżowaniach z pierwszeństwem przejazdu.

Przemieszczanie się pojazdów zrealizowano z wykorzystaniem modelu Nagela i Schreckenberga, rozszerzając go o możliwość ruchu pojazdów dłuższych. Przewidziano możliwość spadku prędkości maksymalnej pojazdu dla poszczególnych wlotów oraz wylotów oraz dla różnych typów pojazdów, szczególnie w obszarze jezdni skrzyżowania właściwego. Ponieważ jednym z parametrów wyznaczanych podczas obliczeń skrzyżowań jest ich przepustowość, zaproponowano sposób wyznaczania przepustowości wlotów oraz całego skrzyżowania z wykorzystaniem proponowanego modelu.

Dla sprawdzenia wyników przepustowości przygotowano i przetestowano uproszczony, idealny model małego, jednopasowego skrzyżowania.

Przeprowadzono i omówiono sposób wyznaczania przepustowości dla wlotów nadrzędnych skrzyżowania bez sygnalizacji świetlnej. Przeprowadzone badania wykazały zgodność uzyskanych przepustowości z wynikami uzyskanymi z zalecanej procedury obliczeniowej dla średnich i małych obciążeń oraz mniejsze wartości przepustowości dla dużych obciążeń ruchem. Pokazały także szerokie możliwości dostosowania parametrów modelu do cech indywidualnych badanego skrzyżowania.

Wstępne badania wskazują na możliwość wykorzystania takiego modelu dla analizy ruchu na różnego rodzaju skrzyżowaniach, nieuwzględnianych w obowiązującej instrukcji.

Tak przygotowane i przetestowane elementy składowe modelu wykorzystującego automat komórkowy umożliwią budowę modeli skrzyżowań dowolnego rodzaju, pozwalając na pokonanie ograniczeń obowiązującej instrukcji.

BIBLIOGRAFIA

1. Bartodziej M., Modelowanie ruchu ulicznego za pomocą automatów komórkowych. Praca dyplomowa. Politechnika Wrocławska, Wrocław 2007.
2. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego*. WKŁ, Warszawa 2008.
3. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej*. Instrukcja obliczania. Wydawnictwo PiT, Warszawa 2004.
4. Nagel K., Schreckenberg M., *A cellular automaton model for freeway traffic*. Journal de Physique I France, Vol. 2, No. 12, 1992, p. 2221.
5. Płaczek B., Bernas M., *Zastosowanie automatu komórkowego do modelowania ruchu drogowego w zmiennych warunkach pogodowych*. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: TRANSPORT z. 72, 2011.
6. Płaczek B., *Zastosowanie rozmytych automatów komórkowych do modelowania ruchu drogowego*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej z. 87, 2012.
7. Praca zbiorowa, *Symulacja ruchu potoku pojazdów – Wybrane zagadnienia*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.

8. Smoczyński M., *Automat komórkowy w modelowaniu ruchu na małym skrzyżowaniu*. Logistyka 6/2014.
9. Smoczyński M., *Model ruchu na rondzie jednopasowym wykorzystujący automat komórkowy*. Logistyka 6/2014.
10. Smoczyński M., *Strumień pojazdów w modelach ruchu drogowego wykorzystujących automaty komórkowe*. Logistyka 2/2015.
11. Smoczyński M., *Przepustowość rond w modelach wykorzystujących automaty komórkowe*. Autobusy 6/2016.
12. Smoczyński M., Wąsowicz A., *Modelowanie nietypowych sytuacji na skrzyżowaniach z wykorzystaniem automatu komórkowego*. Autobusy 12/2016.

Capacity of Priority Entries in a Cellular Automata Models

This paper shows a method of calculation of capacity of the priority entries in a cellular automata model. The method of calculating the capacity and lost time for some types of priority intersections was shown in Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad instruction. However, this instruction should not be used for some cases, especially those including phenomenon that cause blocking the traffic stream on intersection exits. This instruction also should not be used in case of changing load too. Usage of a cellular automata for modeling of traffic for this kind of intersections was proposed. Basic Nagel-Schreckenberg model was extended by inter alia traffic rules on the priority intersections, possibility of using heavy vehicles and procedures of keeping safe distance between vehicles. Possibility of using objects which block the stream of vehicles, such as pedestrian crossings, was included. The method of calculating capacities for priority entries was proposed and examined. Simplified model of small, one-lane, four-entry priority intersection was prepared and tested. A multiple simulations were conducted. Similarities and differences between the results from two calculating methods: obligatory instruction and the model of priority intersection using a cellular automata were shown and analyzed. Such model was consistent with obligatory method of calculation, especially for small and medium loads. For large loads, the capacities from cellular automata model were smaller than calculated with obligatory method. After the validation of the model, its elements will be used to build models of any kind of priority intersections, even untypical. It will be possible to simulate situations not taken into account in obligatory method of the priority intersections calculations.

Autor:

dr inż. **Mariusz Smoczyński** – Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn; 90-924 Łódź; ul. Żeromskiego 116; Tel: + 48 42 631-23-90, 631-23-93, Fax: + 48 42 631-23-98, mariusz.smoczynski@p.lodz.pl.