

## PRZEPUSTOWOŚĆ ROND W MODELACH WYKORZYSTUJĄCYCH AUTOMATY KOMÓRKOWE

*W artykule przedstawiono metodę obliczania przepustowości rond w modelu ruchu wykorzystującym automat komórkowy. Sposoby obliczania przepustowości i warunków ruchu dla rond określa instrukcja wydana przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad. Nie może zostać ona użyta w pewnych przypadkach, związanych szczególnie z blokowaniem strumienia pojazdów na wylotach. Nie może być ona także wykorzystana dla zmiennych obciążeń ruchem. Zaproponowano więc wykorzystanie automatu komórkowego. Podstawowy model Nagela-Schreckenberga uzupełniono o zasady ruchu na rondach, procedury zachowania bezpiecznej prędkości oraz możliwość uwzględnienia pojazdów ciężkich. Przewidziano możliwość stosowania w modelu obiektów blokujących strumień pojazdów – na przykład przejść dla pieszych. Zaproponowano i szczegółowo omówiono sposób obliczenia przepustowości rzeczywistej wlotów i całego ronda oraz przepustowości możliwej poszczególnych wlotów. Przygotowano i przetestowano uproszczony model jednopasowego, czterowlotowego ronda. Przeprowadzono szereg symulacji, które pokazały podobieństwa i różnice pomiędzy wynikami uzyskiwanymi z wykorzystaniem obowiązującej procedury obliczeniowej oraz automatu komórkowego. Uzyskano dobrą zgodność z obowiązującą procedurą obliczeniową, szczególnie w zakresie dużych obciążeń i nierównomiernego obciążenia wlotów ronda. Ze względu na dyskretny charakter modelu niezbędne jest przygotowanie zakresów wartości parametrów wejściowych zależnych od parametrów ronda. Przetestowane elementy składowe po walidacji pozwolą na budowanie modeli rond dowolnego rodzaju oraz symulację sytuacji nieuwzględnionych w obowiązującej instrukcji obliczeniowej dla rond.*

### WSTĘP

Metody obliczeniowe zawarte w instrukcjach Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad umożliwiają analizę większości typów skrzyżowań [3, 4, 5]. Nie można ich stosować podczas oceny warunków ruchu w przypadku jego dużej zmienności oraz chwilowych przeciążeń. Nie precyzują sposobu obliczeń przepustowości oraz oceny warunków ruchu w przypadku wystąpienia dodatkowych strat czasu związanych z przejazdem przez skrzyżowanie lub jego opuszczeniem. Nie uwzględniają także pewnych typów skrzyżowań i rond. 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 przede wszystkim do symulacji ruchu na skrzyżowaniach oraz w arteriach ulic [2].

Przedstawione w poprzednich pracach [10, 11] 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 obliczenia przepustowości relacji, pasów, grupy pasów, wlotów oraz ewentualnie całego skrzyżowania lub ronda. Prezentowany artykuł omawia sposób obliczeń przepustowości rond 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 [6]. W polskiej literaturze pojawia się coraz więcej prób wykorzystania takich modeli do wyznaczania przepustowości oraz oceny warunków ruchu także na skrzyżowaniach. Stosunkowo proste modele można dowolnie komplikować [1]. Proponowane są sposoby modelowania wpływu warunków pogodowych lub sterowania ruchem na strumień pojazdów [7, 8, 9].

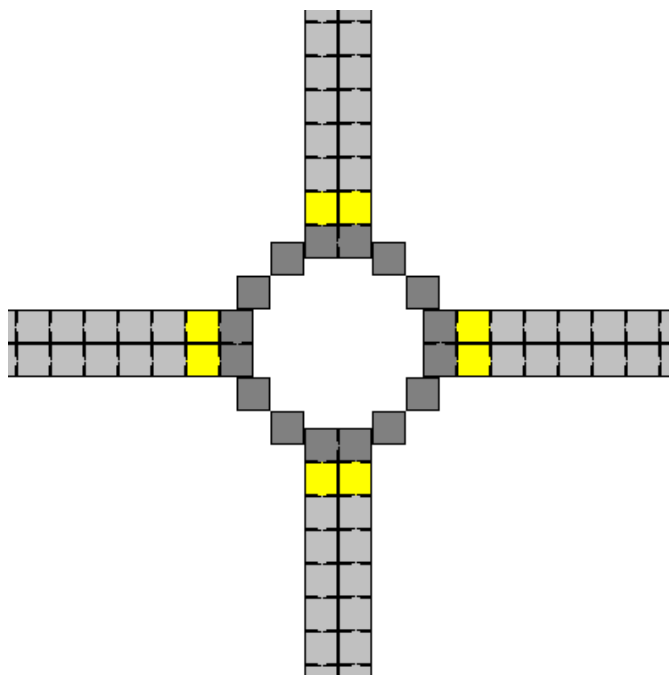
Cechą charakterystyczną takiego automatu komórkowego jest przedstawienie ciągłego w czasie i przestrzeni ruchu pojazdu za pomocą krokowego algorytmu. Uzyskuje się to dzięki podziałowi drogi na odcinki o jednakowej długości (7,5 m) i stałemu krokowi czasowemu (1 s). Implementowane reguły ruchu pojazdów wyrażają dążenie kierowcy każdego pojazdu do utrzymania maksymalnej dopuszczalnej prędkości oraz są odpowiedzialne za utrzymanie bezpiecznego odstępu przez kierowcę. Dodatkowo wymuszają losowe zmniejszanie prędkości, co symuluje wystąpienie nieprzewidzianych zdarzeń. Przykład takiego algorytmu umożliwiającego bezkolizyjny ruch strumienia pojazdów omówiono w pracy [12].

Taki strumień może być traktowany nie tylko w skali mikroskopowej, ale również jako strumień pojazdów w skali makroskopowej, w którym nie rozróżnia się pojedynczych pojazdów. W skali makroskopowej jest on opisywany przez trzy parametry: natężenie ruchu pojazdów, gęstość strumienia pojazdów oraz ich średnią prędkość. W ruchu jednorodnym wyżej wymienione parametry łączą zależność zwana równaniem strumienia ruchu pojazdów [2]. Ich wzajemną zależność od siebie często przedstawia się na fundamentalnym wykresie strumienia pojazdów.

Wstępne badania modelu ruchu strumienia pojazdów zbudowanego z wykorzystaniem automatu komórkowego pokazały, że przebiegi zależności pomiędzy tymi trzema parametrami strumienia ruchu uzyskane podczas badań symulacyjnych są zbliżone do przebiegów uzyskiwanych z badań [12]. Dodatkowo poprzez dobór prawdopodobieństwa zdarzenia losowego (zahamowania pojazdu) możliwe jest ich kształtowanie. Możliwe jest także uzyskiwanie pośrednich prędkości jazdy w ruchu swobodnym, pomiędzy wartościami dyskretnymi wynikającymi z budowy i cech charakterystycznych modelu wykorzystującego automat komórkowy.

## 2. BUDOWA MODELU MAŁEGO RONDA

Na rysunku 1 przedstawiono typową strukturę modelu małego ronda jednopasowego. Siatka komórek składa się z czterech wlotów, czterech wylotów oraz obszaru jezdni ronda [10, 11].



Rys. 1. Budowa modelu małego ronda

W modelu w komórkach wlotów i wylotów ulokowano przejścia dla pieszych oraz linie zatrzymań warunkowych. Zaimplementowano ruch pojazdów różnych kategorii (zajmujących więcej niż jedną komórkę drogi). Wprowadzono także możliwość wyboru prędkości dopuszczalnej oraz prawdopodobieństwa zahamowania (zdarzenia losowego) dla strumieni pojazdów poruszających się po poszczególnych wlotach i wylotach. Aby umożliwić symulację niewielkich prędkości przejazdu pojazdów ciężkich przez małe skrzyżowania i ronda parametry te można konfigurować osobno dla poszczególnych typów pojazdów uczestniczących w ruchu.

## 3. OBOWIĄZUJĄCY SPOSÓB OBLICZEŃ PRZEPUSTOWOŚCI ROND

Obowiązujące instrukcje, przygotowane przez Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad, umożliwiają obliczanie przepustowości większości rodzajów skrzyżowań [3, 4, 5].

Ronda traktowane są jako zespoły pojedynczych skrzyżowań z pierwszeństwem przejazdu w miejscach włączenia wlotów do jezdni ronda. Przy takim ich funkcjonowaniu, do obliczeń przepustowości wykorzystywane są takie same modele jak w przypadku skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej. Specyfiką ruchu na rondzie jest sytuacja,

gdzie strumień nadrzędny pojazdów jest tworzony ze strumienia pojazdów podporządkowanych.

Obowiązująca instrukcja [3] podaje sposób obliczeń przepustowości małych i średnich rond trzy-, cztero- i pięciowłotowych, jedno- lub dwupasowych. Nie jest przystosowana dla mini rond oraz rond spiralnych. Sąsiedztwo skrzyżowania z sygnalizacją świetlną lub sterowanego przejazdu kolejowego albo bardzo duże natężenia ruchu pieszego mogą dać wyniki odbiegające od rzeczywistości.

Nie uwzględnia także zjawisk mogących spowodować utrudniony odpływ strumienia pojazdów z wylotu ronda: wpływu sygnalizacji świetlnej, przejścia dla pieszych oraz ustępowania pierwszeństwa przejazdu na poprowadzonym poza rondem pasie do skrętu w prawo, który kończy się jako pas włączania.

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

Możliwe schematy obliczeniowe z uwzględnieniem ich typów i rozwiązań organizacji ruchu to:

- **R1** — rondo jednopasowe z jednym pasem na wlocie,
- **RS1** — rondo semi-dwupasowe z jednym pasem na wlocie,
- **RS2** — rondo semi-dwupasowe z dwoma pasami na wlocie,
- **R2S** — rondo dwupasowe z dwoma pasami na wlocie, średnie,
- **R2D** — rondo dwupasowe z dwoma pasami na wlocie, duże.

Obowiązująca instrukcja [3] wyróżnia i podaje sposób obliczenia przepustowości: możliwej wlotu (natężenie potoku pojazdów wjeżdżających na rondo przy pełnym nasyceniu wlotu ruchem), rzeczywistej wlotu i ronda (w sytuacji, gdy równomierny wzrost natężeń ruchu na wszystkich wlotach powoduje wyczerpanie przepustowości na jednym z nich).

### 3.1. Przepustowość możliwa wlotu

Przepustowość możliwa poszczególnych wlotów ronda  $C_{mwl}$  zależy od natężenia relacji nadrzędnych (którym pojazdy poruszające się po wlocie muszą ustąpić pierwszeństwa przejazdu) oraz odstępów czasu między pojazdami niezbędnych do wykonania manewru. Dotyczy ona hipotetycznej sytuacji nasycenia pojazdami badanego wlotu. Wyznacza się je z wykorzystaniem wzoru:

$$C_{mwl} = \prod f \cdot X_{wl} \cdot \frac{Q_n \cdot e^{\left(-X_g \cdot \frac{Q_n \cdot t_g}{3600}\right)}}{1 - e^{\left(-X_f \cdot \frac{Q_n \cdot t_f}{3600}\right)}} \quad [\text{E/h}] \quad (1)$$

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],

$X_x$  – współczynniki zależne od rodzaju ronda i wlotu [-],

$f$  – współczynniki korygujące [-].

Wartości odstępów czasu zalecane przez obowiązującą instrukcję pokazuje tabela 1, a wartości współczynników  $X$  – tabela 2 [3].

Tab. 1. Odstęp czasu dla rond [3]

Rondo	Jednopasowe R1	Semi-dwupasowe RS	Dwupasowe – średnie R2S	Dwupasowe – duże R2D
Odstęp $t_g$ [s]	Zależne od $D_z$	4,7	4,1	3,9
Odstęp $t_f$ [s]	Zależne od $D_z$	2,8	3,3	2,9
Średnica $D_z$ [m]	poniżej 24	od 24 do 30	pow. 30 do 36	pow. 36
Odstęp $t_g$ [s]	5,0	4,8	4,6	4,5
Odstęp $t_f$ [s]	3,0	2,9	2,8	2,7

**Tab. 2. Współczynniki X dla rond [3]**

Schemat obliczeniowy	R1	RS1	RS2	R2S i R2D
X [-]	1	1,25	$1,25 \cdot (1+0,5 \cdot m_L)$	1
X <sub>g</sub> [-]	0,95	0,95	0,95	0,85
X <sub>t</sub> [-]	1,10	1,13	1,13	0,50

gdzie:  $m_L$  – udział pojazdów na lewym pasie wlotu w całkowitym ruchu na wlocie [-].

Obowiązująca procedura wyróżnia dwa współczynniki korygujące, zależne od realnych wartości geometryczno-ruchowych [3]:

- $f_p$  – współczynnik wpływu ruchu pieszego na wlocie [-],
- $f_c$  – współczynnik wpływu struktury rodzajowej ruchu [-].

### 3.2. Przepustowość rzeczywista wlotu i ronda

Ze względu na wzajemną zależność pomiędzy natężeniem ruchu na jezdni ronda i poszczególnych jego wlotach obliczenie przepustowości rzeczywistej ronda oraz jego poszczególnych wlotów możliwe jest tylko poprzez wykorzystanie procedury iteracyjnej [3].

Procedura iteracyjna rozpoczyna się od wlotu krytycznego, czyli takiego, na którym warunki ruchu są najgorsze (najmniejsza wartość rezerwy przepustowości lub największe straty czasu ponoszone przez kierowców).

## 4. PRZEPUSTOWOŚĆ ROND W MODELACH WYKORZYSTUJĄCYCH AUTOMAT KOMÓRKOWY

Analiza sposobu obliczeń przepustowości rond pokazała wyraźnie, jakie wyniki obliczeń przepustowości powinny być możliwe do uzyskania w przypadku proponowanych modeli wykorzystujących automaty komórkowe.

Organizacja modelu symulacyjnego pozwalała na wielokrotne obliczenia i zapamiętywanie ich wyników. Konieczna była bowiem ich dodatkowa analiza, służąca znajdowaniu stanów nasycenia lub elementów krytycznych.

Organizacja modelu umożliwia obliczenie przepustowości możliwej wlotu, a także przepustowości rzeczywistej poszczególnych wlotów oraz całego ronda. Jest to możliwe dzięki proporcjonalnemu zwiększaniu liczby pojazdów generowanych na poszczególnych wlotach ronda. Symulację kończono w momencie uzyska-

nia stanu nasycenia któregośkolwiek potoku pojazdów wjeżdżających na rondo. Uzyskane wyniki pozwalały także na wskazanie wlotu krytycznego (o najgorszych warunkach ruchu) i obliczenie rezerwy przepustowości rzeczywistej poszczególnych wlotów oraz całego ronda.

W przypadku wyznaczania przepustowości możliwej wlotu zwiększano liczbę pojazdów na analizowanym wlocie, aż do osiągnięcia na nim stanu nasycenia. Ten stan wyznaczał przepustowość możliwą wlotu.

W przypadku wyznaczania przepustowości rzeczywistej wlotu oraz ronda zwiększano proporcjonalnie liczbę pojazdów na wszystkich wlotach, aż do osiągnięcia stanu nasycenia na którymkolwiek z nich. Wlot znajdujący się jako pierwszy w stanie nasycenia stawał się wlotem krytycznym, a uzyskane w tym momencie parametry wyznaczały przepustowości wlotów oraz całego skrzyżowania.

Model umożliwiał wyznaczenie parametrów identycznych z parametrami uzyskiwanymi podczas obliczeń ronda według zalecanej metody obliczeniowej [3]. Dodatkową zaletą modelu stanowiła możliwość obserwacji zachowania poszczególnych pojazdów. Wizualizację działania takiego modelu pokazano na rysunku 2.

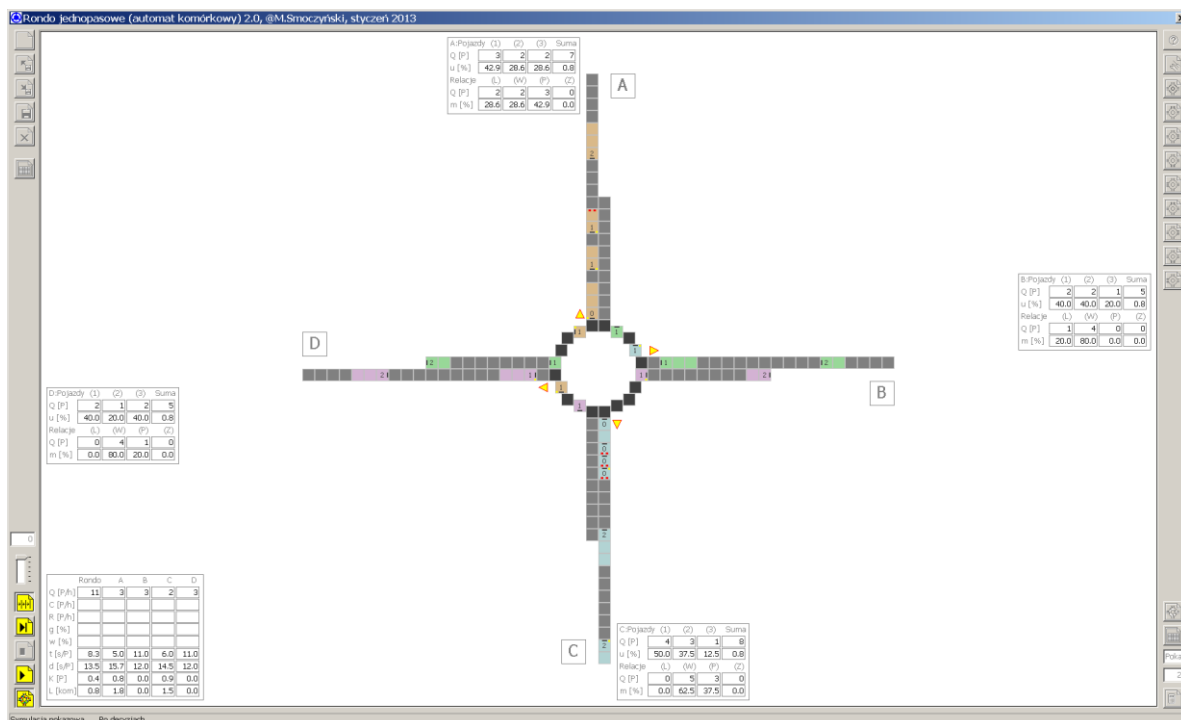
## 5. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH SYMULACJI

Wykorzystując przygotowany model ruchu na rondzie jednopasowym przeprowadzono badania sposobu wyznaczania przepustowości. Jako punkt odniesienia przyjęto wyniki uzyskiwane dzięki metodzie obliczeniowej zawartej w instrukcji [3].

### 5.1. Przepustowość wlotu

Przeprowadzono symulacje, w których zmieniano natężenie nadrzędne dla pojedynczego wlotu ronda, jednocześnie osiągając stan jego nasycenia. Maksymalna liczba pojazdów, które wjechały na rondo, była jednocześnie przepustowością badanego wlotu. Ponieważ na tym etapie symulacji w ruchu uczestniczyły jedynie pojazdy lekkie (zajmujące jedną komórkę), była to przepustowość wyjściowa wlotu [E/h].

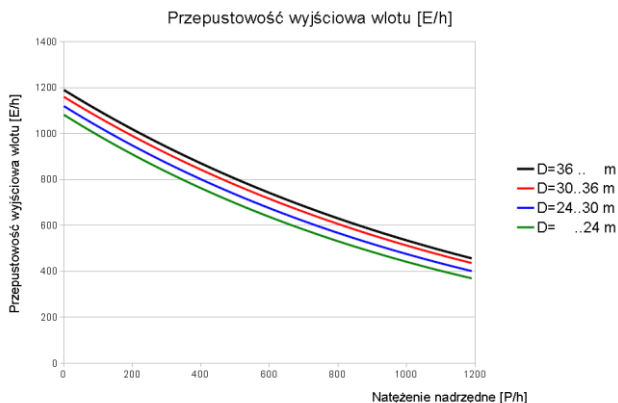
Przeprowadzono szereg symulacji, w których zmieniano natężenie nadrzędne dla badanego wlotu. Zmieniano także prawdopo-



Rys. 2. Widok modelu podczas przykładowej symulacji

dobieństwo zahamowania (zajścia zdarzenia losowego) dla pojazdów znajdujących się na jezdni ronda. Dzięki temu symulowano zmniejszenie prędkości pojazdów podczas ich przejazdu przez małe rondo. Parametr ten można było konfigurować dla poszczególnych rodzajów pojazdów (zajmujących jedną, dwie lub trzy komórki).

Na rysunku 3 pokazano przebieg przepustowości wyjściowej wlotu w zależności od natężenia nadrzędnego na wlocie obliczonej zgodnie z zależnością (1), dla różnych zakresów średnicy zewnętrznej ronda  $D_z$  [m].



**Rys. 3.** Przepustowość wyjściowa wlotu dla rond małych w zależności od natężenia nadrzędnego i ich średnicy [3]

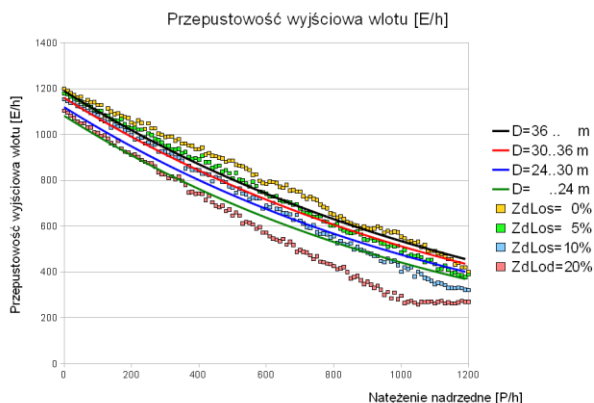
W tabeli 3 przedstawiono wyznaczone przepustowości wyjściowe wlotu  $C_{owl}$  [E/h] w przypadku braku strumienia pojazdów nadrzędnych dla różnych prawdopodobieństw zdarzeń losowych.

**Tab. 3.** Maksymalna przepustowość wyjściowa wlotu

ZdLos	[%]	0	1	5	10	20	30
$C_{owl}$	[E/h]	1200	1199	1179	1154	1104	1036

Ponieważ wzór (3) przy braku pojazdów w strumieniu nadrzędnym jest poza zakresem stosowania, uzyskane podczas symulacji wyniki porównano z wynikami uzyskanymi dla procedury obliczeniowej przy podstawieniu minimalnej wartości natężenia nadrzędnego (rys.3). Widać wyraźnie, że maksymalne przepustowości wyjściowe uzyskiwane z modelu dla prawdopodobieństw zdarzeń losowych wynoszących od 0 do 25% doskonale pasują do wartości uzyskiwanych podczas stosowania obowiązującej instrukcji.

Na rysunku 4 porównano przebiegi przepustowości wyjściowej wlotu dla zmiennych natężeń nadrzędnych uzyskane z wykorzystaniem obowiązującej instrukcji oraz przy pomocy modelu symulacyjnego. W przypadku badań symulacyjnych zmieniano prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia losowego  $ZdLos$  [%].



**Rys. 4.** Porównanie przepustowości wyjściowych wlotów dla rond małych, uzyskanych za pomocą obu metod

Analizując przedstawione na rysunku 4 przebiegi przepustowości wyjściowej można zauważyć pewne prawidłowości. Przebiegi przepustowości uzyskane za pomocą modelu symulacyjnego są bardziej liniowe w porównaniu do przebiegów uzyskanych przy pomocy obowiązującej instrukcji. Model symulacyjny wyznacza wartość przepustowości wyższą niż przy użyciu obowiązującej instrukcji dla małych oraz średnich wartości natężenia nadrzędnego. Dla dużych wartości natężenia nadrzędnego wartości uzyskane z wykorzystaniem modelu symulacyjnego są niższe, niż uzyskane z obowiązującej zależności (1). Wydaje się, że przyjmowanie wartości prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia losowego w zakresie od 0 do 15% pozwoli na uzyskiwanie porównywalnych wartości przepustowości wlotu. Dopiero przyjęcie zdecydowanie większych prawdopodobieństw zajścia zdarzenia losowego niż 15% spowoduje zaniżenie wartości przepustowości wlotu dla modelu symulacyjnego.

## 5.2. Przepustowość rzeczywista

Przepustowość rzeczywista wyznaczana jest, zgodnie z obowiązującą instrukcją, podczas realizacji procedury iteracyjnej.

Do obliczeń przyjęto czterowlotowe rondo o średnicy 30 m. Przyjęto przykładową strukturę rodzajową ruchu (20% pojazdów ciężkich i 10% pojazdów wieloczlonych). Na każdym z wlotów przyjęto jednakową strukturę kierunkową ruchu (udział pojazdów skręcających w prawo wynosił 20%, w lewo 10%, natomiast nie generowano pojazdów zawracających). Obciążenia poszczególnych wlotów wynosiły odpowiednio: wlot A – 100 P/h, wlot B – 200 P/h, wlot D – 400 P/h. Zmieniano obciążenie wlotu C –  $Q_c$  [P/h] od minimalnego do powodującego przeciążenie wlotu.

W tabeli 4 pokazano przykładowe wyniki symulacji dla ronda o różnym stopniu obciążenia i nierównomiernych strumieniach ruchu na poszczególnych wlotach. Uzyskane wyniki porównano z wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem obowiązującej procedury obliczeniowej.

**Tab. 4.** Porównanie przepustowości rzeczywistej

$Q_c$ [P/h]	$C_{tr}$ [P/h]	$C_{rA}$ [P/h]	$C_{rB}$ [P/h]	$C_{rC}$ [P/h]	$C_{rD}$ [P/h]
10	<b>1329</b>	<b>187</b>	<b>347</b>	<b>19</b>	<b>749</b>
	1301	183	367	18	733
	1329	187	375	18	749
	1326	187	375	18	746
	1277	180	360	17	719
200	<b>1812</b>	<b>201</b>	<b>403</b>	<b>403</b>	<b>805</b>
	1643	181	366	365	731
	1677	187	375	375	740
	1619	180	360	360	719
	1628	181	362	361	724
400	<b>1605</b>	<b>146</b>	<b>292</b>	<b>582</b>	<b>584</b>
	1450	133	267	515	535
	1411	127	253	522	509
	1440	130	258	533	519
	1401	127	253	512	509
600	<b>1407</b>	<b>108</b>	<b>216</b>	<b>649</b>	<b>433</b>
	1295	99	199	598	399
	1280	99	198	596	397
	1298	101	202	591	404
	1294	97	192	616	389
800	<b>1294</b>	<b>86</b>	<b>173</b>	<b>690</b>	<b>345</b>
	1228	75	150	702	301
	1220	74	149	698	299
	1227	74	148	709	296
	1217	74	149	695	299
900	<b>1254</b>	<b>78</b>	<b>157</b>	<b>706</b>	<b>314</b>
	1196	66	132	734	264
	1208	67	134	740	267
	1204	67	134	735	268
	1199	67	134	730	268

Wartości górne – z obowiązującej instrukcji, pozostałe – model symulacyjny.



Analizując przykładowe wyniki zawarte w tabeli 4 można zauważyć, że model symulacyjny przeważnie zaniża wartości przepustowości rzeczywistej wlotu o około kilka procent, szczególnie w przypadku niedociążenia wlotu ruchem. W przypadku natężenia ruchu na wlocie bliskiego przeciążeniu uzyskiwane z modelu symulacyjnego wartości przepustowości rzeczywistej wlotów mogą być nawet wyższe, niż obliczone zgodnie z obowiązującą instrukcją. Powoduje to przeważnie także zaniżanie przepustowości rzeczywistej całego ronda.

## PODSUMOWANIE

Zalecana metoda obliczania przepustowości i oceny warunków ruchu na rondach zawiera pewne ograniczenia. Nie uwzględnia zjawisk powodujących blokowanie ruchu na wylotach z ronda. Dlatego zaproponowano wykorzystanie automatu komórkowego do modelowania ruchu na rondzie.

Przemieszczanie się pojazdów po pasach ruchu realizowano z wykorzystaniem modelu Nagela - Schreckenberga, rozszerzając go o możliwość ruchu pojazdów ciężkich. Przewidziano możliwość spadku prędkości maksymalnej pojazdu dla poszczególnych pasów ruchu oraz typów pojazdów, szczególnie w obszarze jezdni ronda. Ponieważ jednym z parametrów wyznaczanych podczas obliczeń ronda jest jego przepustowość zaproponowano sposób wyznaczania przepustowości możliwej i rzeczywistej wlotów oraz rzeczywistej całego ronda z wykorzystaniem proponowanego modelu.

Dla sprawdzenia wyników przepustowości przygotowano i przetestowano uproszczony, idealny model jednopasowego ronda. Przeprowadzone badania wykazały zgodność uzyskanych przepustowości z wynikami uzyskanymi z zalecanej procedury obliczeniowej, szczególnie dla dużych obciążeń oraz nierównomiernego obciążenia poszczególnych wlotów ronda.

Także przepustowość możliwa wlotów, uzyskana przy wykorzystaniu proponowanego modelu, wykazuje zgodność z wynikami z zalecanej procedury obliczeniowej.

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

Tak przygotowane i przetestowane elementy składowe modelu wykorzystującego automat komórkowy umożliwią budowę modeli rond 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 rond*. Instrukcja obliczania. Wydawnictwo PiT, Warszawa 2004.
4. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej*. Instrukcja obliczania. Wydawnictwo PiT, Warszawa 2004.
5. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną*. Instrukcja obliczania. Wydawnictwo PiT, Warszawa 2004.

6. Nagel K., Schreckenberg M., *A cellular automaton model for freeway traffic*. Journal de Physique I France, Vol. 2, No. 12, 1992, p. 2221.
7. Płaczek B., Bernas M., *Zastosowanie automatu komórkowego do modelowania ruchu drogowego w zmiennych warunkach pogodowych*. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: TRANSPORT z. 72, 2011.
8. Płaczek B., *Zastosowanie rozmytych automatów komórkowych do modelowania ruchu drogowego*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej z. 87, 2012.
9. Praca zbiorowa, *Symulacja ruchu potoku pojazdów – Wybrane zagadnienia*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
10. Smoczyński M., *Automat komórkowy w modelowaniu ruchu na małym skrzyżowaniu*. Logistyka 6/2014.
11. Smoczyński M., *Model ruchu na rondzie jednopasowym wykorzystujący automat komórkowy*. Logistyka 6/2014.
12. Smoczyński M., *Strumień pojazdów w modelach ruchu drogowego wykorzystujących automaty komórkowe*. Logistyka 2/2015.

## Capacity of Roundabouts in a Cellular Automata Models

*This paper shows a method of calculation of the capacity of the roundabouts in a cellular automata model. The method of calculating capacity and lost time for some types of roundabouts 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 roundabout exits. This instruction should not be used in case of changing load too. Usage of a cellular automata was proposed. Basic Nagel-Schreckenberg model was extended by inter alia traffic rules on the roundabouts, procedures of keeping safe velocity and possibility of using heavy vehicles. Possibility of using objects which block the stream of vehicles, such as pedestrian crossings was included. The method of calculating real capacities for entries and whole roundabout and possible capacities for entries was proposed and examined. Simplified model of one-lane, four-entry roundabout was prepared and tested. A number of simulations were made. Similarities and differences between the results from two calculating methods: obligatory instruction and the model of roundabout using a cellular automata were shown and analyzed. Such model was consistent with obligatory method of calculation, especially for large loads and uneven loads of roundabout entries. Due to discreet character of proposed model, it is crucial to prepare the range of entry parameters that depend on roundabout parameters. After the validation of the model, its elements will be used to build models of any kind of roundabouts. It will be possible to simulate of the situations not taken into account in obligatory method of roundabouts 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.