

# NATEŻENIE NASYCENIA RELACJI DLA SKRZYŻOWAŃ Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLĄ MODELOWANYCH Z WYKORZYSTANIEM AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH

*W artykule przedstawiono metodę obliczania natężeń nasycenia dla relacji na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną w modelu ruchu wykorzystującym automat komórkowy. Sposoby obliczania przepustowości i warunków ruchu dla skrzyżowań z sygnalizacją świetlną 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 takiego skrzyżowania. Nie może być ona także wykorzystana dla zmiennych obciążeń ruchem. Zaproponowano użycie automatu komórkowego do modelowania skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Podstawowy model Nagela-Schreckenberga uzupełniono o zasady ruchu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną, możliwość uwzględnienia pojazdów ciężkich oraz procedury zachowania bezpiecznej odległości pomiędzy pojazdami. Przewidziano możliwość zmniejszania prędkości pojazdów, umożliwiając w ten sposób symulację rzeczywistych warunków ruchu. Zaproponowano i szczegółowo omówiono sposób obliczenia natężenia nasycenia dla relacji na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną. Przygotowano i przetestowano uproszczony model małego, jednopasowego, czterowłotowego skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Przeprowadzono szereg symulacji, które pokazały podobieństwa i różnice pomiędzy wynikami uzyskiwanymi z wykorzystaniem obowiązującej procedury obliczeniowej oraz automatu komórkowego. Wykazano możliwość kształtowania w proponowanym modelu dowolnych wartości natężeń nasycenia dla poszczególnych relacji i różnych organizacji ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną. Przetestowane elementy składowe po walidacji pozwolą na budowanie modeli dowolnych skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, 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 z sygnalizacją świetlną [3]. Nie można jej jednak stosować w przypadku dużej zmienności ruchu oraz chwilowych jego przeciążeń. Nie precyzuje sposobu obliczeń przepustowości oraz oceny warunków ruchu w przypadku wystąpienia zatłoczenia wylotu, to znaczy powstawania dodatkowych strat czasu związanych z przejazdem przez skrzyżowanie lub tuż po jego opuszczeniu. Nie uwzględnia przykładowo zatłoczenia powierzchni akumulacyjnych oraz szerokich pasów dzielących. Nie umożliwia bezpośredniej analizy warunków ruchu w szczególnych, nietypowych sytuacjach. W takich przypadkach zaleca stosowanie metod symulacyjnych.

Przedstawione w poprzednich pracach [8, 10] modele ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną, jednopasowym lub dwupasowym, zbudowano z wykorzystaniem automatu komórkowego. Należą one do grupy mikroskopowych modeli ruchu, które wykorzystywane są także do symulacji ruchu na skrzyżowaniach [2]. Są one próbą pokonania części ograniczeń związanych z zalecanymi metodami obliczeniowymi. Przykłady modelowania nietypowych sytuacji związanych z organizacją ruchu i funkcjami skrzyżowania z sygnalizacją świetlną pokazano w pracy [10].

Jednym z parametrów wyznaczanych podczas obliczeń skrzyżowań z sygnalizacją świetlną jest natężenie nasycenia i wynikająca z niego przepustowość. Proponowany model powinien umożliwić obliczenia natężeń nasycenia i przepustowości relacji, pasów, obliczeniowej grupy pasów, wlotów oraz całego skrzyżowania. Prezentowany artykuł omawia sposób wyznaczania natężenia nasycenia

relacji dla skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, modelowanych z wykorzystaniem automatów komórkowych, jako podstawowych parametrów decydujących o warunkach ruchu na nich panujących.

## 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 z sygnalizacją świetlną. Stosunkowo proste modele [1] są więc coraz bardziej komplikowane [5, 6, 7].

Cechą charakterystyczną takiego automatu komórkowego jest zastąpienie ciągłego w czasie i przestrzeni ruchu pojazdów przez algorytm krokowy. Droga jest dzielona na odcinki o jednakowej długości (wynoszącej 7,5 m), a jako mechanizm kontroli czasu stosuje się stały krok czasowy (wynoszący 1 s, co odpowiada w przybliżeniu czasowi reakcji kierowcy). Reguły ruchu pojazdów implementowane w modelu wyrażają dążenie każdego kierowcy do jazdy z maksymalną dopuszczalną prędkością. Dodatkowo implementuje się także algorytm odpowiedzialny za utrzymanie bezpiecznej prędkości wynikającej z bieżących warunków ruchu pojazdów [8]. Wprowadza się także prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń losowych (zahamowania lub zmniejszenia prędkości pojazdu), co ma symulować wystąpienie nieprzewidzianych zdarzeń. Ponieważ w takim modelu pojazdy poruszają się w sposób skokowy (krokowy) a nie ciągly, losowe zmniejszanie prędkości umożliwia symulację poruszania się strumienia pojazdów z dowolną prędkością średnią, co pokazano w pracy [9].

## 2. OBOWIĄZUJĄCY SPOSÓB OBLICZEŃ NATĘŻEŃ NASYCEŃ RELACJI DLA SKRZYŻOWAŃ Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNA

Obowiązująca instrukcja, przygotowana przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad, umożliwia obliczanie przepustowości typowych rodzajów skrzyżowań z sygnalizacją świetlną [3].

Oprócz relacji bezkolizyjnych w fazie otrzymywania przez nie sygnału zielonego, istnieją także relacje silnie kolizyjne z relacjami z przeciwnego wlotu oraz ze strumieniami pieszych, zarówno podczas sygnału zielonego jak i sygnału czerwonego, ale ze strzałką dopuszczającą skręcanie we wskazanym kierunku. Liczba takich relacji zależy od organizacji ruchu na skrzyżowaniu oraz liczby faz sygnalizacji świetlnej.

Obowiązująca instrukcja [3] wyróżnia i podaje sposób obliczenia natężenia nasycenia dla bezkolizyjnych relacji jazdy na wprost oraz relacji skrętnych, relacji skrętu w lewo kolizyjnej z relacją z przeciwnego wlotu, relacji skrętniej kolizyjnej z ruchem pieszym oraz relacji podczas sygnału dopuszczającego skręcanie w kierunku wskazanym strzałką.

Natężenie nasycenia pasa ruchu dla relacji na wprost oblicza się ze wzoru [3]:

$$S_w = [S_0 + 200 \cdot (w - 3,5) - 30 \cdot \delta_i \cdot i] \cdot \frac{I}{I + u_c} \text{ [P/h]} \quad (1)$$

gdzie:

$S_0$  – wyjściowe natężenie nasycenia [E/h]: 1900 E/h, gdy na pasie występują wyłącznie relacje bezkolizyjne; 1700 E/h, gdy na pasie występują także skrętne relacje kolizyjne,

$w$  – szerokość pasa ruchu (2,5..4,2) [m],

$i$  – średnie pochylenie pasa ruchu na wlocie [%],

$\delta_i$  – wskaźnik kierunku pochylenia (1 – wznios; 0 – spadek) [-],

$u_c$  – udział pojazdów ciężkich w ruchu [-].

Skrajne wartości natężenia nasycenia obliczone zgodnie ze wzorem (1), przy założeniu braku pojazdów ciężkich, zebrano w tabeli 1.

**Tab. 1. Natężenia nasycenia dla relacji na wprost [E/h]**

Relacje na pasie	$S_0$	Wpływ szerokości pasa ruchu (2,5..4,2 m)	Wpływ pochylenia wlotu (10..0%)	$S_w$
Tylko bezkolizyjne	1900	-200	-300	1400
		+140	0	2040
Przynajmniej jedna kolizyjna	1700	-200	-300	1200
		+140	0	1840

Analizując pokazane w tabeli 1 wartości natężenia nasycenia dla relacji jazdy na wprost można zauważyć, że uzyskane wartości kształtują się w szerokim zakresie 1200..2040 E/h. Trzeba także pamiętać, że ze wzrostem udziału pojazdów ciężkich w ruchu wartości te [P/h] będą się zmniejszać.

Natężenie nasycenia pasa ruchu dla bezkolizyjnej relacji skrętniej oblicza się ze wzoru [3]:

$$S_x = S_0 + 80 \cdot (w - 3,5) - 30 \cdot \delta_i \cdot i - 160 \cdot \delta_k - 75 \cdot \delta_t$$

$$S_r = S_x \cdot \frac{10^{-3} \cdot R + 1,025}{I + \frac{2}{R}} \cdot \frac{I}{I + u_c} \text{ [P/h]} \quad (2)$$

gdzie oznaczenia przyjęto jak dla wzoru (1) oraz:

$\delta_k$  – wskaźnik położenia pasa (1 - przy chodniku, 0 - niesąsiadujący z chodnikiem) [-],

$\delta_t$  – wskaźnik przejazdu przez torowisko tramwajowe (1 - wymuszający zmniejszenie prędkości; 0 – brak wpływu) [-],

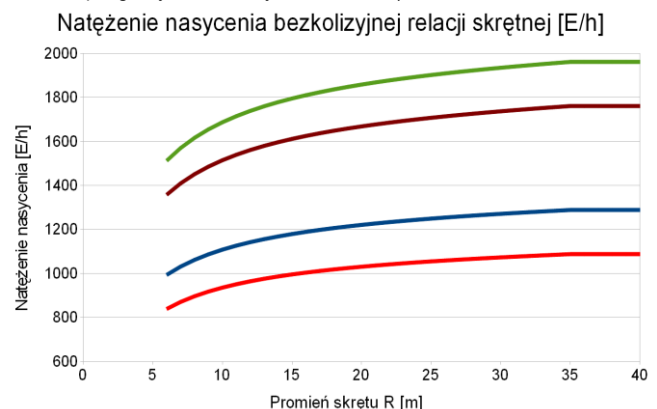
$R$  – promień skrętu [m].

Skrajne wartości natężenia nasycenia obliczone zgodnie ze wzorem (2), przy założeniu braku pojazdów ciężkich i bardzo dużym promieniu skrętu, zebrano w tabeli 2.

**Tab. 2. Natężenia nasycenia bezkolizyjnej relacji skrętniej [E/h]**

Relacje na pasie	$S_0$	Wpływ szerokości pasa ruchu (2,5..4,2 m)	Wpływ pochylenia wlotu (0..10%)	Wpływ chodnika i torowiska	$S_w$
Tylko bezkolizyjne	1900	-80	-300	-235	1285
		+56	0	0	1956
Przynajmniej jedna kolizyjna	1700	-80	-300	-235	1085
		+56	0	0	1756

Analizując pokazane w tabeli 2 wartości natężenia nasycenia dla bezkolizyjnej relacji skrętniej można zauważyć, że uzyskane wartości kształtują się w szerokim zakresie 1085..1956 E/h. Trzeba także pamiętać, że ze wzrostem udziału pojazdów ciężkich w ruchu wartości te [P/h] będą się zmniejszać. Dodatkowo, mniejsze niż 35 m wartości promienia skrętu  $R$  będą również zmniejszać wartość natężenia nasycenia, co pokazano na wykresach na rysunku 1 (dla wartości progowych zebranych w tabeli 2).



**Rys. 1. Wpływ promienia skrętu na natężenie nasycenia bezkolizyjnej relacji skrętniej**

Natężenie nasycenia kolizyjnej relacji skrętniej w lewo jednocześnie otwartej z relacjami z wlotu przeciwnego wyznacza się z procedury iteracyjnej [3].

Natężenie nasycenia relacji skrętniej kolizyjnej wyłącznie z ruchem pieszym oblicza się ze wzoru [3]:

$$S_r = S_0 \cdot f_p \cdot \frac{I}{I + u_c} \text{ [P/h]} \quad (3)$$

gdzie:

$S_0$  – wyjściowe natężenie nasycenia [E/h], 1450 E/h,

$f_p$  – współczynnik uwzględniający wpływ ruchu pieszego, nie większy niż 1 [-].

W przypadku, kiedy z jednego pasa ruchu korzysta więcej relacji, to jego natężenie nasycenia oblicza się ze wzoru [3]:

$$S_j = \frac{I}{\sum \frac{m_r}{S_r}} \text{ [P/h]} \quad (4)$$

gdzie:

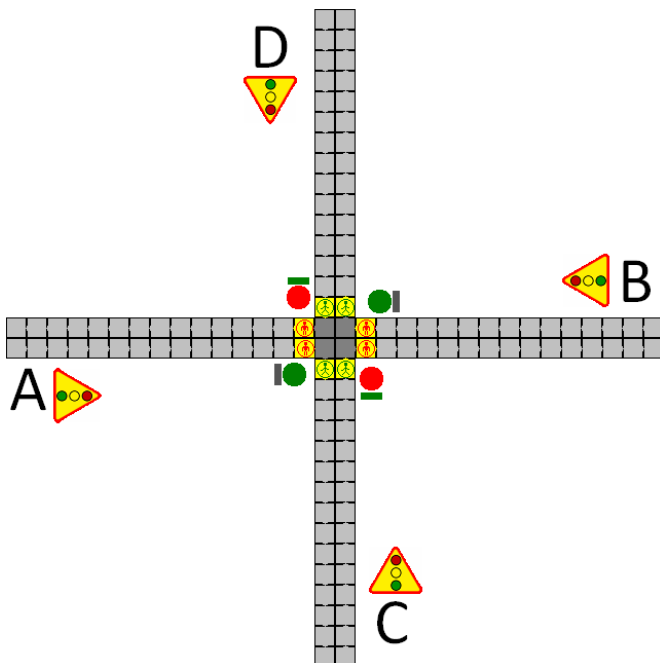
$S_r$  – natężenia nasycenia poszczególnych relacji uczestniczących w ruchu na pasie  $j$  [P/h],

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

Instrukcja wyznacza także sposób obliczania natężeń nasycenia relacji podczas sygnału dopuszczającego skręcanie w kierunku wskazanym strzałką, relacji z silnym wpływem przystanku autobusowego lub tramwajowego, a także w przypadku krótkiego pasa.

### 3. MODEL MAŁEGO SKRZYŻOWANIA Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNA

Na rysunku 2 przedstawiono typową strukturę modelu małego skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Siatka komórek składa się z czterech wlotów, czterech wylotów oraz obszaru jezdni skrzyżowania [8].



Rys. 2. Budowa modelu małego skrzyżowania z sygnalizacją świetlną

W komórkach wlotów i wylotów, przylegających do skrzyżowania właściwego, ulokowano przejścia dla pieszych oraz linie zatrzymań. Na każdym z wlotów ulokowano sygnalizator główny oraz zieloną strzałkę warunkowego skrętu w prawo. Każdym z sygnalizatorów na wlotach sterowano niezależnie od pozostałych, dzięki czemu możliwe stało się symulowanie dwufazowego programu sygnalizacji świetlnej z podfazą. Do sterowania ruchem na przejściach dla pieszych w komórkach wlotów i wylotów przylegających do obszaru skrzyżowania właściwego ulokowano sygnalizatory dla pieszych. Oboma sygnalizatorami dla pieszych w obrębie każdego wlotu sterowano wspólnie. Zaimplementowano ruch pojazdów o różnych typach / długościach (zajmujących dwie lub trzy kolejne komórki). Wprowadzono możliwość zdefiniowania prędkości maksymalnej oraz prawdopodobieństwa zahamowania (zdarzenia losowego) dla poszczególnych strumieni pojazdów poruszających się po wlotach i wylotach, ale bez rozróżnienia pojazdów różnych długości. Aby umożliwić symulację niewielkich prędkości podczas skrętu pojazdów długich przez stosunkowo małe skrzyżowanie, dopuszczono osobny wybór prawdopodobieństwa zahamowania dla różnych typów pojazdów uczestniczących w ruchu. Parametrem tym można także zmniejszać prędkość przejazdu przez przeszkody

ulokowane na skrzyżowaniu, np. tory tramwajowe. Dla modeli większych skrzyżowań przewidziano także możliwość wyboru maksymalnej prędkości przejazdu dla poszczególnych typów pojazdów i relacji.

Dla strumienia pojazdów zaimplementowano reguły umożliwiające bezkolizyjny ruch [8, 9]. Algorytm sterujący ruchem dobierał bezpieczną odległość od pojazdu poprzedzającego. Dodatkowo sprawdzał maksymalną dopuszczalną prędkość na aktualnym pasie ruchu. Losowe zahamowanie wybranych pojazdów symulowało nieprzewidziane sytuacje i zdarzenia. Ponadto algorytm realizował odpowiednie reguły ustępowania pierwszeństwa przejazdu dla pojazdów poszczególnych relacji wjeżdżających na i opuszczających skrzyżowanie, a wynikających z przepisów oraz organizacji ruchu drogowego na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną. Reguły te omówiono ogólnie w pracy [8].

Możliwe jest także lokowanie dodatkowych detektorów (liczników) przejazdu lub obecności, symulujących wbudowane w skrzyżowanie pętle indukcyjne. W takim przypadku model staje się poligonem, umożliwiającym testowanie różnych strategii sterowania.

### 4. ORGANIZACJA MODELU SYMULACYJNEGO

Analiza rodzajów obliczanych natężeń nasycenia relacji i pasów pokazuje wyraźnie, jakie wyniki obliczeń powinny być możliwe do uzyskania w przypadku proponowanego modelu wykorzystującego automat komórkowy. Organizacja obliczeń powinna pozwalać na wielokrotne obliczenia (przy różnicowaniu / modyfikacji danych wejściowych) i zapamiętywanie ich wyników, ponieważ konieczna jest dodatkowa ich analiza, służąca znajdowaniu stanów nasycenia dla relacji oraz pasów ruchu. Model umożliwiał wyznaczenie natężeń nasycenia oraz przepustowości relacji, pasów, wlotów oraz całego skrzyżowania dzięki stopniowemu zwiększaniu liczby pojazdów generowanych dla badanego elementu, aż do osiągnięcia jego nasycenia ruchem. Uzyskane wyniki pozwalają także na wskazanie elementu krytycznego (relacji, pasa lub wlotu) i obliczenie jego rezerwy przepustowości oraz stopnia obciążenia. Model umożliwia wyznaczenie parametrów identycznych z parametrami uzyskiwanymi podczas obliczeń zgodnie z zalecaną metodą obliczeniową. Natężenia nasycenia można wyznaczyć podczas wyświetlania ciągłego sygnału zielonego. Przepustowości można wyznaczyć podczas nadawania sygnałów zgodnych z badanym programem sygnalizacji. Dodatkową zaletą modelu jest możliwość prostej wizualizacji zachowania poszczególnych pojazdów i ich strumieni.

### 5. PRZYKŁADOWE WYNIKI SYMULACJI

Wykorzystując przygotowany model ruchu na małym skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną przeprowadzono badania wyznaczające w ten sposób natężeń nasycenia wybranych relacji na jego wlotach. Uzyskane wyniki porównywano z wynikami uzyskiwanymi dzięki metodzie obliczeniowej zawartej w obowiązującej instrukcji obliczeń skrzyżowań z sygnalizacją świetlną [3].

#### 5.1. Natężenie nasycenia relacji na wprost

Przeprowadzono symulacje, w których zwiększano ilość generowanych pojazdów dla relacji jazdy na wprost aż do osiągnięcia stanu jej nasycenia. Maksymalna liczba pojazdów, które wjechały na skrzyżowanie, była jednocześnie natężeniem nasycenia dla relacji na wprost (oczywiście w przypadku nadawania ciągłego sygnału zielonego).

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 tabeli 3. Przyjęte do symulacji dopuszczalne prędkości wynoszące jazdy na wprost wynoszące od 1 do 3 komórek/s mogą odpowiadać następującym drogom:

1. w strefie zamieszkania,
2. w terenie zabudowanym,
3. w arteriach na terenie zabudowanym oraz poza terenem zabudowanym, przeważnie z ograniczeniem prędkości do 70 km/h.

W każdej komórce tabeli 3 pokazano wyznaczone podczas symulacji kolejne wartości: minimalną, maksymalną oraz średnią natężenia nasycenia.

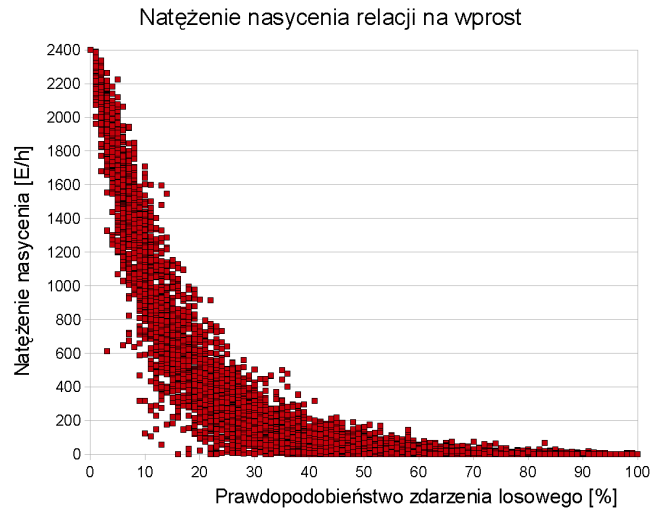
**Tab. 3. Natężenie nasycenia relacji na wprost [P/h]**

V <sub>max</sub>	[kom/s]	1	2	3
	[m/s]	7,5	15,0	22,5
	[km/h]	27,0	54,0	81,0
Prawdopodobieństwo zdarzenia losowego [%]	0	1800	<b>2400</b>	<b>3000</b>
	1	1527..1790	<b>1855..2387</b>	<b>1758..2699</b>
		1686	<b>2236</b>	<b>2489</b>
	2	1212..1714	1784..2361	<b>1296..2566</b>
		1583	2085	<b>2303</b>
	3	1164..1674	1544..2283	<b>852..2511</b>
		1505	1999	<b>2115</b>
	4	599..1647	1125..2273	557..2357
		1355	1823	1903
	5	822..1570	1126..2096	378..2188
		1311	1637	1740
	6	879..1437	843..1967	452..2244
		1207	1510	1478
	7	487..1401	631..1845	658..1912
		1101	1372	1363
	8	751..1446	735..1820	249..1914
		1042	1310	1154
9	624..1363	487..1509	463..1618	
	971	1138	1071	
10	562..1273	604..1628	82..1710	
	935	1083	842	
15	159..873	221..974	48..1246	
	616	665	469	
20	0..722	94..985	16..704	
	456	413	297	
25	7..606	0..723	0..544	
	308	266	204	
30	0..461	1..431	6..322	
	181	188	141	
35	0..385	0..319	0..320	
	127	127	88	
40	0..294	0..280	0..170	
	90	76	59	

Analizując zebrane w tabeli 3 wyniki natężenia nasycenia można zaobserwować następujące cechy modelu. Wartości natężeń nasycenia kształtujące się w omówionym w rozdziale 2 (tab.1) zakresie (1200-1400) 1500..2040 E/h, można osiągnąć dla prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia losowego wynoszącego od 0 do 8%, w zależności od założonej dopuszczalnej prędkości (prawidłowe wartości wskazano w tabeli 3 za pomocą zielonego tła a wartości zbyt duże pogrubiono). Większe wartości prawdopodobieństw zdarzeń losowych powodują już znacznie mniejsze wartości natężeń nasycenia, niż przewidywane w obowiązującej instrukcji [3]. Należy także pamiętać, że wyższe niż zalecane przez obowiązującą instrukcję wartości natężenia nasycenia uzyskiwane są przy ograniczeniu prędkości wynoszącym 3 komórki/s (81 km/h). W rzeczywistości na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną obowiązuje ograniczenie prędkości do 60-70 km/h, więc niezbędne jest zmniejszenie na nich prędkości średniej przez zastosowanie dodatkowego prawdopodobieństwa zdarzenia losowego wynoszącego około 2%, co

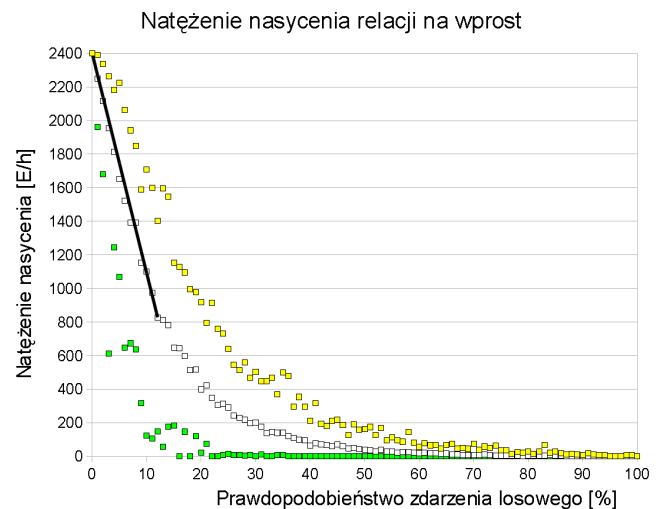
omówiono w pracy [8]. Z tabeli 3 można wywnioskować także, że większa prędkość dopuszczalna w przypadku wystąpienia nieprzewidzianych sytuacji na drodze (zahamowania) skutkuje proporcjonalnie większym spadkiem natężenia nasycenia.

Natężenia nasycenia uzyskiwane podczas wielokrotnych symulacji dla relacji na wprost przy najbardziej typowym ograniczeniu prędkości do 2 komórek/s (54 km/h) pokazano na rysunku 3.



**Rys. 3. Natężenie nasycenia dla relacji na wprost w zależności od prawdopodobieństwa zdarzenia losowego**

Na rysunku 4 pokazano wyłącznie średnie oraz graniczne natężenia nasycenia (w stosunku do rysunku 3).



**Rys. 4. Średnie natężenie nasycenia dla relacji na wprost w zależności od prawdopodobieństwa zdarzenia losowego**

Analizując wykresy pokazane na rysunkach 3 i 4 można zauważyć, że średnie natężenie nasycenia w zakresie przydatnym do formowania typowych wartości zebranych w tabeli 1 (1200..2040 E/h) można przybliżyć równaniem liniowym. Tym wartościom natężeń nasycenia odpowiadają prawdopodobieństwa zdarzenia losowego z zakresu od 0 do 12%. Liniowość ta jest także widoczna na wykresie pokazującym odwróconą zależność prawdopodobieństwa zdarzenia losowego od natężenia nasycenia (rys.5).



Rys. 5. Prawdopodobieństwa zdarzenia losowego w zależności od natężenia nasycenia dla relacji na wprost

Liniowy fragment zależności pokazanej na rysunku 4 przybliżono przykładowo zależnością umożliwiającą wyznaczenie wymaganego natężenia nasycenia:

$$S = 2400 - 132 \cdot p \quad [P/h] \quad (5)$$

gdzie:

$p$  – prawdopodobieństwo zdarzenia losowego [%] (0..12).

Po przekształceniu zależności (5) można uzyskać zależność na przybliżoną wartość prawdopodobieństwa zdarzenia losowego niezbędną do uzyskania wymaganego natężenia nasycenia dla relacji na wprost:

$$p = \frac{2400 - S}{132} \quad [\%] \quad (6)$$

W tabeli 4 zebrano wyniki uzyskane ze wzoru (6) dla wybranych z tabeli 1 skrajnych wartości natężeń nasycenia i porównano je z wartościami uzyskanymi z wielokrotnych symulacji.

Tab. 4. Wymagane i otrzymywane natężenie nasycenia

Relacja	Wymagane [E/h]	ZdLos [%]	Minimalne [E/h]	Maksymalne [E/h]	Średnie [E/h]
Kolizyjna	1200	9	153	1827	1203
	1500	7	725	1433	1962
	1700	5	1050	2082	1683
	1840	4	566	2171	1795
Bezkolizyjna	1400	8	650	1270	1858
	1700	5	1177	2199	1686
	1900	4	1204	2182	1780
	2040	3	1254	2309	1946

Analizując pokazane w tabeli 4 wyniki można zauważyć, że dobierając prawdopodobieństwo zdarzenia losowego (zahamowania) zgodnie ze wzorem (6), możliwe jest uzyskanie średnich wartości natężenia nasycenia relacji na wprost na wymaganym (pożądanym) poziomie, dopasowując je do warunków i organizacji ruchu na badanym pasie.

## 5.2. Natężenie nasycenia bezkolizyjnej relacji skrętnej

W przypadku skrętu w prawo z wlotu dopuszczalna prędkość ruchu na jezdni skrzyżowania właściwego wynosiła 1 komórkę/s (ze względu na mały promień skrętu wynikający z wielkości skrzyżowania). Dodatkowo implementowano regułę, że pojazd ciężki (zajmujący dwie lub trzy komórki) nie zwiększa prędkości powyżej dopusz-

czalnej, dopóki całkowicie nie opuści skrzyżowania (nie znajdzie się na jego wylocie). Przykładowe wyniki symulacji pokazano w tabeli 5.

Tab. 5. Natężenie nasycenia bezkolizyjnej relacji skrętnej [E/h]

$V_{max}$	[kom/s]	1	2	3
	[m/s]	7,5	15,0	22,5
	[km/h]	27,0	54,0	81,0
Prawdopodobieństwo zdarzenia losowego [%]	0	1800	1800	1800
	1	1635..1783	1529..1780	1498..1775
		1730	1680	1687
	2	1463..1768	1385..1745	1257..1740
		1631	1626	1575
	3	1361..1725	1302..1656	1250..1699
		1539	1475	1457
	4	1173..1598	1116..1649	1049..1527
		1397	1348	1317
	5	448..1562	792..1517	1031..1449
		1342	1269	1242
	6	996..1506	920..1401	781..1411
		1262	1154	1137
	7	873..1471	754..1433	838..1297
		1203	1063	1084
	8	602..1408	606..1283	767..1225
1104		1056	988	
9	889..1463	723..1336	706..1164	
	1048	1044	911	
10	653..1225	570..1415	442..1315	
	1032	911	828	
15	0..885	434..1068	313..768	
	671	631	554	
20	23..863	213..721	27..539	
	444	432	356	
25	0..613	56..538	28..391	
	292	310	230	
30	0..377	46..422	7..292	
	188	215	165	
35	0..346	0..226	16..251	
	124	122	113	
40	7..214	0..193	11..262	
	82	80	85	

Analizując zebrane w tabeli 5 wyniki natężenia nasycenia można zaobserwować następujące cechy modelu. Wartości natężeń nasycenia kształtujące się w wyznaczonym w rozdziale 2 (tab.2) zakresie: 1085..1956 P/h, można osiągnąć dla prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia losowego wynoszącego od 0 do 8%, w zależności od założonej dopuszczalnej prędkości (prawidłowe wartości wskazano w tabeli 5 za pomocą zielonego tła). Większe wartości prawdopodobieństw zdarzeń losowych powodują już znacznie mniejsze wartości natężeń nasycenia niż przewidywane w obowiązującej instrukcji [3]. Należy także pamiętać, że prezentowane w tabeli 5 obliczenia przeprowadzono przy założeniu małego promienia skrętu i wyraźnego zmniejszenia przez pojazdy prędkości. W przypadku większych promieni skrętu (dla większych skrzyżowań), natężenie nasycenia, zgodnie z zależnością (2) i wykresem na rysunku 1, będzie większe niż 1800 E/h. Ale wtedy też pojazdy w modelu symulacyjnym nie będą w takim stopniu zmniejszały prędkości, co będzie skutkowało otrzymywaniem wartości natężeń nasycenia zbliżonych do tych z tabeli 3.

## 5.3. Natężenie nasycenia relacji skrętnej kolizyjnej z pieszymi

Analizując wyniki zawarte w tabelach 3 i 5 można zauważyć, że uzyskanie natężeń nasycenia dla relacji skrętnej kolizyjnej (1450 P/h) z ruchem pieszym jest także możliwe.

## PODSUMOWANIE

Zalecana metoda obliczania przepustowości i oceny warunków ruchu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną zawiera pewne ograniczenia. Nie uwzględnia na przykład zjawisk powodujących blokowanie ruchu na wylotach z takiego skrzyżowania. Dlatego zaproponowano wykorzystanie automatu komórkowego do modelowania ruchu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną.

Przemieszczanie się pojazdów zrealizowano z wykorzystaniem modelu Nagela i Schreckenberga, rozszerzając go o możliwość ruchu pojazdów ciężkich. Przewidziano możliwość spadku prędkości maksymalnej pojazdu dla poszczególnych wlotów oraz wylotów oraz dla różnych typów pojazdów, szczególnie w obszarze jezdni skrzyżowania właściwego, co symuluje np. mały promień skrętu, wymuszając znaczne zmniejszenie prędkości pojazdu. Ponieważ jednym z parametrów wyznaczanych podczas obliczeń skrzyżowań z sygnalizacją świetlną jest natężenie nasycenia relacji, sprawdzono sposób wyznaczania tego parametru dla proponowanego modelu.

Dla sprawdzenia otrzymanych wyników natężenia nasycenia przygotowano i przetestowano uproszczony, idealny model małego, jednopasowego skrzyżowania z sygnalizacją świetlną.

Omówiono wyznaczanie natężeń nasycenia dla relacji zgodnie z obowiązującą instrukcją. Przeprowadzone badania porównawcze wykazały możliwość uzyskania dużej zgodności natężeń nasycenia w modelu symulacyjnym z wynikami uzyskanymi z zalecanej procedury obliczeniowej. Pokazały także szerokie możliwości dostosowania parametrów modelu do cech indywidualnych badanego skrzyżowania z sygnalizacją świetlną.

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

Tak przygotowane i przetestowane elementy składowe modelu wykorzystującego automat komórkowy umożliwią budowę modeli dowolnego rodzaju skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, 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 z sygnalizacją świetlną. 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., *Strumień pojazdów w modelach ruchu drogowego wykorzystujących automaty komórkowe*. Logistyka 2/2015.
10. Smoczyński M., Wąsowicz A., *Modelowanie nietypowych sytuacji na skrzyżowaniach z wykorzystaniem automatu komórkowego*. Autobusy 12/2016.

### Saturation flow of vehicle streams for signalised intersections in a cellular automata models

*This paper shows a method of calculation of the saturation flows for vehicle streams in the signalised intersection in a cellular automata model. The method of calculating capacity and lost time for some types of signalised 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. Usage of a cellular automata for modelling the traffic for signalised intersections was proposed. Basic Nagel-Schreckenberg model was extended by inter alia traffic rules on the signalised intersections, possibility of using heavy vehicles and procedures of keeping safe distance between vehicles. Possibility of decreasing of vehicle speed, making it possible to simulate the real conditions of traffic, was included. The method of calculating saturation flow for vehicle streams was proposed and examined. Simplified model of small, one-lane, four-entry signalised intersection 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 signalised intersection using a cellular automata were shown and analysed. Possibility of receiving any values of saturation flow for vehicle streams in proposed model was shown and analysed. After the validation of the model, its elements will be used to build models of any kind of signalised intersections, even untypical. It will be possible to simulate situations not taken into account in obligatory method of the signalised 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.