

Elżbieta MACIOSZEK

PRZEGLĄD METOD OBLICZANIA PRZEPUSTOWOŚCI MAŁYCH ROND STOSOWANYCH W RÓŻNYCH KRAJACH

Streszczenie. W artykule przypomniano i zestawiono metody obliczania przepustowości małych rond, stosowane w różnych krajach oraz przedstawiono zmiany, jakie wprowadzono w 2004 roku do metody obliczania przepustowości rond, obowiązującej w Polsce.

THE REVIEW OF CAPACITY FORMULAS FOR SMALL ROUNDABOUTS

Summary. This article reviews capacities formulas coming from different countries. The significant studies have been done on the world which developed methodologies for evaluation the functional performances of roundabouts. Capacity and delay are indicators used by most countries to assess roundabout performance. The substitutions in Polish metod in 2004 have been presented in this article too.

1. WPROWADZENIE

Do oceny jakości funkcjonowania rond stosowane są dwa podstawowe wskaźniki, takie jak przepustowość i straty czasu. Wiele państw prowadzi badania nad rozwojem metod oceny funkcjonowania oraz obliczania przepustowości rond. Charakterystyki operacyjne rond są uzależnione od zachowania kierowców oraz od geometrii ronda i mają zasadniczy wpływ na obliczoną przepustowość.

Kierowcy na wlotach podporządkowanych wjeżdżają na jezdnię ronda tylko wtedy, gdy odstęp czasu pomiędzy pojazdami w potoku na jezdni ronda jest (w ich ocenie) wystarczający do wykonania manewru włączenia się do ruchu. Stąd przepustowość rond zależy od wielkości potoku ruchu poruszającego się po jezdni wokół wyspy centralnej oraz od dostępności odstępów czasowych pomiędzy pojazdami na jezdni ronda. Przepustowość wlotu zmniejsza się, gdy natężenie ruchu na jezdni ronda rośnie. Zależność przepustowości wlotu od potoku ruchu na jezdni ronda znana jest w literaturze zagranicznej jako stosunek natężenia na wlocie do natężenia ruchu na jezdni ronda i zależy od wzajemnego oddziaływania kierowców oraz od geometrii ronda. Istnieją dwa podstawowe sposoby wykorzystywane do szacowania stosunku natężenia na wlocie do natężenia ruchu na jezdni ronda; są to analiza regresji oraz teoria akceptacji odstępów czasowych. Wzory do obliczania przepustowości rond najczęściej oparte są na jednej z tych dwóch metod.

2. METODY OBLICZANIA PRZEPUSTOWOŚCI ROND OPARTE NA ANALIZIE REGRESJI

2.1. Metoda stosowana w Wielkiej Brytanii

W Wielkiej Brytanii do obliczeń przepustowości stosuje się analizę regresji, opartą na pracach R. M. Kimbera z 1980 r. Wzory Kimbera zastosowano także w programach RODEL i ARCADY. Do określenia przepustowości wlotu ronda wykorzystano aproksymację liniową. Wzór Kimbera na przepustowość wlotu ma następującą postać [3]:

$$Q_e = F - f_c \cdot Q_c \left[\frac{P}{h} \right], \quad (1)$$

gdzie:

Q_e - przepustowość wlotu ronda [P/h],

Q_c - natężenie ruchu na jezdni ronda [P/h],

F, f_c - parametry zdefiniowane w zależności od geometrii ronda.

Zależność Kimbera (1) może być stosowana także w przypadku szacowania przepustowości wlotów rond dużych i małych.

2.2. Metoda stosowana w Niemczech

Metoda obliczania przepustowości, stosowana w Niemczech, jest w pewnym stopniu podobna do metody stosowanej w Wielkiej Brytanii. Początkowo prowadzono badania z wykorzystaniem zarówno analizy regresji (stosowanej w Wielkiej Brytanii), jak i teorii akceptacji odstępów czasowych. Po przeprowadzonych analizach zdecydowano się na praktyczne wykorzystywanie analizy regresji do obliczania przepustowości rond. Wzór na przepustowość wlotu ma postać [3]:

$$Q_e = A \cdot e^{\frac{-BQ_c}{10000}} \quad [\text{P/h}], \quad (2)$$

gdzie:

Q_e - przepustowość wlotu ronda [P/h],

Q_c - natężenie potoku ruchu na jezdni ronda [P/h],

A, B - parametry zależne od liczby pasów ruchu na wlocie oraz liczby pasów ruchu na jezdni ronda.

Wartości otrzymywane z obliczeń przepustowości rond w Niemczech stanowią 0.7-0.8 wartości wyników, otrzymywanych przez Anglików dla tych samych danych wejściowych do modelowania. Według Birgit Stuwe [3] różnica ta może być tłumaczona różnymi zachowaniami kierowców oraz spowodowana faktem, że Anglicy od dawna znają i poruszają się po skrzyżowaniach typu rondo, natomiast w okresie przeprowadzania badań w Niemczech rondo stanowiły stosunkowo nowy typ skrzyżowania.

Badania przeprowadzane przez Brilona, Wu oraz Bondzio na zlecenie rządu w Niemczech w 1997 r. dowiodły, że funkcja liniowa lepiej odzwierciedla wartość przepustowości niż

dotychczas stosowana funkcja wykładnicza. Zaproponowany, nowy wzór do obliczania przepustowości wlotu ma następującą postać [3]:

$$Q_e = C + D \cdot Q_c \quad [\text{P/h}], \quad (3)$$

gdzie:

- Q_e - przepustowość wlotu ronda [P/h],
- Q_c - natężenie potoku ruchu na jezdni ronda [P/h],
- C, D - parametry używane do regresji liniowej, zależne od liczby pasów ruchu na wlocie oraz liczby pasów ruchu na jezdni ronda.

3. METODY OBLICZANIA PRZEPUSTOWOŚCI ROND OPARTE NA TEORII AKCEPTACJI ODSTĘPÓW CZASOWYCH

Podstawową zaletą tej metody jest to, że ma ona logiczne zasady oceny przepustowości, a także łatwo można wytłumaczyć znaczenie parametrów użytych dla nietypowych warunków. Teoria akceptacji odstępów czasowych uwzględnia zarówno wzajemne oddziaływanie kierowców, jak i dostępność odstępów czasowych. Metoda obliczania przepustowości, oparta na teorii akceptacji odstępów czasowych bazuje na wzorach Tannera dla skrzyżowań z pierwszeństwem przejazdu.

3.1. Metoda stosowana w Australii

W Australii, w obliczeniach przepustowości stosuje się teorię akceptacji odstępów czasowych, opartą na wzorach Tannera, po dostosowaniu ich do warunków lokalnych. W 1962 r. Tanner analizował straty czasu na skrzyżowaniach z pierwszeństwem przejazdu. Zakładał, że pojazdy z obydwu strumieni ruchu, i głównego i podporządkowanego, zgłaszają się na skrzyżowaniu w losowo wybranych chwilach czasu. Równanie Tannera ma następującą postać [7]:

$$q_e = \frac{q_c \cdot (1 - \Delta \cdot q_c) \cdot e^{q_c \cdot (T - \Delta)}}{1 - e^{-q_c \cdot T_0}} \quad [\text{P/h}], \quad (4)$$

gdzie:

- q_e - przepustowość wlotu ronda [P/h],
- q_c - natężenie potoku ruchu na jezdni ronda [P/h],
- T - luka krytyczna [s],
- T_0 - (zgodnie z HCM) odstęp czasu pomiędzy pojazdami na wlocie podporządkowanym, wyjeżdżającymi z kolejki, w przypadku gdy odstęp czasu na jezdni ronda umożliwia włączenie się do ruchu co najmniej dwóch pojazdów z wlotu podporządkowanego [s],
- Δ - minimalny odstęp czasu pomiędzy pojazdami na drodze głównej [s].

Zależność Tannera pomiędzy natężeniem ruchu na wlocie a natężeniem ruchu na jezdni ronda zaakceptowana została przez australijski zarząd dróg (NAASRA – National Association of Australian State Road Authorities) i poparta przez Aventa i Taylora. Przepustowość rond o jednym pasie ruchu na jezdni ronda wokół wyspy centralnej dana jest wzorem [7]:

$$Q_{e,\max} = \frac{n_e \cdot Q_c \cdot (1 - q_c \cdot t_c) \cdot \exp[-q_c \cdot (T - t_c)]}{1 - \exp(-q_c \cdot T_0)} \quad [\text{P/h}], \quad (5)$$

gdzie oznaczenia jak wyżej.

Przepustowość rond o kilku pasach ruchu na jezdni ronda wokół wyspy centralnej dana jest wzorem [7]:

$$Q_{e,\max} = \frac{n_e \cdot Q_c \cdot \exp(-q_c \cdot T)}{1 - \exp(-q_c \cdot T_0)} \quad [\text{P/h}], \quad (6)$$

R. J. Troutbeck zmodyfikował wzór Tannera z użyciem rozkładu Cowana M3 do następującej postaci [7]:

$$Q_e = \frac{3600 \cdot (1 - \theta) \cdot q_c \cdot e^{-\lambda(T-\Delta)}}{1 - e^{-\lambda T_0}} \quad [\text{P/h}], \quad (7)$$

gdzie:

Q_e - przepustowość wlotu ronda [P/h],

q_c - natężenie potoku ruchu na jezdni ronda [P/h],

θ - udział pojazdów poruszających się w „paczkach” (zgrupowanych w kolumny) na jezdni ronda,

Δ - minimalny odstęp czasu pomiędzy pojazdami na jezdni ronda w [s], dla rond o jednym pasie ruchu na jezdni ronda $\Delta = 2$ [s], dla rond o wielu pasach ruchu na jezdni ronda $\Delta = 1$ [s],

T - luka krytyczna [s],

T_0 - (zgodnie z HCM) odstęp czasu pomiędzy pojazdami na wlocie podporządkowanym, wjeżdżającymi z kolejki, w przypadku gdy odstęp czasu na jezdni ronda umożliwia włączenie się do ruchu co najmniej dwóch pojazdów z wlotu podporządkowanego [s],

λ - parametr strat czasu $\lambda = \frac{(1 - \theta) \cdot q_c}{1 - \Delta \cdot q_c}$.

3.2. Metoda stosowana w Niemczech

Ning Wu w 1997 r., po zmodyfikowaniu podstawowych założeń Tannera, zaproponował następujący wzór na obliczanie przepustowości wlotów ronda [3]:

$$Q_e = \left(1 - \frac{\Delta \cdot Q_c}{n_c}\right)^{n_c} \cdot \frac{n_e}{T_0} \cdot e^{-Q_c \cdot (t_0 - \Delta)} \quad [\text{P/h}], \quad (8)$$

gdzie:

Q_e - przepustowość wlotu ronda [P/h],

Q_c - natężenie potoku ruchu na jezdni ronda [P/h],

n_c - liczba pasów ruchu na jezdni ronda,

n_e - liczba pasów ruchu na wlocie,

$t_0 = T - \frac{T_0}{2}$

T - luka krytyczna [s],

- T_0 - odstęp czasu pomiędzy pojazdami na wlocie podporządkowanym, wjeżdżającymi z kolejki, w przypadku gdy odstęp czasu na jezdni ronda umożliwia włączenie się do ruchu co najmniej dwóch pojazdów z wlotu podporządkowanego [s],
- Δ - minimalny odstęp pomiędzy pojazdami na jezdni ronda [m].

3.3. Metoda stosowana w USA

FHWA sponsorowało badania efektem, których są wytyczne projektowania rond Highway Capacity Manual (HCM). Pierwsza wersja metody HCM pochodzi z 1965 r. W późniejszych latach wydano jeszcze kilka wersji HCM, najnowsza pochodzi z 2000 r. (z późniejszymi poprawkami).

Aimee Flannery od kilku lat prowadzi badania, które mają na celu ocenę funkcjonowania rond w USA. Metoda akceptacji odstępów czasowych jest powszechnie stosowaną metodą w USA. Z uwagi na fakt, że pojazdy na rondach poruszają się podobnie jak pojazdy wykonujące manewr skrętu w prawo na skrzyżowaniach bez sygnalizacji świetlnej, można oczekiwać, że charakterystyki luk akceptowanych będą takie same lub podobne. Proponowana w USA formuła do obliczania przepustowości dana jest wzorem [5]:

$$Q_e = \frac{Q_c e^{-Q_c T / 3600}}{1 - e^{-Q_c T_0 / 3600}} \quad [\text{P/h}], \quad (9)$$

gdzie:

- Q_e - przepustowość wlotu ronda [P/h],
- Q_c - natężenie potoku ruchu na jezdni ronda (kolidującego z potokiem na wlocie) [P/h],
- T - luka krytyczna [s],
- T_0 - (zgodnie z HCM) to odstęp czasu pomiędzy pojazdami na wlocie podporządkowanym, wjeżdżającymi z kolejki, w przypadku gdy odstęp czasu na jezdni ronda umożliwia włączenie się do ruchu co najmniej dwóch pojazdów z wlotu podporządkowanego [s].

4. PORÓWNANIE ANALIZY REGRESJI ORAZ TEORII AKCEPTACJI ODSTĘPÓW CZASOWYCH

W tabelicy 1 przedstawiono różnice pomiędzy dwoma podstawowymi metodami, stosowanymi do określania stosunku natężenia na wlocie do natężenia ruchu na jezdni ronda czyli pomiędzy analizą regresji a teorią akceptacji odstępów czasowych.

Tablica 1

Porównanie podstawowych cech metody obliczania przepustowości rond
analizy regresji oraz teorii akceptacji odstępów czasowych

Kryteria porównania	Metoda akceptacji odstępów czasowych	Analiza regresji (metoda empiryczna)
Metodologia	<ul style="list-style-type: none"> - teoretyczne podstawy, - zachowanie się kierowców bazuje na wzajemnym oddziaływaniu, - użycie takich estymatorów, jak: luka krytyczna oraz odstęp czasu pomiędzy pojazdami na drodze podporządkowanej, wjeżdżającymi z kolejki, w przypadku gdy odstęp czasu na jezdni ronda umożliwia włączenie się do ruchu co najmniej dwóch pojazdów z wlotu podporządkowanego powoduje niedokładność obliczeń przepustowości 	<ul style="list-style-type: none"> - statystyczne podstawy, - zachowanie się kierowców rozumiane jest jako związek pomiędzy funkcjonowaniem ronda a geometrycznymi elementami ronda, - niektóre z ważnych statystycznie parametrów geometryczne ronda nie da się wytłumaczyć logicznie
Zbieranie danych do budowy modelu	<ul style="list-style-type: none"> - dla nieskomplikowanego, prostego modelu jest potrzebna niewielka liczba danych, - dla skomplikowanego modelu sprawdzanie danych jest trudne 	<ul style="list-style-type: none"> - wymagana jest duża liczba danych z wieloma wariantami każdego parametru
Wiarygodność wyników	<ul style="list-style-type: none"> - zależna od stopnia rozbudowy modelu 	<ul style="list-style-type: none"> - zależna od metody odwzorowywania oraz od wielkości próby (grupy reprezentatywnej)
Łatwość w stosowaniu, naturalność	<ul style="list-style-type: none"> - metoda nieskomplikowana do celów planistycznych 	<ul style="list-style-type: none"> - metoda nieskomplikowana dla projektowania geometrycznego

Źródło: [3].

5. METODA OBLICZANIA PRZEPUSTOWOŚCI ROND OBOWIĄZUJĄCA W POLSCE OD 2004 ROKU

Pierwszym etapem przed rozpoczęciem obliczeń jest zebranie odpowiednich danych, dotyczących geometrii oraz panujących na rondzie warunków ruchowych. W zależności od tego, czy rondo już istnieje czy też jest nowo projektowane, dane te albo są odzwierciedleniem sytuacji rzeczywistej na rondzie, albo też są to wartości hipotetyczne. W punkcie tym nie przedstawiono kompletnej metody obliczania przepustowości małych rond. Można ją znaleźć w pracy [1]. Zamieszczono jednak te elementy, które w nowej wersji (z sierpnia 2004 r.) w stosunku do wersji poprzedniej, zostały zmienione. Zasadnicze zmiany,

jakie zostały wprowadzone to nowe wzory na przepustowość wyjściową wlotu ronda, które uzależnione są od rodzaju i geometrii ronda.

Przepustowość wyjściową wlotu C_{owl} małego ronda jednopasowego oblicza się z następującego wzoru [1]:

$$C_{owl} = \frac{Q_{nwl} \cdot \exp\left(-0.95 \cdot \frac{Q_{nwl} \cdot t_g}{3600}\right)}{1 - \exp\left(-1.10 \cdot \frac{Q_{nwl} \cdot t_f}{3600}\right)} \quad [E/h] \quad \text{dla} \quad Q_{nwl} > 0 \quad [P/h], \quad (10)$$

gdzie:

Q_{nwl} - natężenie ruchu na jezdni ronda przy wlocie wl [P/h],

t_g - graniczny odstęp czasu [s],

t_f - odstęp czasu pomiędzy pojazdami opuszczającymi kolejkę na wlocie, w przypadku wystąpienia dużej luki czasu w potoku na jezdni ronda [s].

Przepustowość wyjściową wlotu C_{owl} ronda semi-dwupasowego oblicza się z następującego wzoru [1]:

$$C_{owl} = 1.25 \cdot (1 + 0.5 \cdot m_l) \cdot \frac{Q_{nwl} \cdot \exp\left(-0.95 \cdot \frac{Q_{nwl} \cdot t_g}{3600}\right)}{1 - \exp\left(-1.13 \cdot \frac{Q_{nwl} \cdot t_f}{3600}\right)} \quad [E/h] \quad \text{dla} \quad Q_{nwl} > 0 \quad [P/h], \quad (11)$$

gdzie:

Q_{nwl} - natężenie ruchu na jezdni ronda przy wlocie wl [P/h],

t_g - graniczny odstęp czasu [s],

t_f - odstęp czasu pomiędzy pojazdami opuszczającymi kolejkę na wlocie, w przypadku wystąpienia dużej luki czasu w potoku na jezdni ronda [s],

m_l - udział natężenia strumienia wjeżdżającego na jezdnię ronda z lewego pasa wlotu w całkowitym natężeniu ruchu na dwupasowym wlocie [-]. W przypadku wlotu o jednym pasie ronda semi-dwupasowego należy przyjąć $m_l = 0.0$.

Przepustowość wyjściową wlotu C_{owl} ronda dwupasowego oblicza się z następującego wzoru [1]:

$$C_{owl} = \frac{Q_{nwl} \cdot \exp\left(-0.85 \cdot \frac{Q_{nwl} \cdot t_g}{3600}\right)}{1 - \exp\left(-0.50 \cdot \frac{Q_{nwl} \cdot t_f}{3600}\right)} \quad [E/h] \quad \text{dla} \quad Q_{nwl} > 0 \quad [P/h], \quad (12)$$

gdzie:

Q_{nwl} - natężenie ruchu na jezdni ronda przy wlocie wl [P/h], łącznie z obu pasów,

t_g - graniczny odstęp czasu [s],

t_f - odstęp czasu pomiędzy pojazdami opuszczającymi kolejkę na wlocie, w przypadku wystąpienia dużej luki czasu w potoku na jezdni ronda [s].

Przepustowość możliwą wlotu ronda, w odniesieniu do rzeczywistych warunków geometryczno – ruchowych, oblicza się ze wzoru [1]:

$$C_{mwl} = C_{owl} \cdot f_p \cdot f_c \quad [P/h], \quad (13)$$

gdzie:

C_{mwl} - przepustowość możliwa wlotu wl ronda w $[P/h]$ (w przypadku wlotu dwupasowego jest to łączna przepustowość obu pasów),

C_{owl} - przepustowość wyjściowa wlotu wl ronda w $[E/h]$ (uzależniona od typu ronda),

f_p - współczynnik korygujący, uwzględniający wpływ pieszych (wyznaczany z odpowiedniej procedury),

f_c - współczynnik korygujący, uwzględniający wpływ struktury rodzajowej ruchu.

Przepustowość rzeczywista ronda C_{rz} równa jest przepustowości obliczonej w procesie iteracji przy rzeczywistej proporcji natężeń z poszczególnych wlotów i wynosi [1]:

$$C_{rr} = 100 \cdot \frac{C_k}{m_k} \quad [P/h], \quad (14)$$

gdzie:

C_{rr} - przepustowość rzeczywista ronda $[P/h]$,

m_k - procentowy udział potoku ruchu na wlocie krytycznym k w sumarycznym potoku pojazdów wjeżdżających na rondo z wszystkich wlotów [%].

Przepustowości rzeczywiste wlotów ronda są natężeniami ruchu na poszczególnych wlotach o wartościach natężeń z ostatniego kroku iteracji i wynoszą [1]:

$$C_{rwl} = C_{rr} \cdot \frac{Q_{wl}}{\sum Q_{wl}} \quad [P/h], \quad (15)$$

$$C_{rwl} = \frac{C_{owl} [P/h]}{f_c} \quad [E/h], \quad (16)$$

gdzie:

C_{rr} - przepustowość rzeczywista ronda $[P/h]$,

Q_{wl} - obliczeniowe natężenie ruchu na wlocie wl $[P/h]$,

f_c - korygujący współczynnik uwzględniający wpływ struktury rodzajowej ruchu.

Bibliografia

1. Metoda obliczania przepustowości rond. GDDKiA, Warszawa 2004.
2. Wytyczne projektowania skrzyżowań drogowych, część II. GDDP Warszawa 2001.
3. Taekratok T.: Modern Roundabouts for Oregon. Oregon Department of Transportation. Research Unit, 200 Hawthorne SE, Suite B-240 Salem, OR 97310, June 1998.
4. Macioszek E.: Model ruchu na małych rondach dla potrzeb obliczania przepustowości. Wersja robocza rozprawy doktorskiej, styczeń 2005.
5. Haging O., Nagui M., Sorensen A.: Comparison of capacity models for two lane roundabouts. 82 annual meeting of the Transportation Research Board. Washington, 2003.
6. Kittelson and Associates 2002 on-line roundabout database, URL: <http://roundabouts.kittelson.com/dbase/invmmain.html>.
7. Haging, O.: A further generalization of Tanner's formula. Transportation Research 32B(6), 1998.
8. Haging, O.: Estimation of Critical Gaps in Two Major Streams. Transportation Research, vol. 34B(4), 2000, pp. 293-313.

Recenzent: Dr hab. Romuald Szopa, prof. Politechniki Częstochowskiej