

Elżbieta MACIOSZEK

METODY SZACOWANIA STRAT CZASU POJAZDÓW PONOSZONYCH NA MAŁYCH RONDACH

Streszczenie. W artykule przedstawiono opis kilku różnych metod używanych do obliczeń strat czasu ponoszonych przez pojazdy podczas przejazdu przez skrzyżowanie typu rondo. Są to metody proponowane i stosowane w Wielkiej Brytanii, Australii i w Polsce. Generalnie rozróżnia się dwa rodzaje strat czasu, jakie ponoszą pojazdy podczas przejazdu przez rondo: straty powstałe w wyniku oczekiwania w kolejce oraz straty czasu wynikające z geometrii ronda.

THE DELAY FORMULAS FOR SMALL ROUNDABOUTS

Summary. The reviews of delay formulas has been presented in this article. Delays at roundabouts consist of queuing delay and geometric delay. Queuing delay is the delay of vehicles waiting in queue. Geometric delay is the delay caused by the existence of the roundabouts. The summary of the UK delay formula is based on the article by Marie C. Semmens in 1985. The Australian delay formula is summarized from articles by Avent and Taylor and R. J. Troutbeck.

1. WPROWADZENIE

Do oceny funkcjonowania rond stosowane są dwa podstawowe wskaźniki, takie jak przepustowość i straty czasu. Wiele naukowców na świecie prowadzi badania nad rozwojem metod służących do oceny strat czasu pojazdów na rondach. Każdy z prezentowanych poniżej wzorów na straty czasu wymaga obliczenia wskaźnika $\frac{Q}{C}$ [-] (stosunek natężenia ruchu do przepustowości).

2. METODA OBLICZANIA STRAT CZASU W WIELKIEJ BRYTANII

Podstawą wzorów używanych w Wielkiej Brytanii do określania strat czasu na rondach są prace Marie C. Semmens z 1985 r.

2.1. Straty czasu wynikające z oczekiwania pojazdów w kolejce

Równanie na straty czasu pojazdów ponoszone w wyniku oczekiwania w kolejce bazują na równaniu Kimbera i Hollisa z 1979 r. Podstawą tej metody jest rozważenie rozkładu prawdopodobieństwa różnej długości kolejek pojazdów na wlotach od czasu. Na podstawie obliczonego prawdopodobieństwa obliczane są średnie długości kolejek oraz średnie straty czasu wynikające z oczekiwania pojazdów w kolejkach na wlotach. Aproksymacja średniej długości kolejek obliczana jest z wykorzystaniem teorii prawdopodobieństwa. Jeżeli „ F_n ” jest funkcją długości kolejki zdefiniowaną dla x zmiennego w czasie jako [7]:

$$F_n(x) = 0.5 \left\{ \left((\mu x (1 - \rho) + 1)^2 + 4 \rho \mu x \right)^{\frac{1}{2}} - (\mu x (1 - \rho) + 1) \right\} \quad (1)$$

wtedy średnia długość kolejki „ L ” po czasie „ t ” jest określona następującym wyrażeniem [7]:

$$\text{dla } \rho \geq 1: L(t) = F_n(t + t_0) \quad \text{gdzie: } t_0 = \frac{L_0(L_0 + 1)}{\mu(\rho(L_0 + 1) - L_0)} \quad (2)$$

dla $\rho < 1$:

$$(a) \quad 0 \leq L_0 < l: \quad L(t) = F_n(t + t_0) \quad \text{gdzie: } t_0 = \frac{L_0(L_0 + 1)}{\mu(\rho(L_0 + 1) - L_0)} \quad (3)$$

$$(b) \quad L_0 = l: \quad L(t) = l$$

$$(c) \quad l < L_0 \leq 2l: \quad L(t) = 2l - F_n(t + t_0) \quad \text{gdzie: } t_0 = \frac{(2l - L_0)(2l - L_0 + 1)}{\mu(\rho(2l - L_0 + 1) - (2l - L_0))} \quad (4)$$

$$(d) \quad L_0 > 2l: \quad L(t) = L_0 + \left(\frac{\rho - L_0}{L_0 + 1} \right) \mu t \quad \text{jeżeli } 0 \leq t \leq t_e \quad (5)$$

$$L(t) = 2l - F_n(t - t_e) \quad \text{jeżeli } t > t_e \quad \text{gdzie: } t_e = \frac{(2l - L_0)}{\mu \left(\frac{\rho - L_0}{L_0 + 1} \right)} \quad (6)$$

Straty czasu w jednostkowym interwale czasu można obliczać ze wzoru [7]:

$$D = \frac{1}{t \int_0^t L(t) dt} \quad (7)$$

Na podstawie natężenia ruchu, przepustowości w danym jednostkowym interwale czasu oraz długości kolejek na początku interwału można obliczyć długości kolejek na końcu jednostkowego interwału czasu oraz określić maksymalne straty czasu wynikające z oczekiwania pojazdów w kolejce.

2.2. Straty czasu wynikające z geometrii ronda

Geometryczne straty czasu spowodowane są obecnością skrzyżowania na trasie ruchu pojazdu. Pojazdy podczas przejazdu przez skrzyżowanie zmuszone są do zmniejszania prędkości. Dodatkowo w przypadku skrzyżowania typu rondo pojazdy muszą się poruszać po „esowatym” torze ruchu. Ten typ strat czasu dotyczy każdego pojazdu na rondzie i nie zależy od pory dnia. Geometryczne straty czasu są szczególnie widoczne w okresach pozaszczytowych. W godzinie szczytu straty czasu wynikające z oczekiwania pojazdu w kolejce są większe niż geometryczne straty czasu. Aby ocena funkcjonowania rond była dokładna, należy określić geometryczne straty czasu pojazdów. Wzór na geometryczne straty czasu zbudowali McDonald, Hounsell i Kimber w 1984 r. (Semmens w 1985 r.), bazując na

obszernych obserwacjach ruchu wykonanych na drogach publicznych. Straty czasu, jakie ponosi każdy pojazd, obliczane są jako różnica pomiędzy [1]:

- czasem potrzebnym pojazdowi na przejazd przez skrzyżowanie pomiędzy dwoma punktami, w momencie gdy zaczyna się opóźnienie oraz kończy się przyspieszenie pojazdu, oraz
- czasem potrzebnym pojazdowi na przejazd pomiędzy tymi dwoma punktami w przypadku braku skrzyżowania na trasie ruchu pojazdu.

Obydwa czasy zależą od prędkości na wlocie i na wylocie ronda oraz pewnych parametrów geometrycznych ronda. Wzór na geometryczne straty czasu jest następujący [7]:

$$\frac{(V_A - JS)}{a_{AB}} + \frac{(V_D - JS)}{a_{CD}} + \frac{d_{BC}}{JS} - \frac{(d_1 + d_{AB})}{V_A} - \frac{(d_2 + d_{CD})}{V_D} \quad [s] \quad (8)$$

gdzie:

V_A, V_D - odpowiednio prędkość na wlocie ronda oraz prędkość na wylocie ronda, pomierzone w miejscu, gdzie obecność ronda nie wpływa na prędkość pojazdu w [m/s],

JS - prędkość pojazdu w obrębie ronda w [m/s],

a_{AB} - opóźnienie pojazdu na wlocie ronda dane wzorem [7]:

$$a_{AB} = 1.06 \cdot \frac{(V_A - JS)}{V_A} + 0.23 \quad \frac{m}{s^2} \quad (9)$$

a_{CD} - przyspieszenie pojazdu na wylocie ronda dane wzorem [7]:

$$a_{CD} = 1.11 \cdot \frac{(V_D - JS)}{V_D} + 0.02 \quad \frac{m}{s^2} \quad (10)$$

d_{BC} - odległość w [m] przebyta przez pojazd w obrębie ronda,

d_1, d_2 - odpowiednio odległość pomiędzy środkiem ronda a wlotem na rondo oraz środkiem ronda a wylotem z ronda w [m],

d_{AB} - odległość w [m], poza którą występuje opóźnienie (w stronę ronda) dana wzorem [7]:

$$d_{AB} = \frac{(V_A^2 - JS^2)}{2a_{AB}} \quad [m] \quad (11)$$

d_{CD} - odległość na wylocie ronda, od której pojazd zaczyna przyspieszać, dana wzorem [7]:

$$d_{CD} = \frac{(V_D^2 - JS^2)}{2a_{CD}} \quad [m] \quad (12)$$

Geometryczne straty czasu dla pojazdów skręcających w lewo [7]:

$$JS = 0.84 \cdot (\sqrt{ER} + \sqrt{EXR}) \quad [m] \quad (13)$$

gdzie:

ER, EXR - promienie skreśu odpowiednio na wlocie i na wylocie w [m].

Geometryczne straty czasu dla pojazdów jadących na wprost, gdy $0.5 \cdot (ENA + EXA) \leq 20^\circ$

$$[7]: \quad JS = 0.47 \cdot Y + 0.035 \cdot SD - 1.18 \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (14)$$

gdzie:

ENA - kąt wlotu na rondo $[^\circ]$,

EXA - kąt wylotu z ronda $[^\circ]$,

$$Y = 0.5 \cdot (V_A + V_D) \quad \left[\frac{m}{s} \right],$$

DS - odległość widoczności [m].

Geometryczne straty czasu dla pojazdów skręcających w prawo oraz pojazdów jadących na wprost, gdy $0.5 \cdot (ENA + EXA) > 20^\circ$ [7]:

$$JS = 0.96 \cdot \sqrt{D} + 2.03 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (15)$$

gdzie:

D - średnica ronda [m].

Jeżeli obliczona wartość $JS > V_A$, to $JS = V_A$ i $d_{AB} = 0$. Podobnie, jeżeli $JS > V_D$, to $JS = V_D$ i $d_{CD} = 0$. Jeżeli $JS > V_A$ i jeżeli $JS > V_D$, to $JS = 0.5 \cdot (V_A + V_D)$. W przypadku gdy obliczona wartość strat czasu jest mniejsza niż zero, to obliczona wartość strat czasu przyjmuje wartość zero [7].

3. METODA OBLICZANIA STRAT CZASU W AUSTRALII

Podstawą wzorów używanych w Australii do określania strat czasu na rondach są prace Aventa, Taylora i Troutbecka.

3.1. Straty czasu wynikające z oczekiwania pojazdów w kolejce

Podobnie jak w procedurze obliczania przepustowości do obliczeń strat czasu pojazdów ponoszonych na rondzie początkowo przyjęto wzór Tannera na określenie strat czasu wraz z parametrami luki Aventa i Taylora z 1979 r. Dunne i Buckley sprowadzili wzór Tannera na straty czasu do prostszej, następującej postaci [1]:

$$D = \frac{D_{\min} + \eta x}{1 - x} \quad (16)$$

gdzie:

x - stopień nasycenia ruchem w jednostkowym okresie czasu określane jako iloraz natężenia ruchu na wlocie do przepustowości wlotu [-],

$D_{\min}$ - straty czasu (nazywane „stratami Adamsa”) [s], obliczane z następującego wzoru:

$$D_{\min} = e^{Q_c(\tau - \Delta)} - T - \frac{1}{Q_c} - \frac{\Delta^2 Q_c}{2} \quad (17)$$

gdzie:

$$\eta = \frac{e^{Q_c T_0} - Q_c T_0 - 1}{Q_c (e^{Q_c T_0} - 1)} \quad (18)$$

Wzór Troutbecka na straty czasu ponoszone przez pojazdy oczekujące w kolejce ma postać [10]:

$$D_{\min} = \frac{e^{\lambda(\tau - \Delta)}}{Q_c \alpha} - T - \frac{1}{\lambda} - \frac{\lambda \Delta^2 - 2\Delta + 2\Delta \alpha}{2(\Delta \alpha + \alpha)} \quad (19)$$

Troutbeck zmodyfikował swoje równanie, biorąc pod uwagę straty czasu pojazdu spowodowane obecnością kolejki na pasie (pasach) na wlocie podczas przybycia pojazdu na wlot. Wtedy średnia wartość strat czasu wynosi [10]:

$$D = D_{\min} + \frac{3600kx}{Q_c(1-x)} \quad (20)$$

gdzie:

k - parametr strat czasu określany ze wzoru $k = \frac{D_{\min} Q_e}{3600}$,

x - stopień nasycenia ruchem w jednostkowym okresie czasu, obliczany jako iloraz natężenia ruchu na wlocie do przepustowości wlotu [-],

Q_e - przepustowość pasa ruchu na wlocie ronda [P/h].

Wyżej wymienione wzory na straty czasu przedstawiają modele w ustabilizowanym stanie. W celu lepszego dopasowania modelu do rzeczywistych warunków Akcelik i Troutbeck utworzyli nowy model strat czasu zależny od czasu. Model ten jest dany wzorem (21). Wzór ten jest stosowany przez australijskie wytyczne projektowania (Austroad Design Guideline z 1993), ale z zastąpieniem wartości „ $8k$ ” nowym parametrem „ m ” [1].

$$D = D_{\min} + 900 \cdot \left[Z + \sqrt{Z^2 + \frac{8kx}{Q_e H}} \right] \quad (21)$$

gdzie:

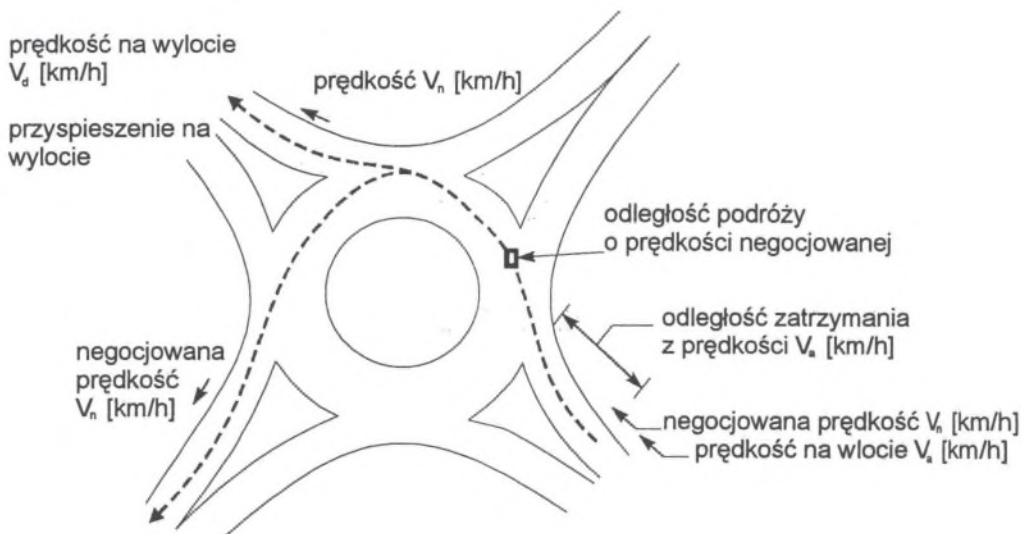
H - jednostkowy okres czasu,

x - stopień nasycenia ruchem w jednostkowym okresie czasu, obliczany jako iloraz natężenia ruchu na wlocie do przepustowości wlotu [-],

$Z = x - 1$.

3.2. Straty czasu wynikające z geometrii ronda

Wyróżnia się dwa rodzaje geometrycznych strat czasu ponoszonych przez pojazdy na rondach. Pierwszy rodzaj występuje w wyniku zatrzymania pojazdu, drugi w przypadku gdy pojazd nie zatrzymuje się na rondzie (pierwsze z wymienionych strat czasu są dłuższe).



Rys. 1. Definicje terminów użytych do określania geometrycznych wartości strat czasu pojazdów

Fig. 1. Definition of the terms used in geometric delay formula

Źródło: [1, str. 75].

Australijski zarząd dróg (NAASRA – National Association of Australian State Road Authorities) w 1986 r. podał wartości strat czasu dla obydwu wyżej wymienionych przypadków. Wartości te można znaleźć w [1]. Rysunek 6 podaje definicje terminów użytych do określania geometrycznych wartości strat czasu pojazdów.

Prawdopodobieństwa zatrzymania pojazdu uzyskane za pomocą symulacji luk akceptowanych zaproponowane zostały przez australijskie wytyczne projektowania Austroad (odczytuje się je na podstawie wykresów, biorąc pod uwagę udział pojazdów zatrzymanych na wlocie dla rond jednopasowych oraz dla rond wielopasowych). Średnia wartość geometrycznych strat czasu dana jest wzorem [1]:

$$D_G = P_s \cdot D_s + (1 - P_s) \cdot D_u \quad [s/P] \quad (22)$$

gdzie:

D_G - średnia wartość geometrycznych strat czasu [s/P],

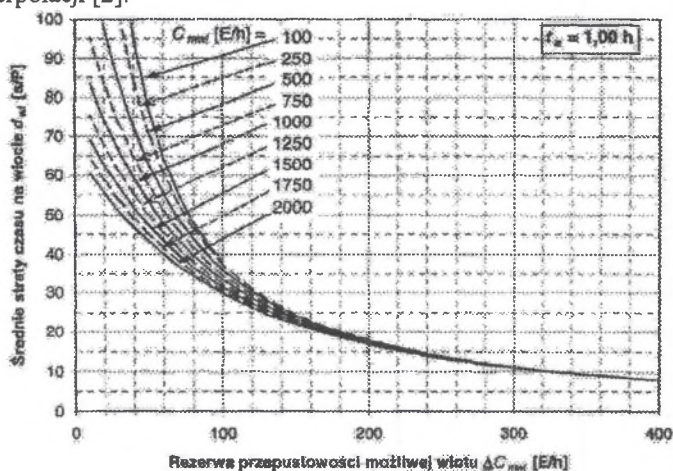
P_s - udział pojazdów zatrzymanych,

D_s - wartość geometrycznych strat czasu dla pojazdów zatrzymanych [s/P],

D_u - wartość geometrycznych strat czasu dla pojazdów niezatrzymanych [s/P].

4. METODA OBLICZANIA STRAT CZASU W POLSCE

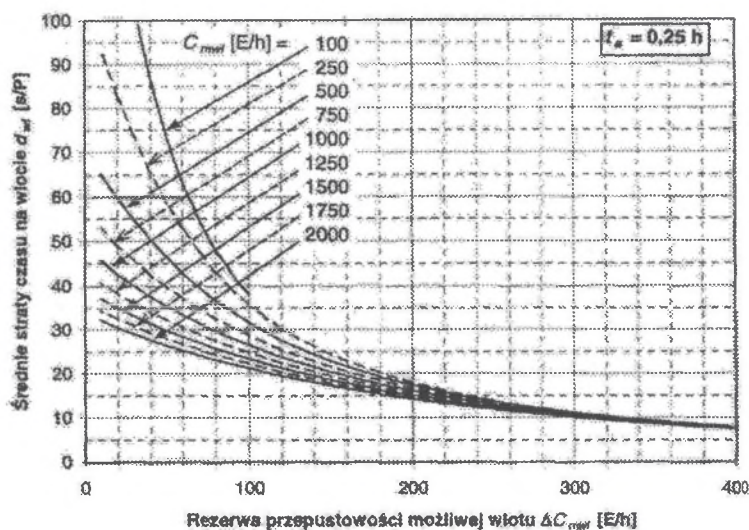
Im większa jest rezerwa przepustowości możliwej, tym lepsze warunki panują na wlocie przy danym natężeniu nadrzędnym. Związek między średnimi stratami czasu d_{wl} pojazdów wjeżdżających na jezdnię ronda z wlotu wl a rezerwą przepustowości możliwej ΔC_{mwl} i przepustowością możliwą wlotu C_{mwl} przedstawiają rysunek 2 (dla okresu analizy $t_a = 1,00$ h) i rysunek 3 (dla okresu analizy $t_a = 0,25$ h). Dla innych niż podane na wykresach wartości przepustowości możliwej C_{mwl} wlotu przy odczycie średnich strat czasu d_{wl} należy dokonywać interpolacji [2].



Rys. 2. Wykres do wyznaczania średnich strat czasu na wlocie ronda przy okresie analizy $t_a = 1,00$ h

Fig. 2. The diagram for assign average delays on small roundabouts for $t_a = 1,00$ h

Źródło: [2, str. 40].



Rys. 3. Wykres do wyznaczania średnich strat czasu na wlocie ronda przy okresie analizy $t_a = 0,25$ h

Fig. 3. The diagram for assign average delays on small roundabouts for $t_a = 0,25$ h

Źródło: [2, str. 40].

Dla dokładnego obliczenia strat czasu d_{wl} [s/P] można skorzystać ze wzorów:

dla: $0,0 < \frac{Q_{wl}}{C_{mwl}} \leq 0$:

$$d_{wl} = 1,12 \cdot \left[\frac{3600}{C_{mwl}} + 900 \cdot t_a \cdot \left\{ \left(\frac{Q_{wl}}{C_{mwl}} - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{Q_{wl}}{C_{mwl}} - 1 \right)^2 + \frac{3600}{450 \cdot t_a} \cdot \frac{Q_{wl}}{C_{mwl}}} \right\} \right] + \frac{0,027}{1 - 0,99 \cdot \frac{Q_{wl}}{C_{mwl}}} - 2,2 \quad [\text{s/P}] \quad (23)$$

dla: $1,0 < \frac{Q_{wl}}{C_{mwl}} \leq 1,2$:

$$d_{wl} = 1,12 \cdot \left[\frac{3600}{C_{mwl}} + 900 \cdot t_a \cdot \left\{ \left(\frac{Q_{wl}}{C_{mwl}} - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{Q_{wl}}{C_{mwl}} - 1 \right)^2 + \frac{3600}{450 \cdot t_a} \cdot \frac{Q_{wl}}{C_{mwl}}} \right\} \right] + 0,5 \quad [\text{s/P}] \quad (24)$$

gdzie:

d_{wl} - średnia strata czasu przypadająca na pojazd analizowanego wlotu ronda [s/P],

C_{mwl} - przepustowość możliwa wlotu ronda [E/h],

Q_{wl} - obliczeniowe natężenie ruchu na wlocie,

t_a - okres analizy ($t_a = 1,00$ lub $t_a = 0,25$) [h].

Literatura

1. Taekratok T.: Modern Roundabouts for Oregon. Oregon Department of Transportation. Research Unit, 200 Hawthorne SE, Suite B-240 Salem, OR 97310, June 1998.
2. Metoda obliczania przepustowości rond. Instrukcja obliczania. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2004.
3. Woch J.: Przepustowość złożonych węzłów transportowych. Centrum Zastosowań Matematyki Instytutu Matematycznego PAN. Ogólnopolska Konferencja Zastosowań Matematyki, Zakopane 2002.
4. Woch J.: A queueing theory model for traffic flow. Materiały Konferencji: Modelling and Management in Transportation. Volume 1. Euro Working Group on Transportation, Poznań – Kraków 1999, strony 295- 300.
5. Golias J.: Gap acceptance, delay and capacity for vehicles crossing a priority stream. Doct. Thesis. Transport Studies Group, University College London 1981 (fragmenty dostępne internetowo).
6. Hashim M. N., Al.-Madani: Dynamic vehicular delay comparison between a police – controlled roundabout and a traffic signal. Transportation Research Part A 37 (2003) str. 681 – 688. Bahrain 2003.
7. Kimber R. M. and Hollis E.: Traffic queues and delays at road junctions. Transport and Road Research Laboratory, Laboratory Report 909. Crowthorne, England 1979.
8. Lawrence Seiberlich E.: A formulation to evaluate capacity and delay of multilane roundabouts in the United States for implementation into a travel forecasting model. A thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science In Engineering. The University of Wisconsin-Milwaukee, December 2001.
9. Roundabouts Improve Safety, Reduce Delays. Consumers Research Magazine, September 2000, Vol. 83, Issue 9, str. 27.
10. Troutbeck R. J.: Average delay at an unsignalized intersection with two major streams each having a dichotomized headway distribution. Transportation Science 20(4), 1986.

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

Praca wykonana w ramach badań własnych BW-423/RT5/2006