

ANDRZEJ RUDNICKI

prof. dr hab. inż., emerytowany
pracownik Politechniki Krakow-
skiej, e-mail: ar@transys.wil.
pk.edu.pl

Poziom jakości usług zapewniany transportowi zbiorowemu przez odcinek ulicy według podręcznika HCM-2010¹

Streszczenie: Celem artykułu jest udostępnienie polskiemu czytelnikowi metody oceny jakości obsługi pojazdów pasażerskiego transportu zbiorowego przez ciąg uliczny. Analizowana metoda została opisana w wydaniu z 2010 roku prestiżowego amerykańskiego podręcznika Highway Capacity Manual, poświęconego badaniu i obliczaniu przepustowości infrastruktury drogowej. Metoda ta oblicza składniki strat czasu powodowane zatrzymywaniem się autobusów na przystankach oraz wynikające z działania urządzeń sygnalizacji świetlnej. Kwantyfikowane są komponenty podróży oraz waga częstotliwości kursowania autobusów. Uwzględnia się elastyczność popytu oraz postrzeganie przez pasażera warunków odbywania podróży, w tym relację pomiędzy uciążliwością oczekiwania i jazdy. Prowadzi to do stworzenia syntetycznego wskaźnika, na podstawie którego określa się poziom jakości obsługi pojazdów transportu zbiorowego przez odcinek ulicy. Przedstawiono wyniki wtrywkowych pomiarów oraz obliczeń przeprowadzonych dla dwóch ciągach ulic w Krakowie, które umożliwiły wstępną ocenę zgodności wyników metody z własnymi danymi doświadczalnymi. Liczne komentarze odnoszą się do interpretacji pojęć i wzorów, a także zawierają uwagi krytyczne wobec metody. Wnioski końcowe skupiają się na ocenie trafności i przydatności metody HCM oraz zarysowują zakres potrzebnych badań w celu adaptacji tej metody do warunków polskich.

Słowa kluczowe: transport zbiorowy, jakość transportu zbiorowego, metoda HCM.

Wprowadzenie

Highway Capacity Manual (HCM) stanowił – począwszy od pierwszego wydania w 1950 roku – ogólnosiwiatowy kanon inżynierii ruchu w zakresie analiz przepustowości dróg. Kolejne wydania podręcznika, choć dotyczyły warunków amerykańskich, to jednak stawały się podstawą do działań adoptujących jego ustalenia do warunków wielu krajów, a także inspiracją do tworzenia własnych metod oceny przepustowości.

W poprzednich edycjach podręcznika HCM miernik poziomu usług (*Level of Service* – LOS) był tylko określany dla głównego dominującego użytkownika drogi tj. samochodu. Nowością w edycji podręcznika HCM-2010 [3] jest rozszerzenie metodologii oceny LOS także dla pieszego, roweru oraz pojazdu transportu zbiorowego (tj. autobusu), czyli takie ujęcie obejmuje już wszystkich użytkowników systemu drogowego.

Ogólnie metodyka LOS wywodzi się z jakościowych przejawów spełnienia wymagań użytkownika wobec odcinka drogi. Kładzie się nacisk na wydajność środka lokomocji i minimalizację strat czasu. W odniesieniu do samochodu, LOS bazuje na gęstości pojazdów w ruchu oraz częstości występowania zdarzeń (np. wyprzedzanie, zatrzymanie) i na tej

podstawie klasyfikuje poziomy usług, poczynając od warunków ruchu swobodnego (poziom A), a kończąc na poziomie F (sytuacja z występującymi przerwami w ruchu). W [1] przedstawiono metodę oceny jakości obsługi ruchu samochodowego wg HCM-2010 oraz częściową adaptację tej metody do warunków polskich. Obejmuje ona oceny prędkości w ruchu swobodnym wraz z badaniami wybranych czynników na nią wpływających. Analiza odnosi się tylko do zamiejskich dwupasowych dróg dwukierunkowych.

Metody opisane w HCM-2010, w szczególności oceny LOS, odnoszą się do różnych działań: eksploatacyjnych, projektowych, planistycznych. Im bardziej szczegółowy jest stopień analiz, tym precyzyjniej należy przyjmować dane wyjściowe. Im stopień rozważań jest ogólniejszy, tym bardziej można obliczenia upraszczać i przyjmować niespecyficznie lokalne, lecz uśrednione lub domyślne wartości danych wejściowych i współczynników.

W HCM-2010, w rozdziale poświęconym LOS dla transportu zbiorowego, jest bardzo dużo odnośników do poszczególnych rozdziałów podręcznika i pojawiają się w nich odniesienia do dalszych jego części lub do innych źródeł. Utrudnia to korzystanie z podręcznika. Odnosi się wrażenie, że pewne kwestie zostały przedstawione niejasno, a nawet pokrętnie. W przypadkach wątpliwych autor niniejszego artykułu przyjął swoją własną interpretację niektórych parametrów charakteryzujących czynniki wpływu na LOS, więc nie ma pewności, że jest to interpretacja prawidłowa, a przede wszystkim zgodna z intencją autorów metody.

Zwarte, syntetyczne ujęcie metody LOS przedstawiono w [6], gdzie wskazano, że posługiwanie się tego typu miernikami jakości usług dla poszczególnych grup użytkowników drogi może zapewnić realizację zrównoważonej polityki transportowej.

Celem artykułu jest zapoznanie polskiego czytelnika z metodą HCM-2010 oceny poziomu jakości obsługi kursujących autobusów transportu miejskiego przez odcinek ulicy.

Opis metody, w tym algorytmu do obliczeń LOS

Ogólny opis metody i jej główne założenia

Podstawą metodyczną do wprowadzenia LOS dla komunikacji autobusowej był raport [5], który przedstawia szczegółowe badania i rekomendacje dotyczące prędkości komunikacyjnej oraz przepustowości przystanków autobu-

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2020.

sowych, uwzględniających bardzo wiele czynników wpływu, w tym natężenie ruchu autobusów oraz obecność sygnalizacji świetlnej.

Miernik LOS może być użyty dla oceny sprawności odcinka ulicy z punktu widzenia obsługi pasażera. Sprawność odcinka ulicy jest oceniana oddzielnie dla każdego kierunku podróży na dwukierunkowym połączeniu. Metoda może być stosowana zarówno w przypadku, gdy autobus dzieli przestrzeń drogową z innymi pojazdami lub gdy ma do dyspozycji specjalny pas. Poniższy opis metody zakłada warunki miejskie oraz funkcjonowanie sygnalizacji świetlnej obsługującej wszystkich użytkowników skrzyżowania. Pominięto przypadek, gdy w ciągu odcinka ulicy znajdują się rondo. Analizy odnoszą się do odcinka korytarza ulicy, w której operuje jedna linia lub wiązka linii.

Metoda odwzorowuje podstawowe typowe procesy ruchu autobusu i obsługi pasażerów, tj. jazdę swobodną, hamowanie przed przystankiem, postój i wymianę pasażerów na przystanku, przyspieszanie po opuszczeniu przystanku, oczekiwanie na wlotach skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, spowalnianie ruchu autobusu w wyniku oddziaływania innych pojazdów. Ma to swój wyraz w procedurze obliczeniowej podzielonej na poszczególne kroki prowadzące finalnie do wyznaczenia wartości LOS:

1. Wyznaczenie czasu przejazdu pojazdu transport zbiorowego w warunkach swobodnego ruchu.
2. Wyznaczenie strat czasu w wyniku zatrzymywania autobusu się na przystankach.
3. Wyznaczenie strat czasu w wyniku oddziaływania sygnalizacji świetlnej.
4. Wyznaczenie prędkości komunikacyjnej.
5. Wyznaczenie wskaźnika interwału obsługi.
6. Wyznaczenie relacji pomiędzy postrzeganym czasem oczekiwania a postrzeganym czasem podróży.
7. Wyznaczenie wartości LOS dla pieszego na drodze dojścia do przystanków.
8. Wyznaczenie wartości LOS dla odcinka ulicy.
9. Wyznaczenie poziomu jakości usług w zakresie skali od A do F.

Metoda odnosi się ogólnie do pojazdów transportu zbiorowego, ale z charakteru szczegółowego opisu procedury obliczeń można wnosić, że są to autobusy ew. trolejbusy. Raczej wyklucza się tramwaje, choć sposób podejścia sugeruje, że mogłyby to także je obejmować, jednak po uwzględnieniu specyficznych dla nich parametrów trakcyjnych.

Podręcznik HCM 2016 [4] rozwinął przedstawioną po raz pierwszy w HCM -2010 tematykę LOS dla pieszych i rowerzystów. Ze spisu treści nie wynika, aby to zadanie zostało podjęte w odniesieniu do transportu zbiorowego. Procedura oszacowania jakości dla pełnej relacji podróży „źródło-cel” została przedstawiona w [9], gdzie scharakteryzowano poszczególne czynniki wpływające na zdolność przewożową oraz na jakość usług wszystkich rodzajów transportu zbiorowego.

Formuły dla oszacowania miernika LOS

Wzory będą podawane nie w wersji źródłowej, lecz już po przeliczeniu amerykańskich jednostek długości (stopa i mila) na metry bądź kilometry. Natomiast zachowano oryginalne oznaczenie symboli. Aby uniknąć wielopiętrowych zapisów we wzorach także utrzymano – jak w oryginalnej – zapis ułamku $\frac{a}{b}$ w postaci ukośnika, tj. a/b.

Prędkość autobusu w ruchu swobodnym

Prędkość S_{Rt} uzyskiwana przez autobus, gdyby nie zatrzymywał się na przystankach oraz na jego ruch nie oddziaływałaby sygnalizacja świetlna, wyznacza się następująco:

$$S_{Rt} = \min \left(S_R, \frac{98}{1 + e^{-1+0,361 N_{ts}/L}} \right) \text{ [km/h]} \quad (1)$$

gdzie:

- S_R – zmotoryzowana prędkość jazdy [km/h],
- N_{ts} – liczba przystanków autobusowych na rozważanym odcinku,
- L – długość rozważanego odcinka ulicy [km].

Komentarz własny

Niezrozumiałe jest, dlaczego tak zdefiniowana prędkość miałyby zależeć od gęstości przystanków występującej we wzorze (1), skoro zakłada się, że S_{Rt} jest prędkością w warunkach niezatrzymywania się na przystankach. Wydaje się uprawnione, aby S_R interpretować jako prędkość dopuszczalną. Można domniemać, że drugi człon we wzorze (1) wyraża prędkość osiąganą przez autobus przy rutynowym wykorzystaniu jego parametrów trakcyjnych. Człon ten dla danych, np. $L = 3$ km i $N_{ts} = 4$ daje wynik 61,5 [km/h], a dla $L = 0,5$ km oraz $N_{ts} = 1$ wynosi 55,9 [km/h]. Obie powyższe wartości prędkości przekraczają typową dopuszczalną prędkość w obszarach zabudowanych, czyli ten człon we wzorze [1] jest aktywny w obszarach niezabudowanych lub, gdy istnieją znaki podnoszące dopuszczalną prędkość powyżej 50 km/h.

Straty czasu autobusu spowodowane obecnością przystanków

Straty czasu mają następujące składniki:

- straty związane z przyspieszaniem i opóźnianiem (hamowaniem) autobusu w obrębie przystanku,
- straty spowodowane obsługą pasażerów na przystanku,
- straty przed ponownym włączeniem się autobusu do ruchu.

Finalne wartości strat czasu d_{ts} wynikające z zatrzymania autobusu na przystanku są zatem sumą:

$$d_{ts} = d_{ad} + d_{ps} + d_{re} \quad (2)$$

Straty czasu d_{ad} autobusu spowodowane opóźnianiem (hamowaniem) przed dojazdem do przystanku, a następnie przyspieszaniem do prędkości jazdy autobusu S_{Rt} wynoszą:

$$d_{ad} = 0,139 S_{Rt} \left(\frac{1}{r_{at}} + \frac{1}{r_{dt}} \right) f_{ad} \quad [s] \quad (3)$$

gdzie:

r_{at} – wartość przyspieszenia [m/s^2],

r_{dt} – wartość opóźnienia [m/s^2],

f_{ad} – udział strat czasu autobusu wywołanych przyspieszaniem i opóźnianiem w obrębie przystanku, lecz nie powodowanych działaniem sygnalizacji świetlnej,

$f_{ad} = g/C$ – gdy przystanek zlokalizowany blisko sygnalizacji świetlnej; w przeciwnym przypadku

$$f_{ad} = 1,$$

g – efektywny czas zielony [s],

C – długość cyklu sygnalizacji świetlnej [s].

Metoda LOS przyjmuje zarówno dla r_{at} i $r_{dt} = 4,0$ [stopa/s²], czyli 1,22 [m/s^2].

Gdy przystanek znajduje się blisko urządzeń sygnalizacji świetlnej, autobus może potrzebować się zatrzymać wyłącznie z powodu tej sygnalizacji. Zatem współczynnik f_{ad} zmniejsza straty czasu wynikające z opóźniania i przyspieszania w obrębie przystanku, gdyż i tak spowolnienie, a nawet zatrzymanie autobusu jest wywołane wpływem sygnalizacji świetlnej. W takich sytuacjach straty czasu na przyspieszanie i opóźnianie są już uwzględniane w innych stratach czasu, opisanych poniżej.

Straty czasu d_{ps} autobusu spowodowane czasem obsługi pasażerów liczy się następująco:

$$d_{ps} = t_d f_{dt} \quad (4)$$

gdzie:

t_d – średni czas wymiany pasażerów [s],

f_{dt} – udział czasu wymiany występujący podczas trwania efektywnego czasu zielonego; dotyczy to przystanku zlokalizowanego blisko skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, $f_{dt} = g/C$; w przeciwnym przypadku $f_{dt} = 1$.

Celem obliczenia strat czasu d_{re} (*reentry delay*) na ponowne włączenie się do ruchu podręcznika HCM-2010 odwołuje się do wymaganych danych wejściowych opisanych w rozdziale będącym wprowadzeniem do metody LOS.

Procedurę stosuje się dla każdego przystanku w obrębie rozważanego odcinka ulicy. Całkowite straty czasu uzyskuje się, sumując straty wyliczone dla poszczególnych przystanków. Pozwala to obliczyć czas t_{Rt} przejazdu odcinka z uwzględnieniem strat wywołanych zatrzymaniami na przystankach:

$$t_{Rt} = \frac{3600 L}{S_{Rt}} + \sum_{i=1}^{N_{ts}} d_{ts,i} \quad [s] \quad (5)$$

gdzie:

L – wyrażone jest w [km],

S_{Rt} [km/h] – opisuje wzór (1).

Komentarze własne

1. Dla prędkości S_{Rt} 50 km/h i powyższych wartości r_{at} i r_{dt} oraz dla warunków, gdy przystanek nie jest zlokalizowany blisko sygnalizacji świetlnej, to wówczas $f_{ad} = 1$ i $d_{ad} = 11,4$ [s]. Droga przyspieszania, a także droga hamowania wynosi $L_h = L_p = 79$ [m]. Zatem jeśli skrzyżowanie nie ma mieć wpływu na czas opóźniania bądź przyspieszania, to przystanek powinien być odległy o co najmniej 79 metrów od skrzyżowania. Nawet w przypadku usytuowania przystanku bezpośrednio za wlotem sygnalizacji świetlnej, odległość czoła przystanku od linii zatrzymania na wlocie skrzyżowania wynosi kilkadziesiąt metrów, czyli rząd wartości długości drogi przyspieszania. W takich przypadkach można założyć, że sygnalizacja świetlna nie redukuje czasu d_{ad} , czyli $f_{ad} = 1$.
2. Przypadek, gdy $f_{dt} \neq 1$ dotyczy chyba tylko sytuacji, gdy przystanek znajduje się bezpośrednio na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, gdyż wówczas czas wymiany może wpisywać się w czas oczekiwania na wlocie skrzyżowania. Nie dotyczy to przypadków lokalizacji przystanku za wylotem takiego skrzyżowania.
3. W [6] jest zalecenie, aby dla oszacowania d_{re} (który jest równy czasowi obsługi kolejki) używać wzoru dla zatrzymań na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną. Skoro straty czasu powodowane funkcjonowaniem sygnalizacji świetlnej są oddzielnie uwzględniane, to zapewne d_{re} dotyczy czasu traconego na włączenie się do ruchu po zakończeniu wymiany pasażerów na przystanku. Tak zinterpretowany czas d_{re} najprościej jest wyznaczać bezpośrednimi pomiarami.
4. Czas d_{re} mógłby obejmować także straty wynikające z autokongestii, czyli wzajemnego oddziaływania autobusów na siebie na przystanku, mogącego spowodować blokowanie autobusu po zakończeniu wymiany pasażerów przez autobus stojący przed nim, lecz nadal wymieniający pasażerów.
5. Obliczenie czasu t_{Rt} przejazdu odcinka, jeszcze bez uwzględnienia strat czasu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną, może dać jedynie pogląd na prędkość przejazdu w przypadku ciągów, na których obowiązują pierwszeństwo na skrzyżowaniach.

Straty czasu ponoszone na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną

Straty d_t występujące w czasie przejazdu autobusu na odcinku ze skrzyżowaniami z sygnalizacją świetlną, dotyczące autobusów przejeżdżających na wprost na skrzyżowaniach, szacuje się następująco:

$$d_t = t_1 L \quad [s/poj.] [s] \quad (6)$$

gdzie:

t_1 – straty jednostkowe [s/km],

L – długość odcinka [km].

Rekomenduje się stosować wartości zawarte w tabeli 1, które utworzono na podstawie postaci źródłowej zawartej

Tabela 1

Oszacowania strat czasu autobusu powodowanych przez sygnalizację świetlną w trakcie przejazdu odcinka ulicy					
Typ obszaru	Pas wykorzystywany przez autobusy	Warunki ruchu	Straty czasu t [s/km] powodowane przez sygnalizację świetlną		
			Stan typowy	Program sygnalizacji dostosowany do potrzeb komunikacji autobusowej	Sygnalizacja występuje częściej niż przystanki
Centrum	Specjalny	Tylko ruch autobusowy	50	25	60 ÷ 75
		Z dopuszczeniem pojazdów skręcających w prawo	75	50	95 ÷ 110
		Blokowanie ruchu autobusów	95 ÷ 110	Brak danych	110 ÷ 130
	W ruchu mieszanym	Jakiegolwiek	110	Brak danych	110 ÷ 150
Inny	Specjalny	Jakiegolwiek	20 ÷ 35	Brak danych	Brak danych
	W ruchu mieszanym	Jakiegolwiek	25 ÷ 55	Brak danych	Brak danych

w [3], lecz już po przeliczeniu jednostek oraz zaokrągleniu zakresów wartości.

Można oczywiście posłużyć się uśrednionymi danymi o charakterze lokalnym lub na podstawie wyników uzyskanych z bezpośrednich pomiarów.

Prędkość komunikacyjna

Prędkość komunikacyjna $S_{Tt,seg}$ autobusu na rozważanym odcinku uwzględnia wszystkie ponoszone straty czasu oraz czas przejazdu odcinka. Oblicza się ją następująco:

$$S_{Tt,seg} = \frac{3600 L}{(t_{Rt} + d_t)} \quad [\text{km/h}] \quad (7)$$

gdzie:

L – długość odcinka [km],

t_{Rt} – czas przejazdu [s], na odcinku – wzór (5),

d_t – straty czasu [s] występujące w czasie przejazdu autobusu na odcinku – wzór (6).

Wskaźnik interwału obsługi

Czas spędzony na oczekiwaniu na autobus zależy od interwału obsługi, czyli od odstępu czasu pomiędzy kolejnymi kursującymi autobusami. Wskaźnik interwału obsługi jest stosunkiem oszacowanego stopnia dogodności oferowanego średniego interwału obsługi do oszacowanego stopnia dogodności bazowego interwału równego 1 godzina. Uwzględnia on elastyczność popytu (wielkość potoku pasażerskiego) wobec zmian interwału obsługi. Podstawą do wyznaczenia wskaźnika interwału obsługi F_h jest podana w [2] stopa elastyczności, której wartość zależy od częstotliwości kursowania autobusów; maleje ona ze wzrostem częstotliwości.

Wskaźnik interwału obsługi F_h oblicza się następująco²:

$$F_h = 4 e^{-1,4/v_s} \quad (8)$$

² Jest to postać po odrzuceniu składników nie mających wpływu na wynik i po zaokrągleniu wartości współczynników. Podany uproszczony wzór na F_h w wyliczanych wartościach daje dopiero na trzecim miejscu po przecinku różnicę w stosunku do wzoru źródłowego.

gdzie:

v_s – częstotliwość kursowania autobusów na rozważanym odcinku [poj./h].

Komentarze własne

1. Stopień dogodności można interpretować jako postrzeżaną przez pasażera przydatność funkcjonalną rozkładowego interwału obsługi. Poniżej zestawiono wartości F_h dla kilku wartości v_s .

v_s [autob./h]	1	2	5	10	20	30	50
F_h	1,0	1,98	3,02	3,48	3,73	3,82	3,89

Z powyższego zestawienia wynika, że wartość F_h wyraża wzrost atrakcyjności (poziomu satysfakcji) obsługi, która rośnie ze wzrostem częstotliwości kursowania autobusów. Np. wzrost z 2 do 10 pojazdów/h przekłada się na wzrost atrakcyjności o 77%, ale wzrost od 10 do 50 pojazdów/h skutkuje już tylko 12% przyrostem atrakcyjności obsługi.

2. Jeden kurs w ciągu godziny nie można uznać w warunkach polskich za minimalną częstotliwość miejską – raczej dwa na godzinę, i ta wielkość powinna być odniesieniem. Nie wiadomo, czy badania elastyczności popytu ze względu na interwał obsługi były w Polsce przeprowadzone, czy też nie są one autorowi znane.

Relacja pomiędzy postrzeżanym czasem oczekiwania a postrzeżanym czasem podróży

Na relację „oczekiwanie – jazda” w transporcie zbiorowym silnie wpływa postrzeżanie przez pasażera nie tylko czasu trwania tych składników podróży, ale też zapewnianych warunków ich odbywania. Postrzeżanie to uwzględnia udogodnienia dostępne na przystanku oraz przypadki opóźnień autobusów i zatłoczeń pasażerami. Wyraża to współczynnik postrzeżanego czasu podróży, którego konstrukcja opiera się na dwóch parametrach:

- wskaźnik postrzeżanego czasu podróży,
- elastyczność popytu spodziewanej liczby pasażerów korzystających z określonego rodzaju transportu publicznego ze względu na zmiany we wskaźniku postrzeżanego czasu podróży.

Współczynnik F_{tt} postrzeżanego czasu podróży estymuje się następująco:

$$F_{tt} = \frac{(e-1) T_{btt} - (e+1) T_{ptt}}{(e-1) T_{ptt} - (e+1) T_{btt}} \quad (9)$$

gdzie:

e – stopa elastyczności popytu (wielkości potoku pasażerskiego) ze względu na zmiany w wartości postrzeżanego czasu podróży; w [3] i [6] zakłada się $e = -0,40$,

T_{btt} – bazowy wskaźnik postrzeżanego czasu podróży, $T_{btt} = 6,0$ [min/mila] dla centrum obszaru metropolitarnego z 5 milionami osób lub więcej; w przeciwnym razie $T_{btt} = 4,0$ [min/mila] $\approx 2,5$ [min/km], tj. odpowiada to prędkości komunikacyjnej 24 km/h.

Przyjmując $e = -0,40$, oraz $T_{\text{btt}} = 2,5$ [min/km] wzór (9) upraszcza się do postaci:

$$F_{\text{tt}} = \frac{0,6 T_{\text{ptt}} + 3,5}{1,4 T_{\text{ptt}} + 1,5} \quad (10)$$

gdzie:

T_{ptt} – wskaźnik postrzeganego czasu podróży [min/km].

$$T_{\text{ptt}} = 0,62 \left(a_1 \frac{60}{S_{\text{T,seg}}} + a_2 T_{\text{ex}} - T_{\text{at}} \right) \quad (11)$$

gdzie:

a_1 – współczynnik wagowy zapełnienia pojazdu, będący funkcją średniego napełnienia autobusu pasażerami na analizowanym odcinku, podczas 15 minutowego okresu szczytu. Po uproszczeniu postaci wzorów oryginalnych otrzymuje się:

$$a_1 = 1,0 \text{ gdy } F_1 \leq 0,8 \quad (12a)$$

$$a_1 = 0,95 F_1 + 0,81 \text{ gdy } 0,8 < F_1 \leq 1,0 \quad (12b)$$

$$a_1 = 1,19 F_1 + 1,12 - 1,12/F_1 \text{ gdy } F_1 > 1,0 \quad (12c)$$

F_1 – średni wskaźnik zapełnienia autobusu pasażerami (stosunek liczby pasażerów do liczby miejsc siedzących).

$S_{\text{T,seg}}$ – prędkość komunikacyjna autobusu na rozważanym odcinku [km/h], liczona wg wzoru [7].

a_2 – współczynnik czasu oczekiwania przekształcający rzeczywisty czas oczekiwania w postrzegany czas oczekiwania; przyjmuje się $a_2 = 2$

T_{ex} – wskaźnik nadmiernego czasu oczekiwania spowodowany opóźnieniami przyjazdu pojazdu transportu zbiorowego:

$$T_{\text{ex}} = t_{\text{ex}} / L_{\text{pt}} \text{ [min/km]} \quad (13)$$

t_{ex} – nadmierny czas oczekiwania spowodowany opóźnieniami przyjazdu [min]

$$t_{\text{ex}} = [t_{\text{late}} (1 - p_{\text{ot}})]^2 \quad (14)$$

gdzie:

t_{late} – progowy czas opóźnienia (jako typową wartość przyjmuje się 5 [min]),

p_{ot} – udział pojazdów transportu zbiorowego przyjeżdżających w zakresie progowego czasu opóźnienia (domyślnie przyjmuje się wartość 0,75).

Przy powyższych wartościach $t_{\text{ex}} = 1,56$ [min].

$$T_{\text{at}} = \frac{1,3 p_{\text{sh}} + 0,2 p_{\text{be}}}{L_{\text{pt}}} \text{ [min/km]} \quad (15)$$

gdzie:

T_{at} – wskaźnik wyrażający stopień zmniejszenia niedogodności oczekiwania na autobus w wyniku udogodnień na przystanku,

L_{pt} – średnia długość podróży pasażera; w [3] i [6] przyjmuje się jako typową wartość $L_{\text{pt}} = 3,7$ [mila] $\approx 6,0$ [km],

p_{sh} – udział przystanków na odcinku z wiatami [liczba niemianowana],

p_{be} – udział przystanków na odcinku z ławkami [liczba niemianowana].

Efekt wynikowy $s_{\text{w-r}}$ relacji postrzeganego czasu oczekiwania oraz postrzeganego czasu jazdy wylicza się następująco:

$$s_{\text{w-r}} = F_{\text{h}} F_{\text{tt}} \quad (16)$$

gdzie:

F_{h} – wskaźnik interwału obsługi wyliczony wzorem (8),

F_{tt} – współczynnik postrzeganego czasu podróży wyliczony wzorem (10).

Komentarze własne

1. Wartość $e = -0,40$ byłaby zbieżna z wynikami innych zagranicznych badań, których konkluzje podano np. w [7]. Autorowi nie są znane badania odnoszące się do warunków polskich w zakresie elastyczności popytu względem czasu podróży lub czasu oczekiwania. W pracy [10] podano tylko wycinkowe badania w zakresie elastyczności cenowej popytu, obejmujące wpływ zmian kosztu biletu komunikacji zbiorowej.
2. Uwzględnienie zmian popytu ma sens w wartościowaniu wzrostu częstotliwości obsługi lub skrócenia czasu jazdy, choć nie jest to zgodne z intuicją, gdyż analiza dotyczy sytuacji konkretnej pomierzonej, czyli nie ma zmiany wartości żadnego z parametrów. Zatem potencjalne zmiany wielkości popytu wywierają nie wprost, lecz tylko pośrednio, wpływ na ocenę jakości.
3. Czas oczekiwania na autobus jest postrzegany przez pasażera jako dwa razy bardziej uciążliwy niż czas jazdy. Wartość $a_2 = 2$ jest też zgodna z wynikami badań w Polsce, np. [7].
4. Czas t_{late} można zatem interpretować jako zakres tolerancji dla opóźnienia będącego wynikiem braku punktualności. Wydaje się, że jest to wartość za duża – w polskich warunkach pasażerowie mogą jeszcze zaakceptować opóźnienie nie przekraczające 4 minut w dużych miastach i 3 minuty w miastach małych i średnich [8]. Ze wzoru (14) wynika, że zwiększenie zakresu tolerancji zwiększa obliczeniowy nadmierny czas oczekiwania (choć wiąże się to ze zmniejszeniem częstotliwości wystąpienia takich przypadków), a zmniejszenie zakresu tolerancji zmniejsza też t_{ex} . Wydaje się to być nielogiczne. Ponadto miarodajna wartość udziału przyjazdów transportu zbiorowego uznanych za punktualne wymaga dużej próby pomiarowej.
5. t_{ex} odzwierciedla czas spędzony na oczekiwaniu na opóźniony – w stosunku do rozkładu jazdy – odjazd autobusu. Z tego wynika, że można go obliczać jako średnią odchyłkę (opóźnienie) od rozkładu jazdy.

W przypadku przyspieszeń odjazdu w stosunku do rozkładu jazdy, jako nadmierny czas oczekiwania należałoby przyjąć długość interwału rozkładowego z uwzględnieniem 1 minuty, jako tolerancji dla wcześniejszego odjazdu.

6. W przypadku wysokich częstotliwości ruchu autobusów (jak np. w teście 1b wynosi ona dla wiązki linii $V_s = 15/h$ – patrz tabela 5), pasażer nie orientuje swoje przyjscie na przystanek stosownie do rozkładu jazdy, czyli w rzeczywistości przyjscia mają charakter losowy. Wówczas wielkość nadmiernego czasu oczekiwania zależy także od regularności (rytmiczności) kursowania autobusów.
7. HCM-2010 wyjaśnia, że L_{pt} ma się odnosić do długości podróży realizowanej na rozważanej linii. Dane takie są w zasadzie niedostępne. Dlatego można się posłużyć średnią długością podróży w mieście uzyskaną z Kompleksowych badań ruchu, biorąc pod uwagę odległości mierzone od analizowanych przystanków do końca przebiegu linii. Im dłuższa podróż, tym mniejszy jest wpływ nadmiernego czasu oczekiwania oraz udogodnień na przystanku.
8. Ułamek we wzorze (11) wyraża rzeczywisty czas spędzony w pojeździe przez podróżnego.
9. W pracy [3] podaje się rozszerzone – w stosunku do ujętych we wzorze (15) – przypadki zwartościowanych udogodnień na przystankach: oświetlenie przystanku oraz rodzaj miejsca siedzącego. Jednakże ich uwzględnienie zakłóciłoby wynik oceny LOS. Kilka opracowań sugeruje, że instalowane wyświetlacze faktycznego czasu przyjazdu najbliższego pojazdu transportu zbiorowego powinny zredukować, a nawet wyeliminować postrzegane niedogodności oczekiwania.
10. Obszerniejszego skomentowania wymaga współczynnik wagowy a_1 zapelnienia pojazdu pasażerami. W ogólności współczynnik wagowy a_1 to stosunek zrealizowanych pasażerokilometrów do dostępnych miejscokilometrów w środkach transportu publicznego. Zatem a_1 określa stopień wykorzystania zdolności przewozowej transportu publicznego i zwykle służy do oceny, jak skutecznie przewoźnik wykorzystuje miejsca i generuje przychody z opłat za przejazdy. W [6] zakłada się, że w przypadku braku danych należy przyjmować stałą wartość $a_1 = 1,0$. Jednak odzwierciedla to tylko przypadki, gdy współczynnik zapelnienia nie przekracza 0,8.

Wzór (12c) HCM-2010 nie ogranicza od góry wartości wskaźnika F_1 zapelnienia autobusu pasażerami. Jednakże zestawione tabelarycznie w [2] wyliczone wartości współczynnika wagowego a_1 kończą się dla $F_1 = 1,6$. W warunkach taboru autobusowego, najczęściej stosowanego w Polsce, stosunek sumarycznej liczby miejsc w autobusie do liczby miejsc siedzących wynosi ok. $3 \div 4$, co oznacza, że przy napełnieniu nominalnym, współczynnik zapelnienia [pasażerów/miejsce siedzące] wynosiłby 3,5 czyli wartość ta znalazłaby się daleko poza zakresem wartości zestawionych we wspomnianej tabeli. Jeszcze wyższe wartości tego

współczynnika odnosiłyby się do przypadków przepełnienia autobusów, tj. gdy liczba pasażerów przekracza pojemność nominalną. Oznacza to niepełne przystawanie tego modułu metody LOS do warunków polskich. Aby jednak zorientować się, jakie wartości dawałby wzór (12c) w szerokim zakresie zmian F_1 , zestawiono je w tabeli 2.

Tabela 2

Wartości wynikające ze wzoru (12c) w szerokim zakresie zmian F_1									
Współczynnik zapelnienia [pasażerów/miejsce siedzące]	$\leq 0,8$	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Współczynnik wagowy zapelnienia pojazdu	1,00	1,19	1,62	2,16	2,94	3,65	4,32	4,97	5,60

Wskaźnik LOS dla pieszego na drodze dojścia do przystanków

Wskaźnik $I_{p,link}$ wyznacza się, korzystając z metody obliczania wskaźnika LOS dla ruchu pieszego przemieszczającego się w korytarzu odcinka ulicy, co zostało szczegółowo opisane w innym rozdziale HCM-2010, a skrótowo – w [6].

Komentarze własne

1. Metoda ta jest również bardzo rozbudowana i wymaga podania wielu danych. W warunkach przeciętych – szerokość chodnika dostępna dla pieszych = 1,5 m oraz natężenie ruchu pieszego 25 osób/minutę, czyli 1500 osób/h, $I_{p,link}$ wynosi ok. 3,0.
2. Metoda LOS dla pieszych w zastosowaniu dla dróg dojścia do przystanków stwarza poważne kłopoty interpretacyjne, gdyż nie wiadomo, jakie i ile takich ciągów brać pod uwagę i jak głęboko mają sięgać w strukturę zabudowy.

Wartość wskaźnika LOS oraz poziomu usług dla transportu zbiorowego na rozważanym odcinku ulicy

Wartość wskaźnika LOS oraz poziomu usług dla transportu zbiorowego na rozważanym odcinku ulicy wylicza się ze wzoru:

$$I_{t,seg} = 6,0 - 1,5 s_{w-r} + 0,15 I_{p,link} \quad (17)$$

gdzie:

- s_{w-r} – wyznacza się wzorem (16),
- $I_{p,link}$ – wskaźnik LOS dla dróg dojścia pieszego do przystanków.

Wyliczona wyżej wartość wskaźnika LOS przekłada się na poziom obsługi zgodnie z przypisaniem podanym w tabeli 3.

Tabela 3

Kryteria poziomów obsługi LOS dla pojazdów transportu publicznego ³	
Poziom obsługi LOS	Wartość wskaźnika LOS
A	$\leq 2,00$
B	$> 2,00 \div 2,75$
C	$> 2,75 \div 3,50$
D	$> 3,50 \div 4,25$
E	$> 4,25 \div 5,00$
F	$> 5,00$

³ Identyczne zakresy dotyczą ruchu rowerowego

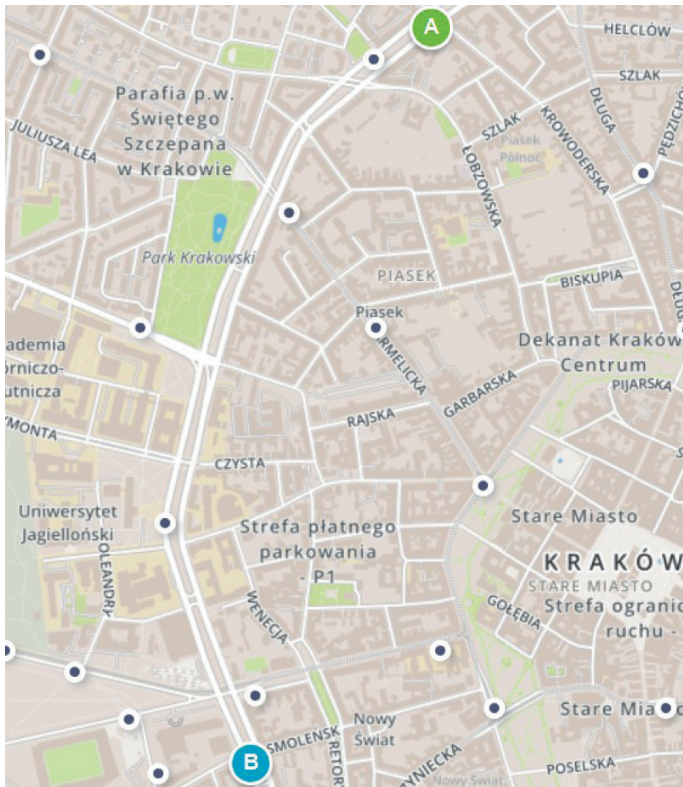
Przykłady obliczeń przy zastosowaniu metody LOS

W podręczniku HCM-2020 przedstawiono trywialny przykład zastosowaniu metody LOS. Dotyczy on bowiem bardzo krótkiego odcinka ulicy (500 m) i tylko z jednym przystankiem. Przykład ten niestety nie rozwiewa wątpliwości interpretacyjnych dotyczących samej metody.

Autor podjął próbę przetestowania metody HCM na czterech przypadkach obejmujących dwa poligony badawcze w Krakowie. Podstawą obliczeń były dane uzyskane z własnych wyrwykowych pomiarów. Zbiorcze wyniki pomiarów i obliczeń przedstawia tabela 5 po omówieniu wszystkich wariantów.

Wyznaczenie LOS dla odcinka w ciągu Alei Trzech Wieszców w Krakowie (testy 1a i 1b)

Testy 1a i 1b odniesiono do odcinka o długości $L = 1,84$ km w ciągu Alei Trzech Wieszców obsługujących liczne linie autobusowe (rys. 1). Aleje stanowią dużą część najważniejszego ciągu Śródmieścia Krakowa, tj. II obwodnicy przenoszącej intensywny ruch pojazdów. Przedmiotem analizy będzie każdy z dwóch kierunków pomiędzy skrzyżowaniami Alei z ulicą Smoleńsk i z ulicą Krowoderską. Odcinek obejmuje $N_{ts} = 4$ przystanki oraz 8 skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Przystanki mają nazwy w kolejności od ulicy Smoleńsk: Muzeum Narodowe, AGH/AR, Plac Inwalidów, Grottgera. Trzy przystanki są usytuowane bezpośrednio za wylotem skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, a jeden na odcinku pomiędzy skrzyżowaniami. Odległość pomiędzy krańcowymi przystankami wynosi 1,62 km, czyli średni odstęp przystanków wynosi 0,54 km, a zatem gęstość przystanków 4:1,84 = 2,17 na 1 km.



Rys. 1. Odcinek badawczy A-B (do testu 1a i 1b) w ciągu Alei Trzech Wieszców w Krakowie (zaznaczony na mapie wyszukiwarki połączeń MPK Kraków)

Ruch autobusów wszystkich linii poruszających się jest bardzo intensywny (około 40/h) i prowadzony po pasie specjalnym (jest nim prawy pas jezdni trzypasowej). Ruch autobusów jest silnie zakłócany przez pojazdy skręcające na skrzyżowaniach w prawo. Pomiar został przeprowadzony 21 lutego 2020 roku (piątek) w szczycie popołudniowym w godzinach od 15:00 do 17:00. Uzyskano dane pomiarowe jako średnie z pięciu przejazdów. Mierzono czas przejazdu odcinka, czasy postoju na poszczególnych przystankach oraz odchyłki od rozkładu jazdy.

Wystąpiły przypadki blokowania odjazdu autobusu przez stojący przed nim pojazd, który jeszcze dokonywał wymiany pasażerów. Czas tracony z tego powodu nie jest już czasem wymiany pasażerów, zatem nie został wliczony do czasu d_{ad} , lecz został uwzględniony w czasie przejazdu odcinka. Ze względu na brak zatok przystankowych i poruszanie się autobusów po pasie specjalnym nie wystąpiły straty czasu na włączanie się do ruchu.

We wzorze (1) wartość dla pierwszego członu można przyjąć jako prędkość dopuszczalną 50 [km/h]. Drugi człon daje wartość 54,3 [km/h], zatem należy przyjąć prędkość przejazdu autobusu bez zatrzymań $S_{Rt} = 50$ [km/h]. Przy takim założeniu prędkości czas przejazdu odcinka wyniósłby 132 [s].

Straty czasu autobusu spowodowane przyspieszaniem i opóźnianiem w obrębie każdego przystanku na odcinku pomiędzy skrzyżowaniami $d_{ad} = 11,4$ [s] a za wylotami skrzyżowań $d_{ad} = 7,2$ [s], czyli w sumie $\Sigma d_{ad} = 33$ [s]. Parametry sygnalizacji świetlnej dla relacji prowadzonej na wprost: $g = 75$ [s], $C = 120$ [s], czyli $g : C = 0,63$.

Dalsze dane do obliczeń są już zróżnicowane dla każdego z kierunków.

1a) Kierunek B→A od ulicy Smoleńsk do ulicy Krowoderskiej (przejazd w stronę Nowego Kleparza)

Ze względu na to, że wzdłuż tego odcinka linie autobusowe rozgałęziają się kilkakrotnie, analizą objęto tylko jedną linię nr 179, kursującą do Dworca Głównego PKP. Rozkładowy interwał obsługi na linii nr 179 wynosi 12 minut, czyli częstotliwość kursowania autobusów $v_s = 5$ na godzinę. Pomierzony średni sumaryczny czas postoju na przystankach $\Sigma d_{ps} = 76$ [s], czyli średnio $t_{ps} = 19$ [s].

Ponieważ przystanki nie są zlokalizowane na wlotach skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, to $f_{dt} = 1$, a finalne wartości strat czasu wynikające z zatrzymania $\Sigma d_{ts} = 33 + 76 = 109$ [s]. Czas przejazdu odcinka bez strat wywołanych działaniem sygnalizacji świetlnej $t_{Rt} = 132 + 109 = 241$ [s].

Wobec blokowania autobusów przez pojazdy na pasie specjalnym z tabeli 1 odczytuje się straty jednostkowe – przyjęto średnią wartość $t_1 = 120$ [s/km], czyli na całym odcinku wyniosą $d_t = 221$ [s], zatem całkowity obliczeniowy czas przejazdu $t_{Rt} + d_t = 241 + 221 = 462$ [s], co daje prędkość komunikacyjną podróży autobusu na rozważanym odcinku $S_{Tt,seg} = 14,3$ [km/h].

Pomierzony średni czas przejazdu odcinka (średnia z 5 przejazdów) wyniósł $\bar{t} = 476$ [s]. Przy przyjęciu poziomu

ufności 0,10, przedział ufności na czas przejazdu odcinka to $403 < t < 549$ [s].

Wyliczony całkowity czas przejazdu $t = 462$ [s] nie tylko mieści się w przedziale ufności dla czasu pomierzonego, lecz nawet jest dość bliski jego wartości średniej. Zatem procedura obliczeniowa w tym przypadku dość trafnie oszacowuje rzeczywisty czas przejazdu odcinka, a tym samym pomierzoną prędkość komunikacyjną (13,9 km/h).

Dla częstotliwości kursowania autobusów na rozważanym odcinku $v_s = 5$ [poj./h] wskaźnik interwału obsługi $F_h = 3,02$. Zarejestrowane odchyłki od rozkładu jazdy – wszystkie będące opóźnieniami – zawierały się w przedziale od 2 do 9 minut, średnio $t_{ex} = 4,1$ [min]. Stosunkowo wysokie opóźnienia wynikają z tego, że do miejsca początku odcinka autobusy przejeżdżają (przy długim 33-minutowym czasie według rozkładu jazdy) przez strefę kongestii ruchu na ciągach ulic, bez pasa specjalnego, prawie na całej długości swego przebiegu. Przyjmując domyślną średnią długość podróży $L_{pt} = 6$ [km] (jest to wartość bardzo zbliżona do średniej długości podróży w Krakowie), otrzymuje się wskaźnik nadmiernego czasu oczekiwania spowodowany opóźnieniami przyjazdu $T_{ex} = 0,68$ [min/km].

Stosunek liczby pasażerów do liczby miejsc siedzących oszacowano w czasie pomiarów jako przeciętną wartość $F_1 = 1,4$, dla której $a_1 = 1,99$. Ponieważ wszystkie przystanki są wyposażone w wiaty i ławki, zatem wskaźnik $T_{at} = (1,3 + 0,2) / 6 = 0,25$. Na podstawie powyższych danych można wyliczyć parametr postrzeganego czasu podróży $T_{ptt} = 9,45$ [min/km] i następnie $F_{tt} = 0,62$, $s_{w-r} = 1,87$. Przyjmując wartość LOS dla dojeżdżających pieszych $I_{p,link} = 3,0$, wartość wskaźnika LOS dla transportu zbiorowego na rozważanym odcinku wynosi $I_{p,seg} = 3,64$. Zgodnie z tabelą 2 odpowiada to poziomowi D jakości obsługi komunikacji autobusowej na danym odcinku [przez dany odcinek]. Gdyby pominąć wpływ zapelnienia autobusu pasażerami (domyślnie $a_1 = 1$), to uzyskuje się $I_{p,seg} = 2,57$, czyli poziom obsługi B.

1b) Kierunek A→B od ulicy Krowoderskiej do ulicy Smoleńsk (przejazd w stronę mostu Dębnickiego)

Dla tego kierunku analizą objęto nie pojedynczą linię, lecz wiązkę linii podążających wspólnie na dużej długości dalszego wspólnego przebiegu. W tabeli 4 zestawiono badane linie i ich parametry obsługi.

Tabela 4

Badane linie i ich parametry obsługi w wariantach 1b				
Nr linii	164	169	179	469
Interwał rozkładowy [min]	12	24	12	24
Częstotliwość kursowania [autob./h]	5	2,5	5	2,5

Częstotliwość obsługi dla całej wiązki wynosi $v_s = 15$ autobusów/h.

Można założyć, że dominująca liczba pasażerów wsiadających na przystankach w kolejności o nazwach: Grottgera, Plac Inwalidów, AGH/AR, Muzeum Narodowe będzie mogła wybrać dowolny autobus tej wiązki.

Dalszy tok obliczeń przebiega jak dla testu 1a, cząstkowe i końcowe wyniki zestawiono w tabeli 5. Niektóre z nich dalej skomentowano.

Wobec blokowania autobusów na pasie specjalnym, w tym wyniku autokongestii, z tabeli 1 przyjęto górną granicę straty jednostkowej $t_1 = 130$ [s/km]. Pomierzony średni czas przejazdu odcinka wyniósł $\bar{t} = 502$ [s]. Przy przyjęciu poziomu ufności 0,10, przedział ufności na czas przejazdu odcinka to $485 < t < 519$ [s]. Wyliczony całkowity czas przejazdu $t = 471$ [s] jednak nie mieści się w przedziale ufności dla czasu pomierzonego. Zatem procedura obliczeniowa w tym przypadku nietrafnie oszacowuje rzeczywisty czas przejazdu odcinka, a tym samym przeszacowuje pomierzoną prędkość komunikacyjną (13,2 km/h). Na niską pomierzoną prędkość ma zapewne wpływ duża gęstość skrzyżowań z sygnalizacją świetlną równa 3,8 na km, przy ich średnim odstępnie 263 m.

Zarejestrowane odchyłki od rozkładu jazdy – dwa odjazdy były punktualne, a pozostałe opóźnione o 4, 6 i 8 minut, czyli średnia odchyłka $t_{ex} = 3,6$ [min.]

Gdyby uwzględnić nieobliczeniową, tj. 14,1 [km/h], lecz pomierzoną prędkość komunikacyjną = 13,2 [km/h], to otrzymuje się $I_{p,seg} = 3,50$, czyli wartość nieznacznie większą od wartości uzyskanej dla prędkości obliczeniowej $I_{p,seg} = 3,48$, co jeszcze sytuuje LOS na poziomie C.

Porównując wyniki obu kierunków przejazdu odcinków, widać, że dla kierunku od ulicy Krowoderskiej do ulicy Smoleńsk (1b) poziom usług jest wyższy niż na przeciwnym kierunku (1a), pomimo że na kierunku 1b) napelnienie autobusów było wyraźnie wyższe. Jednak wpływ bardzo wysokiej częstotliwości kursowania autobusów na kierunku 1b) spowodował zneutralizowanie uciążliwości jazdy przy dużych napelnieniach.

Wyznaczenie LOS dla odcinka w ciągu ul. Opolskiej w Krakowie (testy 2a i 2b)

Testy 2a i 2b odniesiono do odcinka o długości $L = 2,64$ km w ciągu ulicy Opolskiej (rys. 2) stanowiącej północny fragment III obwodnicy Krakowa i prowadzącej bardzo intensywny ruch pojazdów. Ulica Opolska o sześciu pasach ruchu przebiega pomiędzy osiedlami mieszkaniowymi o wysokiej intensywności zabudowy. Przedmiotem analizy będzie każdy z dwóch kierunków pomiędzy: punktem położonym 140 m na wschód od skrzyżowania ulic Opolskiej i Mackiewiczza, a punktem położonym 200 m na zachód od włączenia ulicy Mehoffera do ulicy Opolskiej. Odcinek obejmuje $N_{ts} = 4$ przystanki oraz 6 skrzyżowań i dwa przejścia z sygnalizacją świetlną wzbudzaną przez pieszych, w tym jedno na włączeniu ulicy Mehoffera do ulicy Opolskiej. Przystanki mają nazwy w kolejności od kierunku wschodniego do zachodniego: Mackiewiczza, Pleszowska, Kładka, Mehoffera. Trzy przystanki są usytuowane bezpośrednio za wylotem skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, a jeden na odcinku pomiędzy skrzyżowaniami (w rejonie kładki dla pieszych nad ulicą Opolską). Gęstość sygnalizacji świetlnej wynosi zatem około 3 na km (średni odstęp 330 m). Odległość pomiędzy krańcowymi przystankami wynosi



Rys. 2. Odcinek badawczy A-B (test 2a i 2b) w ciągu ulicy Opolskiej w Krakowie (źródło mapy – jak dla rysunku 1)

2,40 km, czyli średni odstęp przystanków wynosi 0,80 km, a zatem gęstość przystanków to 1,25 na 1 km.

Pomiar został przeprowadzony 19 lutego 2020 roku (środa) w godz. 9:30 do 12:30, czyli w okresie pomiędzy szczytami ruchu. W tym okresie na analizowanym odcinku kursuje tylko jedna linia autobusowa nr 172 z interwałem rozkładowym 15 minut, obsługiwana przez autobusy wielkopojemne. Wszystkie przystanki poza jednym są zlokalizowane w zatokach. Uzyskano dane pomiarowe jako średnie z pięciu przejazdów. Mierzono czas przejazdu odcinka, czasy postoju na poszczególnych przystankach, straty czasu na włączanie się do ruchu, czasy postoju na wlotach skrzyżowań oraz odchyłki od rozkładu jazdy.

Wystąpiły przypadki oczekiwania autobusów na przystankach, na uzyskanie zgodności czasu odjazdu w rozkładem jazdy. Czas ten, jako nie związany z wymianą pasażerów, nie został wliczony do czasu d_{ad} , lecz został uwzględniony w czasie przejazdu odcinka.

Na badanym odcinku dopuszczalna prędkość pojazdów została podniesiona do 70 km/h, więc we wzorze (1) wartość dla pierwszego członu można przyjąć 70 [km/h], drugi członek daje wartość 60,0 [km/h]. Zatem należy przyjąć czas przejazdu autobusu bez zatrzymań $S_{Rt} = 60$ [km/h]. Przy takiej prędkości czas przejazdu odcinka wyniósłby 158 [s].

Zestawienie wszystkich wyników pomiarów oraz obliczeń LOS zawiera tabela 5.

2a) Kierunek A→B od ulicy Mackiewiczza do ulicy Meboffera

Pomierzony średni czas przejazdu odcinka $\bar{t} = 480$ [s]. Przy przyjęciu poziomu ufności 0,10 przedział ufności na czas przejazdu odcinka to $412 < t < 548$ [s]. Wyliczony całkowity czas przejazdu $t = 422$ [s] mieści się jeszcze w przedziale ufności dla czasu pomierzonego, ale znacznie odbiega od pomierzonej średniej 480 [s]. Zatem w tym przypadku procedura obliczeniowa niezbyt trafnie oszacowuje rzeczywisty czas przejazdu odcinka, a tym samym przeszacowuje (22,5 km/h) pomierzoną prędkość komunikacyjną (19,8 km/h). Na zmniejszenie prędkości ma zapewne wpływ duża gęstość skrzyżowań z sygnalizacją świetlną oraz przypadki wydłużenia przebywania autobusu na przystanku (co być może świadczy o nierealistycznym rozkładzie jazdy), tak aby uzyskać zgodność odjazdu z rozkładowym czasem.

2b) Kierunek B→A od ulicy Meboffera do ulicy Mackiewiczza

Pomierzony średni czas przejazdu odcinka $\bar{t} = 572$ [s]. Przy przyjęciu poziomu ufności 0,10, przedział ufności na

czas przejazdu odcinka to $511 < t < 633$ [s]. Wyliczony całkowity czas przejazdu równy $t = 424$ [s] wykracza bardzo daleko poza przedział ufności dla czasu pomierzonego. Zatem procedura obliczeniowa w tym przypadku nietrafnie oszacowuje rzeczywisty czas przejazdu odcinka, a tym samym przeszacowuje pomierzoną prędkość komunikacyjną (16,6 km/h, a z obliczeń – aż 22,4 km/h).

Gdyby uwzględnić nie obliczeniową, lecz pomierzoną prędkość komunikacyjną, to otrzymuje się $I_{p,seg} = 3,49$, czyli wartość wyraźnie większą od wartości uzyskanej dla prędkości obliczeniowej $I_{p,seg} = 3,15$, co jednak w obu przypadkach sytuuje LOS na poziomie C, choć dla pomierzonej prędkości już na granicy z poziomem D.

Zbiorcze wyniki pomiarów i obliczeń przedstawia tabela 5.

Tabela 5

Zestawienie danych i wyników obliczeń dla wyznaczenia poziomu LOS obsługi transportu zbiorowego metodą HCM-2010 na odcinkach ulic w Krakowie													
Nr testu	L	N_{is}	v_s	g/C	S_{Rt}	Σd_{ad}	Σd_{ps}	Σd_{rt}	t_{rt}	t_l	d_l	t	\bar{t}
1a	1,84	4	5	0,63	50	33	76	109	241	120	221	462	476
1b	1,84	4	15	0,63	50	33	67	100	232	130	239	471	502
2a	2,64	4	4	0,40 ¹	60	37	82 ²	119	277	55	145	422	480
2b	2,64	4	4	0,60 ¹	60	42	79 ²	121	279	55	145	424	572

¹ Dla sygnalizacji wzbudzonej przez pieszych przyjęto g/C = 0,9

² Wartość ta uwzględnia ponadto straty czasu na włączanie się do ruchu $\Sigma d_{ad} = 18$ [s] (test 2a) oraz 20 [s] (test 2b).

Tabela 5 cd.

Nr testu	$S_{t,seg}$	F_h	t_{ex}	T_{ex}	F_l	a_l	T_{at}	T_{plf}	F_{tt}	s_{w-r}	$I_{p,link}$	$I_{p,seg}$	LOS
1a	14,3	3,02	4,1	0,68	1,4	1,99	0,25	9,45	0,62	1,87	3,0	3,64	D
1b	14,1	3,64	3,6	0,60	2,5	3,65	0,25	16,5	0,54	1,98	3,0	3,48	C
2a	22,5	2,82	0,4	0,07	1,1	1,41	0,25	3,65	0,86	2,42	3,0	2,81	C
2b	22,4	2,82	0,4	0,07	1,3	1,81	0,25	4,74	0,78	2,20	3,0	3,15	C

Wnioski z obliczeń pilotażowego zastosowania metody HCM

We wszystkich przypadkach obliczony czas przejazdu odcinka był mniejszy od czasu pomierzonego. W trzech przypadkach testy 1a), 1b) i 2a) mieścił się w przedziale ufności dla średniej, w tym w jednym (1a) średni czas pomierzony był bardzo bliski wartości obliczeniowej. W jednym przypadku (test 2b) czas przejazdu odcinka nie mieścił się w przedziale ufności. Można z tego wnioskować – choć z dużą ostrożnością – że metoda HCM-2020 niedoszacowuje czasu przejazdu odcinka, a w jednym przypadku nawet w bardzo dużym stopniu.

Zastąpienie prędkości obliczeniowej niższą prędkością pomierzoną nie spowodowało zmiany poziomu obsługi LOS. Z zestawienia wyników można wysnuć wniosek, że na poziom LOS mały wpływ ma prędkość komunikacyjna, silniejszy wpływ ma częstotliwość kursowania autobusów i zapełnienie autobusu pasażerami.

Podniesienie dopuszczalnej prędkości do 70 km/h na odcinku w ulicy Opolskiej zapewne nie mogło być wykorzystane przez autobusy, które ze względu na małe odległości pomiędzy sygnalizacjami świetlnymi oraz stany kongestii ruchu nie były w stanie rozpędzić się do wyliczonej potencjalnej prędkości 60 [km/h].

Podsumowanie

Uważa się, że Highway Capacity Manual (HCM) jest powszechnie uznanym wademekum, pomocnym przy podejmowaniu decyzji dotyczących planowania, projektowania i eksploatacji infrastruktury transportu drogowego. Wydanie HCM z 2010 r. podaje wzory na wskaźnik oceny jakości obsługi autobusów przez odcinek ulicy. Jednak wyjaśnianie istoty przytaczanych parametrów i ich interpretacja jest w tym podręczniku niewystarczająca. Na przykład niezrozumiały i nieprzekonujący jest sposób wyznaczania i kwantyfikowania nadmiernego czasu oczekiwania. Zatem konieczne są dalsze analizy metody HCM-2010 w celu właściwej interpretacji pojęć oraz zależności występujących w procedurze obliczania wskaźnika i poziomu jakości obsługi.

Słusznie, że ocena jakości według HCM-2010 jest skierowana nie tylko na rzeczywisty, ale także na postrzegany czas podróży, w tym czas oczekiwania i jazdy na tle warunków podróżowania, z uwzględnieniem wzajemnych relacji tych dwu składników. Interesującą ideą jest wprowadzenie do kwantyfikowania wpływów podejścia uwzględniającego elastyczności popytu. Zastosowane wartości stopy elastyczności nie mogą być jednak zarekomendowane wprost dla Polski, ze względu na brak badań krajowych w tym zakresie.

Uwzględnienie w HCM-2010 wzrostu uciążliwości jazdy z uwagi na napelnienia autobusu pasażerami jest słuszne. Jednakże dla warunków polskich wskaźnik, który to opisuje, czyli stosunek liczby pasażerów do liczby miejsc siedzących, powinien być zastąpiony stosunkiem liczby pasażerów do pojemności nominalnej autobusu, z uwzględnieniem przypadków przekroczenia tej pojemności. Funkcja wpływu powinna być bardziej krzywoliniowa niż zastosowana w HCM-2010. Można by wykorzystać polskie wskaźniki zaproponowane w [7] lub [8] jednakże po ich aktualizacji. Próg wrażliwości pasażera na poziom napelnienia autobusu powinien być wyższy niż dla warunków amerykańskich.

W warunkach polskich należałoby rozróżnić przypadki niskiej oraz wysokiej częstotliwości kursowania autobusów. W pierwszym przypadku w obliczeniach strat czasu na oczekiwanie na przystanku powinny być stosowane wskaźniki punktualności, w drugim – regularności. Kierunek badań i postać tych wskaźników może nawiązywać do wyników wspomnianych wyżej badań. Dla ciągów obciążonych intensywnym ruchem autobusów, komponentem oceny poziomu obsługi powinna być przepustowość przystanków z uwzględnieniem zjawiska autokongestii.

Sposób uwzględnianie warunków dojścia pasażera do przystanku budzi w metodzie HCM-2010 wątpliwości ze względu z jednej strony na bardzo skomplikowane obliczenia, a przede wszystkim na trudności w interpretacji dróg dojścia. Dojście do przystanków odbywa się w głównie ciągami prostopadłymi do ulicy która to przecież jest przedmiotem oceny.

Prędkość komunikacyjna dla konkretnego odcinka znacznie łatwiej bezpośrednio pomierzyć i trafniej oszacować niż

za pomocą podanych w metodzie wzorów. W sytuacji gdy dopiero rozważa się wprowadzenie komunikacji autobusowej w ciągu ulicznym, można tę prędkość wyznaczyć testowymi przejazdami autobusu.

Propozycja HCM-2020 choć wnosi nowe elementy analiz, to jednak nie stanowi przełomu w polskich badaniach nad postrzeganiem poziomu jakości zbiorowego transportu pasażerskiego.

Ze względu na niewielką próbę (5 elementową) oraz poligon badawczy uwzględniający tylko dwa ciągi uliczne w Krakowie wnioskowanie oparte na skąpych wynikach pomiarów i obliczeń, ocena trafności metody HCM-2010 są tym samym ograniczone, z możliwością popełnienia błędu. Pełna weryfikacja i ocena przydatności w warunkach polskich metody HCM wymagałaby przeprowadzenie szerszych badań na dużej próbie, obejmującej większy zakres a przy bardziej zróżnicowanych przypadkach. Dużym wyzwaniem byłoby podjęcie się adaptacji tej metody do warunków polskich.

Powyzsze wyrywkowe pomiary wykazały, że wyznaczanie metodą HCM-2010 wskaźnika strat czasu w skutek działania urządzeń sygnalizacji świetlnej okazało się na ogół nietrafne. Powinno zostać zbadane w jakim stopniu potrzeby komunikacji autobusowej uwzględniane są w optymalizacji koordynacji liniowej sygnalizacji świetlnej.

Ocena jakości obsługi autobusów przez specjalny pas jezdni ulicy powinna wziąć pod uwagę tendencję dopuszczania innych pojazdów do korzystania z takiego pasa, jak na przykład: taksówki, samochody elektryczne, motocykle. Szczególnie istotne jest ujęcie wpływu na sprawność pasa specjalnego wielkości natężenia ruchu pojazdów skręcających z takiego pasa w prawo na skrzyżowaniu.

Literatura

1. Chodur J., Kieć M., Ostrowski K., *Wybrane aspekty analizy warunków ruchu na odcinkach dróg dwupasowych, dwukierunkowych z wykorzystaniem metody HCM-2010*, Logistyka 3/2015.
2. Dowling R., Reinke D., *Multimodal Level of Service Analysis for Urban Streets*, National Cooperative Highway Program, Transportation Research Board, 2008.
3. *Highway Capacity Manual*, Transportation Research Board of National Academies of Science, Washington D.C., 2010.
4. *Highway Capacity Manual 6th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*, (2016, 3-Volume Set), Transportation Research Board, Washington D.C., 2017.
5. Jacques S.K., Levinson H.S., *Operational Analysis of Bus Lane on Arterials*, Transportation Research Board, TCRP Report 26, Washington D.C., 1997.
6. Rogers M., Enright B., *Highway Engineering*, Third Edition, Wiley Blackwell, 2016.
7. Rudnicki A., *Jakość komunikacji miejskiej*, Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK, seria Monografie, nr 5. Kraków 1999.
8. Starowicz W., *Jakość przewozów w miejskim transporcie zbiorowym*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2007.
9. *Transit Capacity and Quality of Service Manual*, Third Edition, Transportation Research Board, 2013, poniżej omówienie
10. *Transport Miejski. Ekonomia i Organizacja*, Praca zbiorowa pod redakcją O. Wyszomirskiego, Uniwersytet Gdański, 2007.