

# ANALIZA PRZEPUSTOWOŚCI PRZYSTANKÓW AUTOBUSOWYCH

Artykuł porusza problematykę oceny przepustowości elementu infrastruktury drogowej, jakim jest przystanek autobusowy. Zaproponowano w nim sposób szacowania przepustowości przystanku autobusowego, a także przedstawiono propozycję aktualizacji metody wyznaczania przepustowości projektowej oraz doboru liczby stanowisk wymiany pasażerów na przystanku dla wybranego kryterium sprawności obsługi autobusów. Na podstawie badań empirycznych i symulacyjnych wyspecyfikowano i skwantyfikowano wpływ czynników decydujących o przepustowości przystanków w warunkach miejskich.

## Wprowadzenie

Linie autobusową podzielić można na odcinki międzyprzystankowe oraz na przystanki będące punktami dostępności dla pasażerów. Prędkość komunikacyjna linii zależy od czasu przejazdu odcinków oraz czasu zatrzymania na przystankach. Dla pasażerów tranzytowych, w stosunku do przystanku, zatrzymywanie się na nim autobusu oznacza zwiększenie czasu podróży. Wydłużenie to zależy od gęstości liniowej przystanków na trasie, a także czasu ponoszonego na zatrzymywanie się, wymianę pasażerów, czynności operacyjne i ruszanie autobusu. W przypadku dużych natężeń ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej, odnoszonej do przepustowości przystanku, dodatkowym czynnikiem generującym straty czasu autobusów staje się blokowanie autobusów na przystankach, czyli uniemożliwienie wjazdu lub wyjazdu z przystanku z powodu zajęcia go przez inne wozy. Oprócz pojazdów komunikacji miejskiej i pasażerów podróżujących autobusem straty czasu ponosić mogą i pozostali użytkownicy ulicy, gdy na skutek zbyt krótkiej zatoki przystankowej, autobusy oczekujące na wjazd do niej zajmują pas ruchu przeznaczony także dla komunikacji indywidualnej.

Przepustowość przystanku można zdefiniować jako liczbę autobusów, które mogą zostać obsłużone w określonej jednostce czasu. Wówczas mówimy o przepustowości możliwej (maksymalnej) przystanku. Natomiast podejście uwzględ-

niające kryterium jakości wymaga analizy przepustowości projektowej (praktycznej) przystanku, która może być różnie zdefiniowana. W ogólnym rozumieniu będzie to dopuszczalna liczba autobusów (natężenie krytyczne), które będą mogły skorzystać z przystanku w ciągu jednej godziny bez pogorszenia warunków ruchu poniżej ustalonego poziomu.

## Cele analiz przepustowości przystanków

Oszacowanie przepustowości przystanku pozwala na uwzględnienie potrzeb komunikacji autobusowej od strony infrastrukturalnej, co jest istotne na etapie prac planistycznych i projektowych, a także umożliwia przeprowadzenie pełniejszych analiz funkcjonowania linii autobusowej. Można podać następujące cele określenia przepustowości przystanku:

- ustalenie adekwatnej do potrzeb geometrii przystanku lub podjęcie decyzji o rozdzieleniu przystanków,
- podjęcie decyzji o konieczności budowy zatoki przystankowej,
- oszacowanie maksymalnej liczby autobusów, jakie mogą korzystać z przystanku o ustalonej geometrii przy zachowaniu określonego standardu obsługi,
- ocena wpływu sygnalizacji świetlnej na funkcjonowanie przystanku.

Ocena przepustowości przystanku autobusowego stanowi podstawę do przyjęcia geometrii przystanku poprzez ustalenie liczby stanowisk wymiany pasażerów, czyli liczby autobusów na przystanku, które mogą prowadzić wymianę pasażerów w tym samym czasie. Ograniczają ją długość krawędzi zatrzymania (peronu przystankowego) i/lub zasady korzystania z przystanków przyjęte przez zarządców komunikacji w poszczególnych miastach. Standardowo liczba stanowisk wymiany pasażerów ograniczana jest do dwóch (np. Kraków, Warszawa) lub trzech. Przykładając liczbę stanowisk wymiany do długości taboru autobusowego, uzyskuje się długość krawędzi zatrzymania. Dla zatoki przystankowej jest to odcinek między punktami załomu skosów wjazdowego i wyjazdowego. Zwiększenie długości przystanku pozwala na obsługę większej liczby autobusów przy tym samym poziomie strat czasu ponoszonych przez nie. Jednakże efekty rozbudowy przystanku nie muszą być proporcjonalne, ponadto ujawniają się negatywne konsekwencje wydłużenia przystanku, w postaci:

<sup>1</sup> Mgr inż., Politechnika Krakowska, Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej, rbak@pk.edu.pl

- wydłużenia drogi dojścia do czoła przystanku i samego autobusu,
- oddalenia czoła przystanku od ciągów pieszych,
- pogorszenia bezpieczeństwa ruchu (dobieganie do autobusów poza przejściem dla pieszych, ukośnie do jezdni),
- utrudnionej orientacji pasażerów (pogorszenie rozpoznawalności miejsca zatrzymania czy numeru linii autobusowej),
- wzrostu kosztów inwestycyjnych i zajęcia terenu.

Powyższe niedogodności wskazują, że przesadna rozbudowa przystanku jest także niewskazana. Utrudnienia narastają już dla peronów umożliwiających na zatrzymywanie się trzech autobusów, zwłaszcza w przypadku dłuższego taboru przegubowego.

Decyzja o budowie zatoki autobusowej może być podjęta ze względu na blokowanie ogólnodostępnego pasa ruchu przez autobusy korzystające z przystanku. Z drugiej strony lokalizacja przystanku w zatoce jest niekorzystna z uwagi na wydłużenie czasu potrzebnego na włączenie się autobusu do ruchu oraz kosztów budowy. Do szczegółowej analizy celowości stosowania zatoki przydatnym jest określenie strat czasu ponoszonych przez wszystkich uczestników ruchu.

Ustalenie liczby autobusów, które mogą korzystać z przystanku, pozwala na ułatwienie planowania przebiegu linii autobusowych (w tym np. podczas wytyczania objazdów) oraz określenie konsekwencji zwiększenia natężenia ruchu autobusów korzystających z przystanku. Przepustowość przystanku może być także kryterium pomocniczym uwzględnianym przy decyzji o dopuszczeniu kolejnych przewoźników do zatrzymywania się na przystanku.

### Przepustowość możliwa przystanku

Przepustowość możliwa oznaczać będzie maksymalną liczbę autobusów, jakie mogą być obsłużone w przypadku ciągłej występującej kolejki autobusów oczekujących na wjazd na przystanek. Oszacowanie jej na podstawie badań empirycznych wymagałoby znalezienia przystanku, na którym natężenie ruchu autobusów przekracza możliwość obsłużenia wszystkich, co jest jednak nierealne. Wobec powyższego, bazując na wynikach badań identyfikacyjnych procesów związanych z funkcjonowaniem przystanku [2], przepustowość możliwą ustalono wyłącznie w sposób analityczny, przy następujących założeniach:

- na dojeździe do przystanku występuje nieprzerwana kolejka autobusów,
- czasy postoju oraz wymiany pasażerów dla kolejnych autobusów są stochastycznie niezależne,
- wzrost obciążenia przystanku nie ma wpływu na wartości parametrów obsługi autobusów na przystanku.

Oznacza to, że pomijany jest ewentualny wpływ zależności różnych czynników na czas wymiany, np. interwał między pojazdami, a więc czas oczekiwania pasażerów na autobus. Pomija się sprzężenie zwrotne polegające na dążeniu systemu do odnowy, np. prób kierowców do jak naj-

szybszego odjazdu z przystanku, jeśli widzą kolejkę autobusów oczekujących na wjazd na przystanek.

Przy powyższych założeniach, traktując przystanek jako system kolejkowy, przepustowość możliwa  $C_m$  jest odwrotnie proporcjonalna do średniego czasu obsługi  $t_z$  autobusu na przystanku:

$$C_m = \frac{3600}{t_z} \quad (1)$$

Poprzez czas obsługi  $t_z$  rozumieć należy okres między momentem rozpoczęcia wymiany pasażerów (lub innym momentem charakterystycznym obsługi) kolejnych autobusów. Składa się nań czas postoju  $t_p$  (w którym wyróżnić można czas wymiany pasażerów  $t_w$  i czas tracony [2, 3]) oraz czas potrzebny na podjazd kolejnego autobusu na stanowisko z kolejki  $t_d$ :

$$t_z = t_p + t_d = t_w + t_t + t_d \quad (2)$$

Wzór 1 obowiązuje dla przystanku o jednym stanowisku wymiany pasażerów  $S$ , czyli sytuacji, gdy tylko jeden z autobusów może prowadzić wymianę pasażerów w danym momencie. Dla przystanku o  $S > 1$  liczby stanowisk może dochodzić do wzajemnego blokowania się autobusów – pojazdy na dalszych pozycjach, mimo zakończenia wymiany pasażerów, oczekują na odjazd autobusu ze stanowiska o niższym numerze. Jest to najczęściej spotykany i potwierdzony badaniami empirycznymi przypadek.

Uwzględniając losowość czasu wymiany pasażerów, przy równoczesnym braku możliwości omijania się autobusów, zgodnie z modelem przedstawionym dokładniej w [3] czas obsługi pary lub trójki autobusów zwiększy się do wartości:

$$\begin{aligned} & \max(t_{p1}, t_{p2} + \tau) \\ & \max(t_{p1}, t_{p2} + \tau, t_{p3} + 2\tau) \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie  $\tau = 2.0s$  uwzględnia dodatkowy czas potrzebny przy podejździe drugiego i trzeciego wozu z kolejki.

Wydłużenie przystanku wpływa także na czas podjazdu autobusów  $t_d$ . Zgodnie z prostym wzorem regresji liniowej [3] średni czas podjazdu waha się od  $7.5s$  dla przystanku z jednym stanowiskiem, z którego korzystają wyłącznie autobusy standardowe, do  $18.5s$  dla trzystanowiskowego przystanku obsługiwanego przez autobusy przegubowe.

Uwzględniając powyższe uwarunkowania, po przekształceniu wzoru (1), przepustowość możliwa przystanku w zależności od liczby stanowisk wyniesie:

$$\begin{aligned} C_{m1} &= \frac{3600}{t_w + 1.5u_p + 15.4} \\ C_{m2} &= \frac{7200}{1.23t_w + 2.9u_p + 21.7} \\ C_{m3} &= \frac{10800}{1.44t_w + 4.3u_p + 25.3} \end{aligned} \quad (4)$$

przy czym  $u_p$  oznacza udział autobusów przegubowych korzystających z przystanku.

Przyjmując, że z przystanku korzystają wyłącznie autobusy przegubowe ( $18m - u_p = 100\%$ ), wzory (4) można przekształcić do postaci:

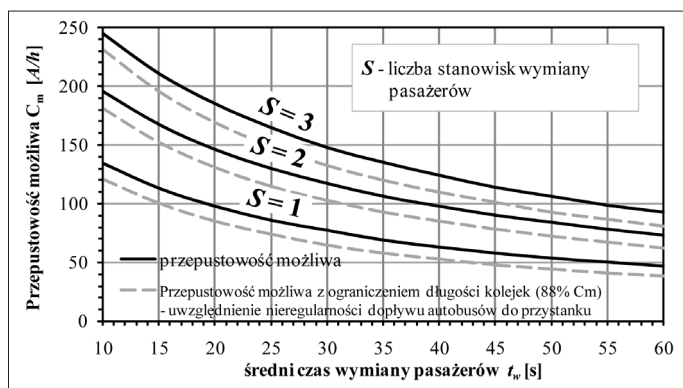
$$C_{mS} = \frac{3600 S}{S^{0.33} \bar{t}_w + 11.5 \ln(S) + 16.8} \quad (5)$$

w którym:

- $C_{mS}$  – przepustowość możliwa przystanku o  $S$  stanowiskach
- $S$  – liczba stanowisk wymiany pasażerów wynosząca 1, 2 lub 3.

Na rysunku 1 przedstawiono zależność przepustowości możliwej od średniego czasu wymiany pasażerów. Dodanie drugiego stanowiska wymiany pasażerów zwiększa przepustowość możliwą przeciętnie o 50%, a dodanie trzeciego przeciętnie o 90%. Jeśli porównywać przypadek przystanku z dwoma i trzema stanowiskami, wzrost przepustowości możliwej wynosi 25%. Analogiczne obliczenia teoretyczne dla przystanku z czterema stanowiskami wskazują na dalszy wzrost przepustowości o 15%, przy czym w rzeczywistości będzie on jeszcze mniejszy, gdyż model nie uwzględnia wydłużenia czasu postoju na skutek konieczności dojścia pasażerów do autobusu. Spadek przyrostu przepustowości wraz z dodawaniem kolejnych stanowisk wymiany pasażerów wskazuje na celowość ograniczenia długości przystanków do dwóch lub trzech stanowisk.

Ze względu na duży spadek prędkości komunikacyjnej autobusów oraz powstawanie długich, niedopuszczalnych kolejek na skutek nieregularności dopływu autobusów do przystanku za przepustowość możliwą nie powinno się przyjmować więcej niż 88% analitycznie wyznaczonej wartości [11].



Rys. 1. Przepustowość maksymalna przystanku o 1, 2 lub 3 stanowiskach w zależności od średniego czasu wymiany pasażerów

### Kryteria przepustowości projektowej

Przepustowość maksymalna pozwala na ocenę największej liczby autobusów, które mogą skorzystać z przystanku, nie uwzględniając warunków obsługi. Natężenia autobusów bliskie przepustowości powodować będą znaczący wzrost strat czasu autobusów docierających do przystanku, a przez to istotny spadek prędkości komunikacyjnej ze wszystkimi

jej konsekwencjami. Chcąc oszacować dopuszczalną liczbę autobusów, które mogą korzystać z przystanku bez zbyt dużych uciążliwości, potrzebne jest przyjęcie kryterium oceny warunków obsługi odnoszonego do autobusów bądź lepiej do samych pasażerów. Wybór kryterium obsługi jest w dużej mierze decyzją arbitralną, przy czym może być poddany ograniczonymi możliwościami przeprowadzenia analiz dla tak złożonego systemu, jakim jest funkcjonowanie przystanku. Z tego powodu w praktyce warunki obsługi pasażerów nie stanowią bezpośrednich mierników oceny. Spotykane w literaturze kryteria przepustowości projektowej to:

- ustalony udział przepustowości możliwej (np. 80%),
- porównanie czasu postoju na przystanku i czasu przejazdu odcinka międzyprzystankowego ze średnim interwałem autobusów na linii [10],
- prawdopodobieństwo napotkania przez dojeżdżający autobus zajętego przystanku przez poprzedzające autobusy [8, 11],
- straty czasu autobusów w kolejce odnoszone do czasu postoju autobusu [4, 7],
- straty czasu autobusów ponoszone w kolejce przed przystankiem.

Poziom zawodności obsługi, wyrażony prawdopodobieństwem natrafienia przez autobus na zajęty przystanek, wykorzystywany jest w metodzie amerykańskiej [11]. Bazuje ona na obliczeniach analogicznych do wyznaczenia przepustowości możliwej (wzór 4) z tą różnicą, że czas postoju wyznacza się dla wartości średniej powiększonej o tzw. operacyjny czas postoju. Oznacza to, że rzeczywisty czas postoju autobusu będzie krótszy niż przyjęty z określonym prawdopodobieństwem. Przy założeniu wzorowej regularności kursowania i równomiernym interwale rozkładowym czas operacyjny pozwala wyznaczyć prawdopodobieństwo, że kolejny autobus docierający do przystanku nie będzie mógł wjechać nań bez oczekiwania (tzw. *failure rate*). Podręcznik [11] zaleca, aby przyjmować poziom zawodności równy 2.5% dla terenów podmiejskich i 7.5% do 15% dla centrów miast. 15% poziom zawodności wyznacza granicę, przy której prędkość komunikacyjna dla linii autobusowej zaczyna gwałtownie spadać. Matematycznie poziom 50% jest równoznaczny z osiągnięciem przepustowości maksymalnej zgodnie z (4). W praktyce, po uwzględnieniu regularności kursowania autobusów, przepustowość jest osiągnięta dla poziomu zawodności rzędu 25%, co w warunkach polskich odpowiada wykorzystaniu przepustowości możliwej na poziomie 88%.

Metoda opracowana przez A. Rudnickiego dla warunków krajowych bazuje na kryterium stosunku średniego czasu oczekiwania autobusu w kolejce do czasu obsługi  $\delta$ . Za poziom krytyczny przyjęto 25%. Dla przeciętnych czasów wymiany na przystankach oznacza to bezwzględne średnie straty czasu przypadające na autobus na poziomie 6–10 s. Liczbę autobusów, jaka może skorzystać z przystanku, określa wzór [4]:

$$\begin{aligned}
 C_{m1} &= \frac{1115}{t_z} = \frac{1115}{t_p + 8.4s} \\
 C_{m2} &= \frac{2280}{t_z} = \frac{2280}{t_p + 8.4s} \\
 C_{m3} &= \frac{2840}{t_z} = \frac{2840}{t_p + 8.4s}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

gdzie  $t_z$  oznacza średni czas zajęcia stanowiska, a  $t_p$  średni czas postoju. Metoda uwzględnia także regularność kursowania autobusów, w tym wpływ sygnalizacji świetlnej zlokalizowanej przed przystankiem.

W zaproponowanej metodzie postanowiono przyjąć kryterium przepustowości projektowej jako bezwzględną wartość strat czasu autobusów oczekujących w kolejce na wjazd na przystanek, a więc inne niż w opisanych uprzednio metodach. Kryterium zastosowane w metodzie [11] nie uwzględnia nieregularności kursowania autobusów, co prowadzi do znacznego zawyżenia przepustowości projektowej. Natomiast odnośnienie strat czasu do czasu wymiany [7] oznacza, że dla dłuższego czasu postoju autobusów dopuszczalne są większe straty czasu. W praktyce często oznaczać będzie to, że autobus, którym podróżuje większa liczba pasażerów (większe napełnienie pojazdu), a więc w gorszych warunkach, może doznawać większych strat czasu. Chcąc uniknąć tego typu interpretacji, zrezygnowano z porównań strat czasu do czasu postoju autobusów na przystanku.

W trakcie pomiarów identyfikacyjnych na przystankach [2] dało się zaobserwować zakłócenia w ruchu autobusów, a także łamanie zasad korzystania z przystanków przez kierowców. Porównując wyniki z około 2500 obserwacji zakłóconych i niezakłóconych przyjazdów z obliczonymi stratami czasu autobusów, zestawiono w tabeli 1 zaproponowane przedziały jakości obsługi dla przystanku autobusowego komunikacji miejskiej.

Tabela 1

Warunki obsługi autobusów ocenione na podstawie obserwacji		
średnia strata czasu autobusu $d$ [s]	warunki obsługi autobusów	sytuacja na przystanku
< 1.5	bardzo dobre	sporadycznie występujące utrudnienia
1.5–4.0	dobrze	nieliczne autobusy muszą oczekiwać na wjazd na przystanek
4.0–10.0	przeciętne	częste zatrzymania z powodu zajęcia przystanku, blokowanie się autobusów na stanowiskach

Wartości przyjętych strat czasu są zdecydowanie niższe niż przy ocenie sprawności skrzyżowań z sygnalizacją świetlną [10], jednakże po uwzględnieniu napełnień pojazdów sumaryczne straty czasu pasażerów są porównywalne z obliczonymi dla czterowłotowych skrzyżowań miejskich.

Jako graniczną dopuszczalną stratę czasu, będącą kryterium przepustowości projektowej, zaproponowano  $d_{kr} = 4.0$  s. Pozwala ona zapewnić dobre warunki ruchu autobusów, ponadto argumentem przemawiającym za tą wartością okazały się zachowania samych kierowców, którzy, w celu zaoszczędzenia czasu, umożliwiali wymianę pasażerów na trzecim, a nawet czwartym stanowisku, mimo dopuszcze-

nia przez zarządcę jedynie przystanku podwójnego. Do zdarzeń tych z różnym nasileniem dochodziło na przystankach, dla których średnie straty czasu autobusów przekraczały około 3.5–4.5 s.

### Przepustowość projektowa przystanku

Do oszacowania strat czasu ponoszonych przez autobusy oczekujące w kolejce skonstruowano program symulujący funkcjonowanie przystanku. Szczegółowy opis modelu zwerifikowanego w oparciu o wyniki pomiarów na przystankach [2] przedstawiono w [3]. Program pozwala uwzględnić szereg czynników wpływających na wartość strat czasu. Najbardziej istotne są:

- natężenie ruchu autobusów  $Q$  [pojazdów/h],
- średni czas wymiany pasażerów  $t_w$  oraz czas tracony po zakończeniu wymiany pasażerów  $t_t$  [s],
- liczba stanowisk wymiany pasażerów  $S$  (sztywna bądź zależna od długości krawędzi oraz gabarytów taboru kursującego na linii),
- typ potoku autobusów dopływającego do przystanku (regularność kursowania i wpływ sygnalizacji świetlnej).

Pozostałe czynniki ujęte w modelu symulacyjnym okazały się mieć niewielki wpływ na otrzymywane z symulacji wartości strat czasu, co pozwala na przyjęcie w analizach uśrednionych wartości tych parametrów.

Na podstawie opracowanych w [3] wzorów na straty czasu autobusów w kolejkach przed przystankiem wyprobowano formułę na przepustowość projektową  $C_p$ : dla przystanku o liczbie stanowisk  $S = 1, 2$  lub  $3$ :

$$C_{pS} = \frac{3600 \cdot \ln \left( 1 + \frac{d_{kr}}{\prod_j f_j \cdot t_z \cdot \alpha} \right)}{\beta \cdot t_z}
 \tag{7}$$

w którym:

- $d_{kr}$  – dopuszczalna wartość strat czasu ponoszonych przez autobusy [s]
- $t_z$  – średni czas zajęcia stanowiska przystanku przez autobus zgodnie z wzorem (2) [s]
- $f_j$  – współczynniki korygujące z uwagi na wpływ sygnalizacji świetlnej, regularność kursowania i wydłużenie czasu wymiany pasażerów na dalszych stanowiskach
- $\alpha, \beta$  – parametry związane z liczbą stanowisk wymiany pasażerów przyjmujące wartości zgodnie z tabelą 2

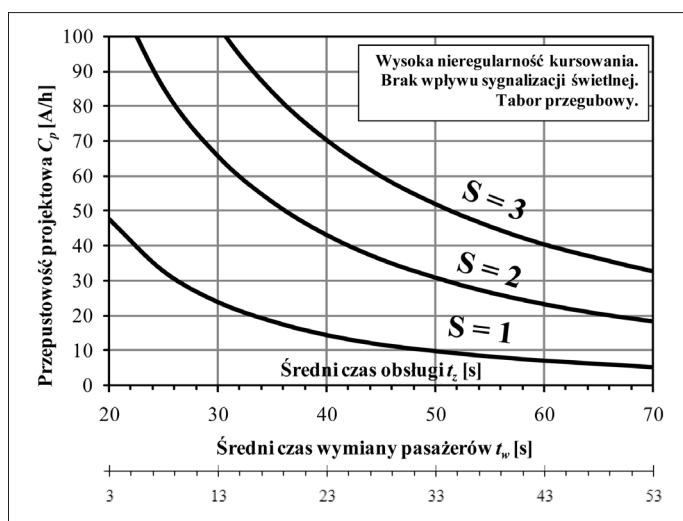
Tabela 2

Parametry kalibrujące we wzorze (7) zależne od liczby stanowisk wymiany pasażerów:			
Parametr	1 stanowisko	2 stanowiska	3 stanowiska
$\alpha$	0,148	0,023	0,007
$\beta$	3,22	3,50	3,49

Współczynniki korygujące  $f_m, f_k, f_w$  wyznacza się ze wzorów pozwalających porównać straty czasu dla analizowanego przystanku do zdefiniowanego przypadku podstawowego – przystanku bez wpływu sygnalizacji świetlnej i o wysokiej nieregularności kursowania komunikacji zbiorowej.

Na podstawie badań empirycznych [3] ustalono, że średni czas obsługi  $t_z$  we wzorze (7) dla przeciętnych warunków przystanku w centrum (dominujący potok autobusów przegubowych, przystanek zlokalizowany w zatoce sąsiadującej z pasem ruchu ogólnego) jest przeciętnie o 17 s dłuższy od czasu wymiany pasażerów. Uwzględniając tę zależność, na rys. 2 przedstawiono przepustowość projektową jako funkcję średniego czasu wymiany pasażerów lub czasu obsługi dla  $d_{kr} = 4.0$  s.

Porównanie przepustowości projektowej dla przystanku o dwóch lub trzech stanowiskach z przystankiem jednostanowiskowym pozwala stwierdzić ponad dwukrotną efektywność rozbudowy przystanku, a więc odwrotnie niż w przypadku przepustowości maksymalnej. Wynika to z przyjęcia kryterium stałej wartości strat czasu na stosunkowo niewysokim poziomie. Wówczas niekorzystne efekty rozbudowy przystanku (wydłużenie postoju na skutek blokowania się autobusów na przystanku) nie ograniczają w sposób istotny przyrostu przepustowości praktycznej.



Rys. 2. Przepustowość projektowa przystanku o 1, 2 lub 3 stanowiskach w zależności od średniego czasu wymiany pasażerów dla wyjściowego przypadku analiz i kryterium średnich strat czasu na poziomie  $d_{kr} = 4$  s

Istotnym czynnikiem redukującym przepustowość praktyczną jest obecność sygnalizacji świetlnej. Sygnalizacja świetlna zlokalizowana przed wjazdem na przystanek grupuje autobusy w czasie, zwiększając prawdopodobieństwo zablokowania przystanku. Wpływ na filtrację potoku autobusów mają podstawowe parametry pracy sygnalizacji. Zależność tę przedstawia wzór 8, uzyskany za pomocą skaliowanego modelu symulacyjnego, opisanego w [3]:

$$f_m = 1.2 - (0.017T - 0.8) \cdot \ln \lambda - 0.004T \text{ dla } \lambda < 0.8 \quad (8)$$

$$f_m = 1.0 \text{ dla } \lambda \geq 0.8$$

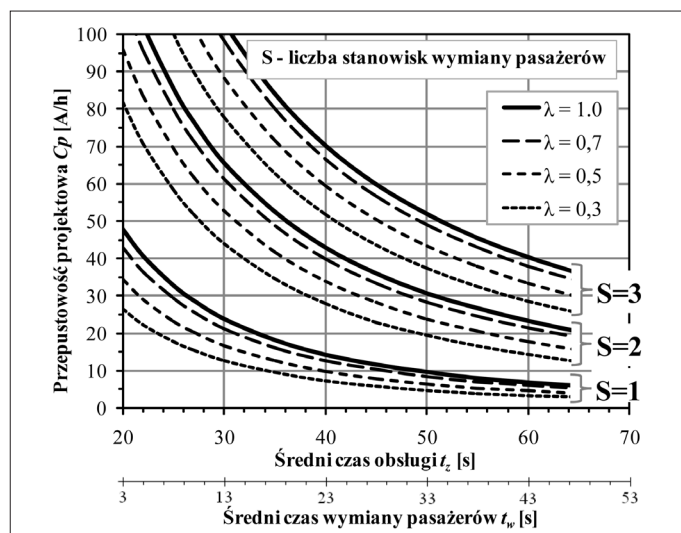
gdzie:

$T$  – długość cyklu sygnalizacji ( $T > 50$  [s])

$\lambda$  – udział efektywnego sygnału zielonego w cyklu wyrażany stosunkiem długości sygnału zielonego grupy obsługującej potok autobusów do długości cyklu  $G_e/T$ .

Wzrost długości cyklu, a także udziału sygnału czerwonego powodują wzrost strat czasu ponoszonych przez autobusy na przystankach. Na rysunku 3 pokazano przykład wpływu sygnalizacji świetlnej o długości cyklu  $T = 120$  s i trzech długościach sygnału zielonego dla fazy, w której obsługiwane są autobusy: 36 s, 60 s i 84 s. Największa redukcja przepustowości – do 50% występuje w przypadku przystanku z jednym stanowiskiem wymiany pasażerów, kiedy grupowanie autobusów powoduje konieczność oczekiwania na wjazd na przystanek już dla drugiego autobusu.

Opisany wpływ sygnalizacji dotyczy zdarzenia, gdy potok autobusów obsługiwany jest tylko w jednej fazie sygnalizacji. W pozostałych przypadkach dla uproszczenia obliczeń wpływ sygnalizacji można pominąć lub wykorzystać narzędzia symulacji komputerowej do oceny szczególnych przypadków.



Rys. 3. Wpływ stałoczasowej sygnalizacji świetlnej zlokalizowanej na dojeździe do przystanku na przepustowość projektową przystanku o 1, 2 lub 3 stanowiskach dla długości cyklu  $T = 120$  s i udziału sygnału zielonego w cyklu 30, 50 i 70%

Wykorzystując możliwości metod symulacyjnych, zbadano także wpływ regularności kursowania na straty czasu autobusów, wyrażony współczynnikiem korygującym [3]:

$$f_k = 0.75k^{-2.1} e^{\frac{Q \cdot \bar{t}_z \cdot (0.4k+1)}{3600}} \quad (9)$$

w którym  $k$  jest parametrem regularności kursowania autobusów (odpowiada on parametrowi rozkładu Gamma, którym można opisać rozkład zgłoszeń autobusów dojeżdżających do przystanku):

$$k = \frac{3600^2}{s_h^2 \cdot Q^2} \quad (10)$$

$s_h^2$  – wariancja interwałów szacowana z próby [s].

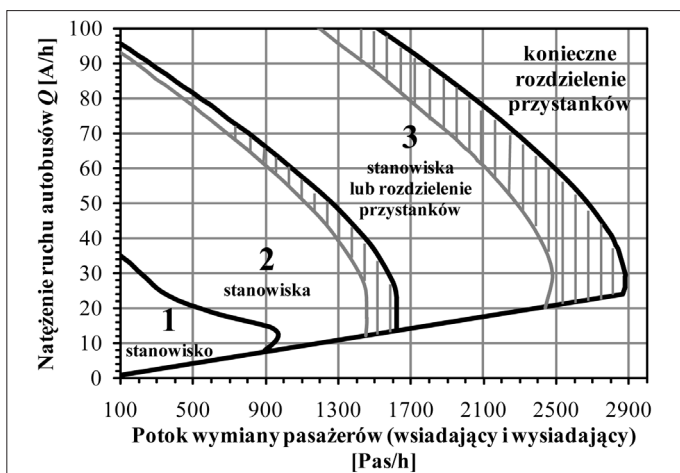
Badania empiryczne [2] wskazały na wysoką nieregularność kursowania nie wymagającą stosowania współczynnika korygującego  $f_k$  dla natężeń powyżej 20–30 pojazdów/h.

W przypadku przystanków o kilku stanowiskach, postój autobusu na dalszych stanowiskach może ulec wydłużeniu ze względu na czas poświęcony na dojście pasażerów do drzwi autobusu. Według [7] wydłużenie postoju wynosi przeciętnie 3 s dla drugiego i 6 s dla trzeciego stanowiska wymiany pasażerów. W ostatnich badaniach zasady tej nie udało się potwierdzić [2]. Występuje ona jednakże na przystankach, dla których wiata przystankowa i powierzchnia oczekiwania pasażerów znajdują się bezpośrednio przy czole przystanku, a dojście do stanowiska 2 i 3 może być utrudnione między innymi poprzez niewystarczającą powierzchnię oczekiwania dla pasażerów. Dla takiego przypadku wpływ wydłużenia czasu wymiany na dalszych stanowiskach uwzględnić można poprzez wprowadzenie współczynników korygujących:

$$\text{dla przystanku o } S = 2: f_w = 1.05$$

$$\text{dla przystanku o } S = 3: f_w = 1.18$$

W przypadku posiadania danych o potokach pasażerów [Pas/h] do obliczenia średniego czasu wymiany wykorzystać można wzory regresji wielorakiej przedstawione w [1]. Dla przykładu na rysunku 4 przedstawiono diagram pozwalający określić liczbę wymaganych stanowisk wymiany pasażerów, w zależności od potoku pasażerów wsiadających i wysiadających w godzinie, dla przypadku przystanku bez wpływu sygnalizacji świetlnej, z którego korzystają niskopodłogowe autobusy standardowe (50%) i przegubowe (50%) przy przeciętnym napełnieniu autobusów, równym 50%, i równomiernej wymianie pasażerów (50/50% wsiadających i wysiadających). Zakresowany obszar wskazuje na możliwe przesunięcie granic wyznaczonych według kryterium średniej straty czasu dla przypadku większych napełnień autobusów, dominującego potoku pasażerów wsiadających oraz zbyt małej powierzchni oczekiwania wydłużającej czas wymiany na dalszych stanowiskach.



Rys. 4. Diagram pozwalający wyznaczyć liczbę stanowisk wymiany pasażerów w zależności od liczby pasażerów wsiadających i wysiadających na przystanku

## Podsumowanie

Cechą przystanku autobusowego, jako elementu infrastruktury komunikacyjnej, jest jego przepustowość. Wyznacza ona natężenie ruchu autobusów, które mogą korzystać z przystanku – wartość maksymalną (przepustowość możliwą) oraz projektową (praktyczną) uwzględniającą standardy obsługi autobusów.

W literaturze spotyka się różne kryteria przepustowości projektowej przystanków. W zaproponowanej metodzie obliczania przepustowości przystanku przyjęto kryterium bezwzględnych średnich strat czasu autobusów w kolejce na poziomie  $d_{kr} = 4.0$  [s/A]. Na podstawie analiz symulacyjnych wyprowadzono wzory na przepustowość projektową dla zadanej wartości strat czasu i przeciętnych charakterystyk potoku autobusów oraz ich obsługi.

Podstawowymi czynnikami wpływającymi na przepustowość przystanku są: liczba stanowisk wymiany pasażerów, czas postoju autobusu oraz charakterystyki związane z regularnością kursowania autobusów docierających do przystanku. Sygnalizacja świetlna zlokalizowana za przystankiem w sposób istotny może redukować przepustowość przystanku poprzez grupowanie autobusów w czasie.

Zwiększenie długości przystanku autobusowego dla ostrego kryterium przepustowości praktycznej pozwala na istotną poprawę warunków ruchu autobusów. W szczególności jest to obserwowane dla przystanków dwustanowiskowych. Wprowadzenie trzech stanowisk zamiast dwu pozwala na zwiększenie przepustowości o około 50%, jednakże dla pasażerów oczekujących na przystankach oznacza to utrudnienia we wsiadaniu do autobusów, dlatego wprowadzenie przystanków z trzema stanowiskami powinno być rozpatrywane z alternatywą pod postacią rozdzielania przystanków.

## Literatura

1. Bauer M., *Modelowanie czasu wymiany pasażerów*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2008, nr 4.
2. Bąk R., *Identyfikacja procesów ruchu związanych z funkcjonowaniem przystanku autobusowego*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2008, nr 2.
3. Bąk R., *Simulation model of the bus stop*, „Archives of Transport”, 2010, vol. 1.
4. *Obsługa komunikacyjna w obszarach zurbanizowanych w Polsce*, red. A. Rudnicki, „Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału STIK w Krakowie”, Seria: Monografia, 1994, nr 1 (30).
5. Reily W.R., Kell J.H., Fullerton J.J., *Design of Urban Streets*, J.H.K. and Associates U.S. DOT, Federal Highway Administration, Washington 1970.
6. Rudnicki A., *Symulacja funkcjonowania przystanku autobusowego*, „Archiwum Inżynierii Lądowej”, 1977, nr 1.
7. Jacques St., Kevin and Herbert S. Levinson, TCRP Report 26, *Operational Analysis of Bus Lanes on Arterials: Application and Refinement*, TRB, National Research Council, Washington, D.C. 2000.
8. Suchorzewski W., *Wybrane zagadnienia z inżynierii ruchu*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1977.
9. Tracz M., Chodur J., Gaca S., Gondek S., Kieć M., Ostrowski K. i inni, *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną*, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2004.
10. *Transit Capacity and Quality of Service Manual – 2<sup>nd</sup> Edition*, Transportation Research Board, Washington D.C. 2003.