

Adam Molecki

Wpływ ograniczeń zewnętrznych na przepustowość przystanku

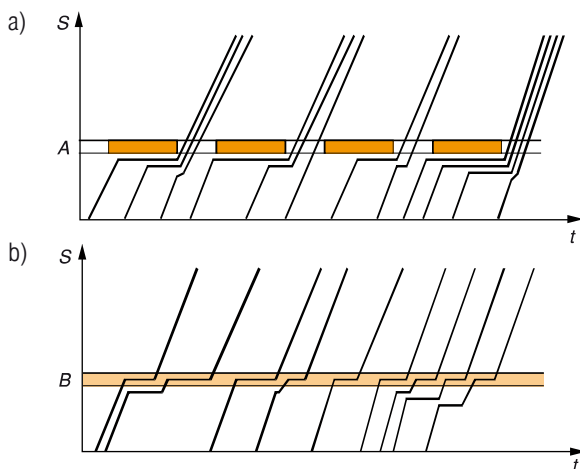
Jednym z najistotniejszych czynników ograniczających przepustowość linii komunikacji miejskiej jest przepustowość przystanków. Szczególnie duże znaczenie ma to w przypadku trakcji sztywnotorowych, jak tramwajowa czy trolejbusowa. Niemniej ważne są również czynniki zewnętrzne, niezwiązane bezpośrednio z prowadzeniem przewozu osób. Są to między innymi podporządkowanie innemu strumieniowi pojazdów na skrzyżowaniu, czy działanie sygnalizacji świetlnej. Niezależnie od charakteru czynników, w wielu przypadkach nie można brać pod uwagę pojedynczego ograniczenia. Należy rozpatrywać ograniczenia łącznie.

Przepustowość przystanku autobusowego była przedmiotem badań przeprowadzonych na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej w 2006 r. W kilku artykułach przedstawiono aspekty zastosowania algorytmu:

- określanie liczby koniecznych stanowisk przystankowych i przyporządkowanie im linii komunikacyjnych [5];
- regulowanie dostępu do rynku usług przewozowych [1];
- uzasadnienie istnienia (budowy lub likwidacji) trakcji większej przepustowości (np. tramwaju względem autobusu, metra względem tramwaju).

Metoda określenia przepustowości przystanku była rozwijana od bardzo prostej do określającej wiele parametrów. Można dzięki niej określić szacunkowo:

- czas zajętości pierwszego i kolejnych stanowisk przystanku wielokrotnego,
- liczbę pojazdów dotkniętych opóźnieniem związanym z niewystarczającą przepustowością przystanku,
- łączny czas opóźnienia pojazdów,
- liczbę pasażerów dotkniętych opóźnieniem,



Rys. 1. Charakter ogranicznika przepustowości
a) okienkowy, b) kanałowy

- koszt społeczny wyrażony przez łączną liczbę straconych pasażerogodzin.

Dalszy rozwój metody, polegający na zwiększaniu liczby określanych parametrów, jest oczywiście możliwy. Obecnie nacisk położono jednak na związanie określenia przepustowości i parametrów jakościowych z otoczeniem przystanku – rozszerzając zakres jej zastosowania.

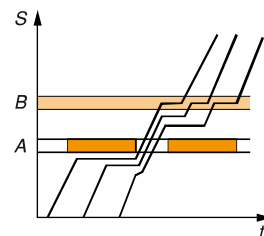
Metoda powiązania wzajemnego ograniczników przepustowości

Osobne określanie przepustowości każdego elementu sieci i wybór najmniejszej wielkości (jako wielkości charakteryzującej wąskie gardło) nie daje pełnego obrazu sytuacji.

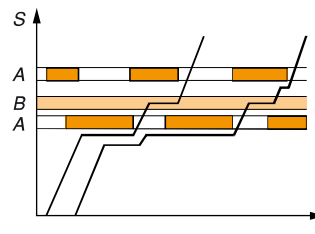
Zasadniczo ograniczniki przepustowości można podzielić pod względem charakteru na:

- okienkowe – do takich należy między innymi sygnalizacja świetlna – dopuszczają ruch tylko w wybranym oknie czasowym (rys. 1a);
- kanałowe – do takich należą przystanki – wydłużona obsługa (niekoniecznie o stałym czasie trwania) na wybranym odcinku trasy, prowadzi do ograniczenia dostępu do stanowisk obsługowych (kanałów obsługi [6] – rys. 1b).

Jeżeli sąsiadują ze sobą dwa ograniczniki o różnym charakterze, ich wzajemne oddziaływanie doprowadzi do znacznego pogorszenia jakości obsługi komunikacyjnej (rys. 2). Nie wykaże tego analiza osobna [3]. Jeśli sąsiadujących ograniczników będzie więcej, tylko obliczenia spójnej całości mogą dać prawidłową odpowiedź (rys. 3).

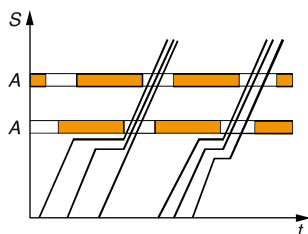


Rys. 2. Wykres ruchu obrazujący obniżoną jakość obsługi (prędkość komunikacyjną) przez zblokowanie ograniczników przepustowości o charakterze okienkowym (A) i kanałowym (B)

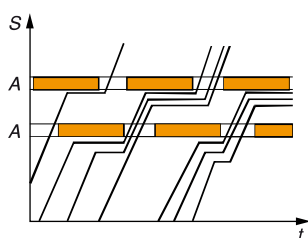


Rys. 3. Wykres ruchu obrazujący przepustowość systemu komunikacyjnego obniżoną znacznie poniżej przepustowości elementów go tworzących – ograniczników przepustowości o charakterze okienkowym (A) i kanałowym (B)

Zafałszowany wynik może powstać również przy jednakowym charakterze ograniczników. Typowym przykładem może być często spotykany układ zsynchronizowanych instalacji sygnalizacji świetlnej. W przypadku głównego ciągu (preferowanego) analiza osobna da zawyżony wynik opóźnień (rys. 4). Przy ciągu alternatywnym (np. pojazdów wjeżdżających na ciąg główny) wynik będzie zaniżony (rys. 5).



Rys. 4. Wykres ruchu przedstawiający minimalizację strat czasu kierunku preferowanego w układzie „zielonej fali”



Rys. 5. Wykres ruchu przedstawiający zwiększenie strat czasu kierunku alternatywnego do preferowanego w układzie „zielonej fali”

Podsumowując, w każdym przypadku, gdy odległość między kolejnymi ogranicznikami jest niewielka, nieuwzględnianie tego sąsiedztwa powoduje powstanie błędów. Przez niewielką odległość należy rozmieść odległość, dla której można założyć znaczny stopień zdeterminowania czasu przejazdu między ogranicznikami. Przykładowo można założyć, że przy braku przeciążeń ruchowych, pojazdy poruszają się w mieście z prędkością 40–50 km/h. Stopień zdeterminowania rozrzutu można wyrazić w tym przypadku stosunkiem (uproszczony wzór dotyczy cyklicznych stałoczasowych ograniczeń okienkowych):

$$D = \frac{t_D}{t_C} \quad [s] \quad (1)$$

gdzie:

D – stopień zdeterminowania rozrzutu zgłoszenia,

t_D – przewidywany rozrzut czasu przybycia do drugiego ogranicznika,

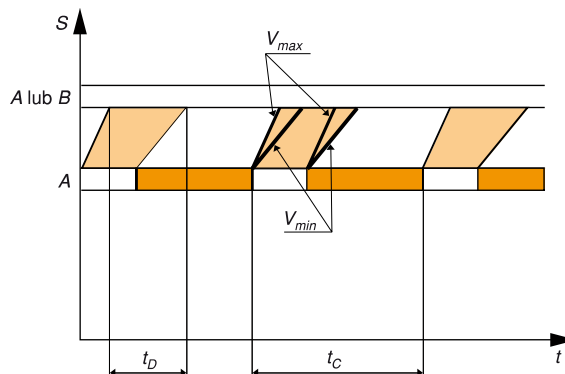
t_C – długość cyklu pierwszego ogranicznika.

Sytuację taką przedstawiono na rysunku 6.

W komunikacji miejskiej – szczególnie sztywnotorowej (komunikacja ta nie przewiduje zmiany toru ruchu w dowolnym miejscu, np. tramwaj, trolejbus, co znacznie ogranicza możliwości wyprzedzania) – zagadnienia te komplikują się znacznie bardziej. Zasadniczą przyczyną tego jest konieczność rozpatrywania obsługi przystanków. Ich poprawnej analizie może służyć praktycznie wyłącznie przeprowadzenie odpowiedniej symulacji.

W toku badań uznano, że najbardziej właściwy będzie system analizujący, którego elementami składowymi będą:

- inicjatory losowych zgłoszeń – wprowadzające do systemu informacje o momentach zgłoszeń pojazdów;



Rys. 6. Graficzne przedstawienie stopnia zdeterminowania rozrzutu zgłoszenia przy prędkości poruszania w zakresie od V_{min} do V_{max}

- bufony – miejsca, gdzie pojazd może oczekiwać na zwolnienie dalszego odcinka toru;
- ograniczniki okienkowe – miejsca, gdzie pojazd oczekuje na zezwolenie na ruch (np. sygnalizacja świetlna);
- ograniczniki kanałowe – miejsca, w których zatrzymanie trwa losowy okres czasu, opisany rozkładem prawdopodobieństwa;
- łączniki – odcinki zasadniczo o nieograniczonej pojemności pojazdów, o ustalonej bądź losowej długości czasu przejazdu;
- idealne ujście – koniec badanego odcinka.

Elementy te wiąże się w spójną całość, która odpowiada rzeczywistemu fragmentowi sieci transportowej.

Praktyczny przykład zastosowania

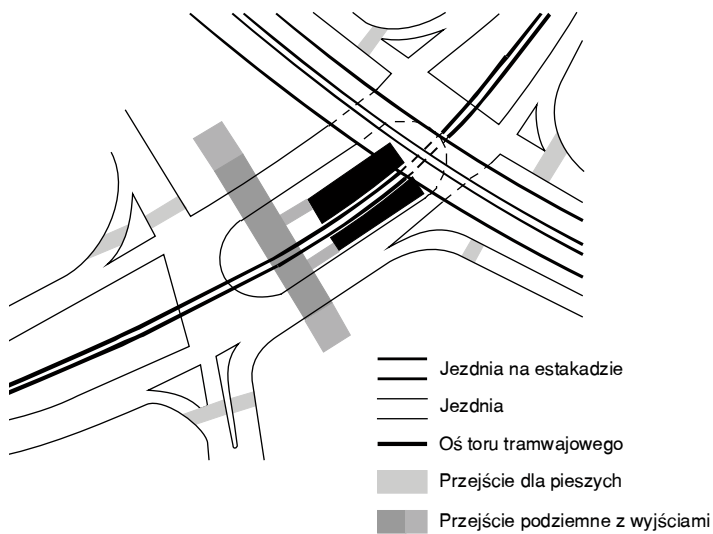
Opisane zblokowanie elementów ograniczających przepustowość ma miejsce między innymi w Sosnowcu przy przystanku „Sosnowiec Estakada”. Przystanek zlokalizowany jest na wyspie centralnej, skrzyżowania łączącego pięć ulic (rys. 7). Cztery z nich charakteryzują się bardzo dużym natężeniem ruchu kołowego, przy czym w godzinach szczytu blokadzie wynikającej z kongestii podlegają wszystkie. Część ruchu została odseparowana:

- część ruchu pieszego (za pomocą przejścia podziemnego),
- ruch kołowy wschód–zachód (za pomocą estakady).

Skrzyżowanie wyposażone jest w instalację stałoczasowej sygnalizacji świetlnej. Ze względu na przeciążenie wszystkich potoków, występujące mimo wspomnianej separacji, nie można liczyć na znaczne zwiększenie długości przydzielanego sygnału zielonego dla tramwaju (przez sygnał zielony należy rozumieć sygnał zezwalający na ruch – ciągły w postaci pionowej kresy). Również priorytetowanie tramwajów jest niemożliwe, ze względu na obiektywne trudności w tworzeniu sygnalizacji świetlnej dla skrzyżowań pięciowlotowych z wyspą centralną.

Niezależnie od nich priorytetowanie tramwaju mogłoby się doraźnie okazać niekorzystne dla całego systemu transportu zbiorowego. Komunikacja autobusowa obsługuje również bardzo ważne potoki komunikacyjne, wykorzystując do tego wszystkie pięć zbiegających się ulic.

Przeprowadzenie analizy miało na celu odpowiedź na pytanie, na ile możliwa jest poprawa jakości obsługi pasażerów przez przebudowę przystanków (w obydwu kierunkach) na podwójne. Jako przystanek podwójny rozumie się przystanek z dwoma stanowiskami umieszczonymi jedno po drugim. Tramwaj zatrzymuje się tylko na jednym (na dalszym jeśli oba są wolne, na bliższym jeśli dalsze jest zajęte).

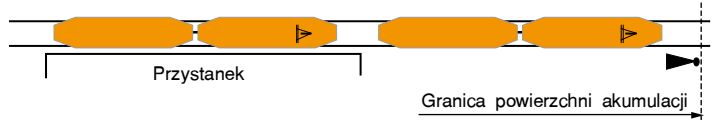


Rys. 7. Schemat centralnego węzła komunikacyjnego w Sosnowcu

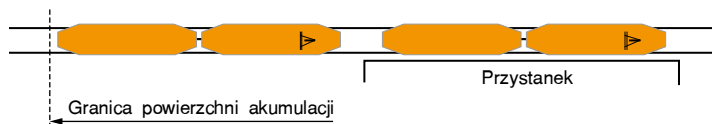
Teoretycznie budowa przystanku podwójnego musi poprawić przepustowość fragmentu sieci. Jednakże w szczególnych przypadkach odpowiedź ta może sprawić kłopot. Mogą zaistnieć następujące przypadki:

- rozsuniecie kursów na pierwszym wspólnym, dla kilku linii, przystanku spowodowane niemożnością wspólnej obsługi, spowoduje, że na badanym przystanku nigdy nie występuje zjawisko oczekiwania na jego zwolnienie;
- synchronizacja rozkładów jazdy minimalizuje możliwość zbliżenia się dwóch pojazdów do siebie;
- odrębne ograniczenia przepustowości trasy powodują brak możliwości zbliżenia się do siebie dwóch pojazdów (np. zbyt krótki czas światła zielonego dla przejazdu dwóch pojazdów, czy poprzedzający przystanek odcinek jednotorowy z sygnalizacją dopuszczającą wjazd wyłącznie jednego pociągu);
- odrębne ograniczenia przepustowości, występujące w niedalekiej odległości za przystankiem, powodują niecelowość zwiększania jego przepustowości;
- brak zewnętrznych ograniczników w pobliżu;
- zewnętrzne ograniczniki powodują, że niewielkie skrócenie czasu obsługi przystanku może się przetożyć na bardzo duże oszczędności czasu w dalszej części trasy.

Opisana metoda może być jedyną, która pozwoli oznaczyć, z którą sytuacją ma się do czynienia [3]. Tylko w dwóch ostatnich



Rys. 8. Usytuowanie stanowiska przystankowego względem wyspy centralnej umożliwiające opuszczenie tegoż w oczekiwaniu na sygnał zezwalający na dalszą jazdę



Rys. 9. Usytuowanie stanowiska przystankowego względem wyspy centralnej umożliwiające oczekiwanie na opuszczenie tegoż przez tramwaj poprzedzający

przypadkach znaczenie jest na tyle duże, że warto rozbudowywać przystanek, pomimo że jest to działanie niskokosztowe.

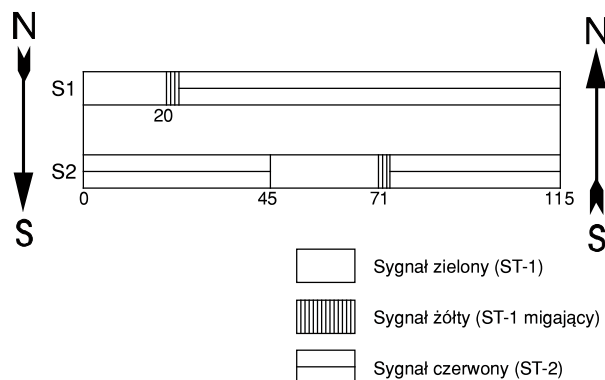
W pierwszym kroku analizy przeprowadzono inwentaryzację istniejącej substancji infrastrukturalnej. Miała ona na celu wyznaczenie najważniejszych parametrów czynników ograniczających. Jej wyniki zamieszczono w tabelicy 1.

Tabela 1

Parametry elementów infrastruktury stanowiących ograniczenia ruchu tramwajów

Rodzaj	Zagadnienie	Kierunek	
		S→N	N→S
Geometryczne	Możliwość opuszczenia stanowiska przystankowego bez przejazdu za sygnalizator wyjazdowy z wyspy (rys. 8)	Nie	Tak
	Możliwość oczekiwania na opuszczenie stanowiska przystankowego przez poprzedzający tramwaj w granicach wyspy centralnej skrzyżowania (rys. 9)	Tak	Nie
	Możliwość budowy przystanku podwójnego	Tak	Tak
Czasowe	Długość sygnału zezwalającego na wjazd na wyspę	26 s	20 s
	Długość sygnału zezwalającego na zjazd z wyspy	20 s	26 s
	Odstęp między początkiem sygnału zezwalającego na wjazd na wyspę a początkiem sygnału zezwalającego na zjazd z wyspy	44 s	25 s
	Długość cyklu	115 s	

Wykres sygnałów dla tramwajów zastosowanej sygnalizacji przestawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Wykres cyklu sygnałów dla tramwajów sygnalizacji zainstalowanej przy przystanku Sosnowiec Estakada

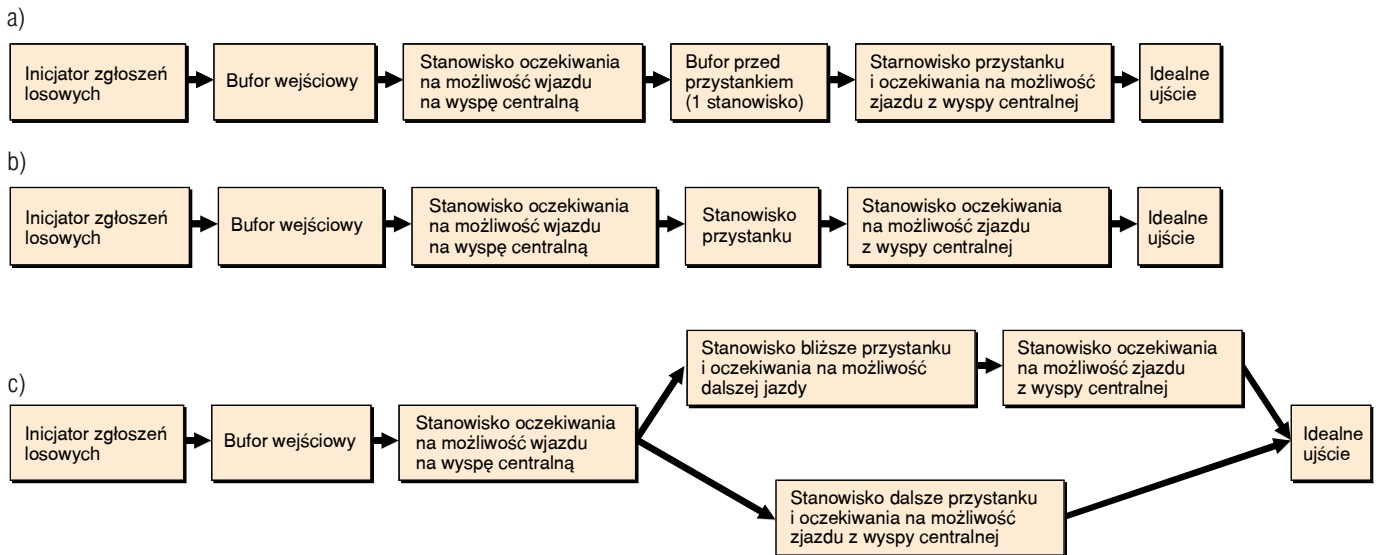
Kolejnym krokiem było zebranie danych o rozkładzie jazdy wszystkich tramwajów liniowych, następnie dokonano spisu z natury dotyczącego:

- występujących odchyżeń od rozkładu jazdy (przed dojazdem do pierwszego sygnalizatora),
- czasów wymiany pasażerów i czynności towarzyszących (czasów postoju handlowego [4]).

Przeprowadzono opisaną analizę, przyjmując dane wejściowe zgodne z tabelą 1 oraz wspomnianymi, wykonanymi pomiarami.

Zbudowano cztery modele symulacyjne zgodnie ze schematami przedstawionymi na rysunku 11, przy czym modele po przekształceniu przystanków na podwójne różniły się jedynie parametrami sygnalizacji.

Należy zaznaczyć, że w celu uzyskania pełnej porównywalności rozwiązań, inicjator zgłoszeń losowych generował jedną listę



Rys. 11. Schematy modeli symulacyjnych ruchu tramwaju na skrzyżowaniu Sosnowiec Estakada

a) stan obecny dla kierunku na północ; b) stan obecny dla kierunku na południe; c) stan oczekiwany po przekształceniu przystanków na podwójne

zgłoszeń dla symulowanego stanu obecnego i stanu po wprowadzeniu przystanków podwójnych.

Wyniki analizy

Jako efekt analizy otrzymano 2 komplety wyników (dla 2 kierunków) składające się z listy momentów:

- zgłoszeń do systemu,
- opuszczeń systemu przy przystanku pojedynczym,
- opuszczeń systemu przy przystanku podwójnym.

Na ich podstawie porównano czasy przejazdu (od momentu zgłoszenia, do opuszczenia systemu). Rozkłady czasów przejazdu przez skrzyżowanie przedstawiono na rysunkach 12 i 13. Dane te zgromadzono również w tabeli 2. Jak widać w każdym przypadku występuje stosunkowo równomierny rozkład w przedziałach długości nieco ponad 100 s, natomiast między kolejnymi przedziałami występują znaczne różnice. Jest to odpowiedź systemu na całkowicie przypadkowy, w stosunku do stanu sygnalizacji, moment zgłoszenia przed pierwszy sygnalizator (jak wspomniano wcześniej długość cyklu sygnalizacji wynosi 115 s). Występują znaczne różnice między kolejnymi takimi przedziałami, co zwraca uwagę na stosunek liczby tramwajów, które zdołały przejechać przez badane skrzyżowanie w pierwszym cyklu świetlnym od momentu zgłoszenia, w drugim itd.

W przypadku pojedynczych stanowisk bardzo często przejazd trwa dłużej niż 1 cykl (około 20–25% przejazdów w zależności od kierunku). Prosta i niskokosztowa zmiana sposobu funkcjonowania przystanków daje znaczną redukcję tego zjawiska (do 5–12% przejazdów). Praktycznie całkowicie zostałyby zlikwidowane przejazdy wymagające czasu dłuższego niż 2 cykle. Najlepiej obrazują to wykresy na rysunku 14.

Podsumowanie

Dzięki przeprowadzonej analizie uzyskano wynik wskazujący na celowość dokonania zmian organizacji przystanku. Główną zaletą opisaną metody jest wskazanie wielkości obiektywnych wskaźników. W obecnej sytuacji transportu zbiorowego w Polsce, nie może mieć miejsca postępowanie intuicyjne. Charakteryzuje się

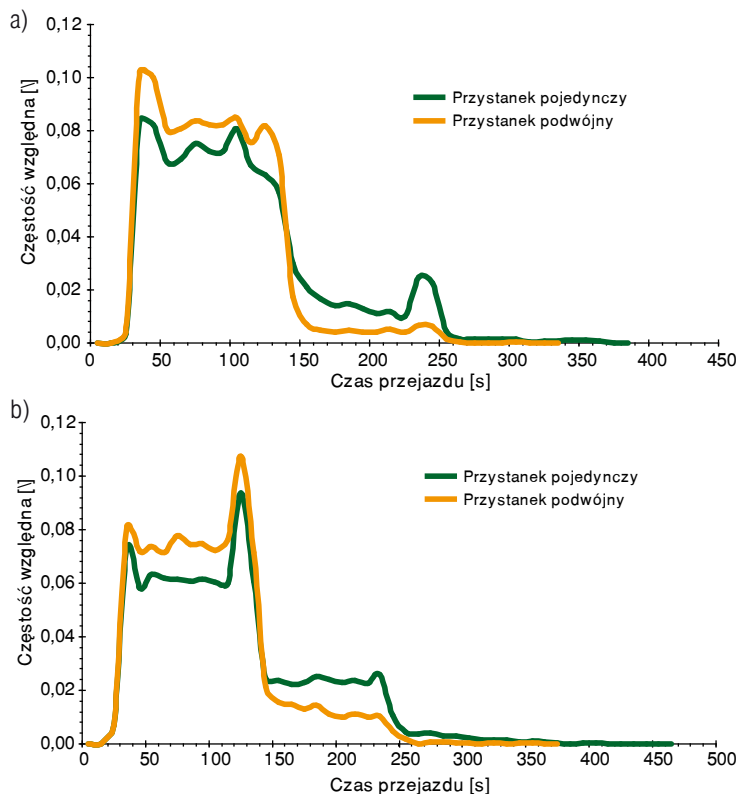
Tabela 2

Porównanie rozkładów czasów przejazdu przez skrzyżowanie Sosnowiec Estakada

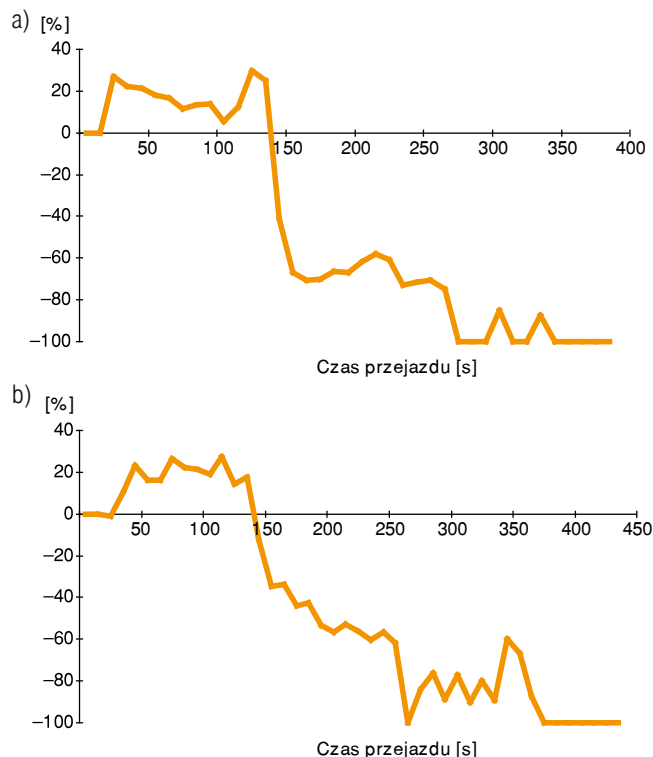
czas przejazdu	W kierunku północnym		W kierunku południowym		[%]
	obecnie	po reorganizacji	obecnie	po reorganizacji	
0 ÷ 50	16,93	20,64	0 ÷ 50	13,82	15,94
50 ÷ 100	35,70	40,92	50 ÷ 100	30,90	37,19
100 ÷ 150	29,75	33,08	100 ÷ 150	29,93	34,83
150 ÷ 200	7,93	2,53	150 ÷ 200	11,82	6,89
200 ÷ 250	8,02	2,63	200 ÷ 250	10,58	4,60
250 ÷ 300	1,02	0,17	250 ÷ 300	1,84	0,34
300 ÷ 350	0,44	0,03	300 ÷ 350	0,78	0,15
> 350	0,20	0,00	> 350	0,34	0,05

ono zbyt dużym ryzykiem chybiecia inwestycji, a większość zarządów transportu miejskiego nie posiada znacznych nadwyżek finansowych. Optymalizacja organizacji komunikacji sprowadza się w tym przypadku do koncentrowania się na inwestycjach przynoszących największe korzyści.

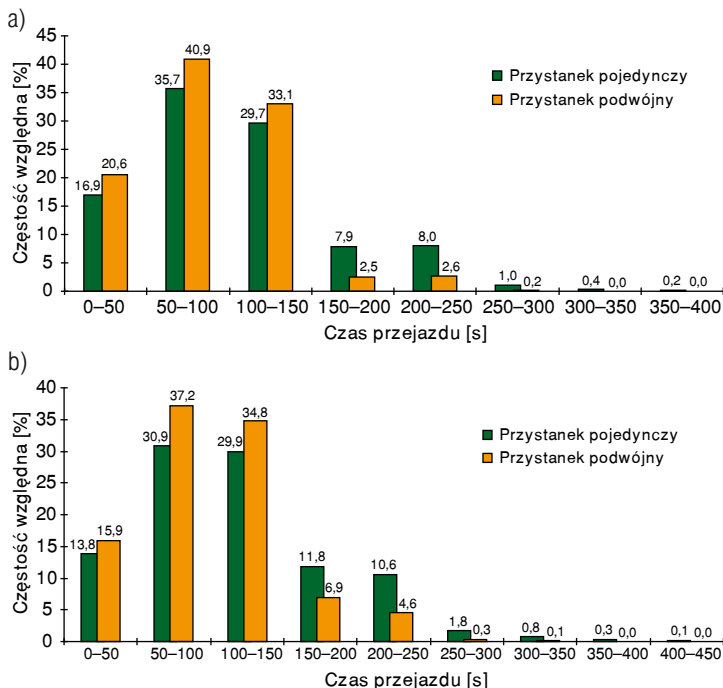
W opisywanym przypadku wykazano, że obecny stan jest zdecydowanie niezadowolający. Proponowana zmiana przyniesie oczekiwany skutek skrócenia czasu jazdy w wielu przypadkach, a co najważniejsze poprawy punktualności, a więc i niezawodności komunikacji miejskiej (tab. 3). Nie byłyby ku temu potrzebne wielkie nakłady na skomplikowane sterowniki sygnalizacji świetlnej, wiele czujników oraz ich późniejszą konserwację. Poprawa nie odbyłaby się również kosztem innych uczestników ruchu. Jak wykazała odrębna analiza, transport tramwajowy w Sosnowcu i całym Zagłębiu Dąbrowskim musi być rozwijany [2]. Jest to warunek prawidłowego funkcjonowania miast, zapewniającego właściwy poziom życia mieszkańców i osób przyjezdnych. Większość planów rozwojowych zakłada zwiększenie ruchu na północ od centrum (przez omawiany węzeł drogowy), stąd też już obecnie znaczne korzyści z powstania przystanku dwustanowiskowego jeszcze się zwiększą.



Rys. 12. Wykres rozkładów czasów przejazdu przez skrzyżowanie Sosnowiec Estakada a) w kierunku północnym; b) w kierunku południowym



Rys. 14. Zmiana częstości występowania czasów przejazdu po reorganizacji w stosunku do stanu obecnego a) w kierunku północnym; b) w kierunku południowym



Rys. 13. Porównanie rozkładów czasów przejazdu przez skrzyżowanie Sosnowiec Estakada w stanie obecnym i po ewentualnej reorganizacji a) w kierunku północnym; b) w kierunku południowym

Literatura

- [1] Molecki A.: *Metoda określania liczby stanowisk dla węzłów komunikacyjnych*. Autobusy 11/2006.
- [2] Molecki A.: *Możliwości zastąpienia komunikacji tramwajowej autobusową na terenie Sosnowca*. Materiały niepublikowane.

Tabela 3

Wskaźniki obrazujące poprawę punktualności i innych parametrów funkcjonowania komunikacji tramwajowej wskutek reorganizacji przystanków Sosnowiec Estakada

Parametr	[jednostka]	W kier. północnym		W kier. południowym	
		obecnie	po reorganizacji	obecnie	po reorganizacji
Średni czas przejazdu	[s]	107	90	119	101
Odchylenie standard. czasu przejazdu	[s]	59	42	64	49
Rozstęp czasu przejazdu	[s]	362	308	448	337
Minimalny czas przejazdu	[s]	24	24	24	24
Maksymalny czas przejazdu	[s]	386	332	472	361
Dobowy zysk z reorganizacji	[poc.min.]	–	70	–	73

- [3] Molecki A.: *The meaning of different limiters relations for defining public transport routes capacity*. International Scientific Journal Transport Problems. Gliwice 2007, tom 2, zeszyt 1.
- [4] Molecki A.: *Wpływ czasu wymiany pasażerów na przystanku na płynność ruchu tramwajowego*. Transport Miejski i Regionalny 11/2005.
- [5] Molecki A.: *Zespoły przystankowe jako wielokanłowe systemy obsługi*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, nr 1695, 2006.
- [6] Woch J.: *Ogólne ujęcie przepustowości jako problemu wymiarowania układów kolejowych (w)* Informatyka w planowaniu technicznym przewozów kolejowych – praca zbiorowa pod redakcją Truskolaskiego i Wegierskiego. WKŁ, Warszawa 1977.

Autor

Adam Molecki
Wydział Transportu Politechniki Śląskiej
adam.molecki@polsl.pl