

Doświadczenia ze stosowania priorytetu tramwajowego w Poznaniu

Jeremi Rychlewski

Celem niniejszego referatu jest przedstawienie doświadczeń z wdrażania różnych poziomów priorytetu tramwajowego w Poznaniu. Doświadczenia te dotyczą przede wszystkim strony technicznej, a więc porównania zakładanego i zrealizowanego priorytetu, problemów detekcji obejmujących różne typy czujników, ich jakość i lokalizację, a także interakcji między ruchem tramwajowym i innymi środkami transportu. W toku 14-letniej realizacji priorytetu konieczne okazało się doprecyzowanie niektórych pojęć, zwrócenie uwagi na problem jakości detekcji i koordynację między sterowaniem a rozkładem jazdy. Obserwacje działającego priorytetu pokazują, że możliwości wynikające z ITS są nadal w małym stopniu wykorzystywane, a także, że konieczne jest odejście od lokalnego sterowania na rzecz współpracy obszarowej sterowników, a docelowo objęcia prawie wszystkich skrzyżowań z priorytetem sterowaniem sieciowym.

Artykuł jest zmodyfikowaną wersją referatu z konferencji „Zintegrowany system transportu miejskiego z 27 i 28 maja 2010 roku.

Wstęp

Historia zastosowania detekcji w sterowaniu ruchem w Poznaniu sięga lat 70-tych XX wieku, kiedy to wybudowano akomodowaną sygnalizację świetlną na pojedynczych przejściach dla pieszych przez jezdnie (piesi zgłaszali się naciśkając przycisk) i torowiska (tramwaj był zauważany przez czujnik) oraz na pojedynczych przecięciach torowiska tramwajowego z jezdnią samochodową. Osiągnięciem lat 80-tych XX w. był system sterowania ruchem w centrum miasta, który na podstawie odczytu z czujników określał, który program stałoczasowej sygnalizacji świetlnej ma być w danym momencie realizowany [16]. Wreszcie w roku 1996 pierwsze skrzyżowania w Poznaniu zostały wyposażone w sterowniki pozwalające regulować ruch na skrzyżowaniach (a nie pojedynczych relacjach) w oparciu o odczyty z czujników – były to skrzyżowania na zachodnim odcinku II ramy transportowej oraz skrzyżowanie ulic Roosevelta, Dąbrowskiego i Most Teatralny wraz położonym 70 m dalej wjazdem na trasę PST (Poznańskiego Szybkiego Tramwaju). To ostatnie skrzyżowanie wymagało szczególnej uwagi ze względu na włączenie trasy PST w istniejącą sieć tramwajową i obciążenie skrzyżowania ruchem 126 tramwajów w godzinie na 12 (na 18 możliwych) relacjach gwiazdy tramwajowej z rozwidleniem (obecnie 138 tramwajów na 14 relacjach) przy pojedynczych (między innymi z braku miejsca) przystankach – stąd zastosowano tutaj pierwszy (pomijając wspomniane wcześniej przejazdy i przejścia przez torowiska) znaczący priorytet tramwajowy. 14 lat implementacji różnych priorytetów z różnymi efektami końcowymi, jakie upłynęły od czasu instalacji sygnalizacji przy Moście Teatralnym, stanowi przesłankę do dokonania pewnych podsumowań.

Opisując priorytet tramwajowy warto na początku przypomnieć powody stosowania priorytetu dla transportu zbiorowego:

1. W miastach o liczbie ludności od 100.000 mieszkańców nie da się w warunkach europejskich zapewnić pełnej swobody ruchu sa-

mochodowego, stąd konieczne jest zapewnienie mieszkańcom sensownej alternatywy zapewniającej dostępność. Taką alternatywą jest zazwyczaj transport zbiorowy. Może on być w stosunku do samochodu konkurencyjny również czasowo na wybranych relacjach – tych obciążonych dużym potokiem, w porach dnia w których ten duży potok występuje [21]. Warunkiem konkurencyjności czasowej jest jednak możliwość omijania zatorów samochodowych i priorytet na sygnalizacjach świetlnych. Celem, dla którego stosuje się priorytet jest więc zapewnienie atrakcyjnej czasowo alternatywy dla samochodu na silnie obciążonych relacjach.

2. Zachętą do korzystania z transportu zbiorowego może być również cena biletów – na cenę tą wpływają nakłady i koszty eksploatacji. Priorytet tramwajowy może pomóc obniżyć cenę po pierwsze przez zmniejszenie wydatku energetycznego [11], a po drugie przez zmniejszenie liczby tramwajów (mniejsze nakłady na zakup taboru, mniejsze koszty osobowe) – wprowadzenie pełnego lub wysokiego priorytetu na linii nr 13 pozwoliłoby na przykład na zmniejszenie liczby pociągów tramwajowych obsługujących tę linię z 13 do 10 [4]. Priorytet tramwajowy ma więc przełożenie na ekonomiczne wyniki transportu publicznego.
3. Priorytet dla transportu publicznego promuje ruch pieszy i korzystanie z pojazdów transportu zbiorowego, generując pośrednio duże zyski społeczne, socjologiczne, zdrowotne, przestrzenne i ekologiczne [3, 21, 23]. Zwiększenie udziału transportu publicznego w podziale modalnym poprawia bezpieczeństwo ruchu, a także zmniejsza potrzebną przestrzeń transportową. Transport zbiorowy poprawia więc realizację polityki zrównoważonego rozwoju, jego promocja (w tym zapewnianie priorytetu) jest wymagana Traktatem Akcesyjnym do Unii Europejskiej, a nawet można ją uznać za wymóg konstytucyjny.
4. W tramwaju jedzie przeciętnie 100 osób, w samochodzie 1,4 osoby. Stąd opóźnienie

10-sekundowe tramwaju to strata społeczna 1000 osobominut, a samochodu – 14.

Skala priorytetu

Przy realizacji zamówień publicznych konieczny jest precyzyjny opis oczekiwań wobec danego produktu, dotyczy to również systemów sterowania. Implementacja priorytetu wymaga więc określenia jego założeń, do czego przydatne jest wyskalowanie priorytetu. W tabeli 1 zestawiono proponowaną skalę priorytetu dla transportu zbiorowego. Skala ta jest jednak tylko propozycją (np. w niektórych opracowaniach priorytet bezwzględny obejmuje opisany w tabeli 1 priorytet pełny i wysoki), zalecane jest więc wpisywanie w SIWZ formuły „priorytet ... rozumiany jako ...” – inaczej pozostawia się furtkę dla interpretacji zapisów na korzyść zleceniobiorcy.

W tabeli 2 zestawiono priorytet dla tramwajów realizowany na sygnalizacjach świetlnych w Poznaniu. Priorytet autobusowy jest ograniczony do kilkunastu wyjazdów z zatok przystankowych i śluz na poziomie priorytetu częściowego (wyjazd w najbliższej fазі).

Priorytet bezwzględny

Priorytet bezwzględny oznacza puszczenie tramwaju w przywilejach pojazdu kolejowego – gwarantuje się że pojazdy i piesi opuszczają punkt kolizji przed dojechaniem tramwaju, a więc, że czasy międzyzielone będą liczone dla możliwie najwolniejszego pojazdu [1], a za skrzyżowaniem nie będzie zatoru blokującego przejazd. Ze względu na duże koszty i niewielki w warunkach poznańskich zysk w porównaniu z pełnym priorytetem nie zastosowano tego rozwiązania w Poznaniu.

Priorytet pełny

Priorytet pełny zakłada, że tramwaj przejedzie płynnie przez skrzyżowanie, z zastrzeżeniem, że może być przytrzymany przez inny pojazd na relacji kolizyjnej mający też pełny priorytet. Do

Tab. 1. Skala priorytetu związanego z detekcją dla komunikacji zbiorowej (rezultat dyskusji na konferencjach transportowych w Poznaniu; podobna skala została przedstawiona również w [5,10,21])

Priorytet	Opis
Bezwzględny	Sterowanie gwarantuje brak innych pojazdów na torze jazdy. Zasada stosowana w ruchu kolejowym.
Pełny	Gwarancja włączenia światła „jeźdź” tak, żeby nie spowodować konieczności hamowania. Priorytet dla tramwajów oznacza, że światło „jeźdź” jest gwarantowane o ile nie ma innego tramwaju na relacji kolizyjnej.
Wysoki	Duże prawdopodobieństwo włączenia światła „jeźdź” tak, żeby nie spowodować konieczności hamowania. W razie konieczności zwolnienia lub zahamowania z niewielkim (kilkusekundowym) czasem oczekiwania na światło „jeźdź”.
Koordinacja tramwajowa	Brak konieczności hamowania wynikającego z wskazań sygnalizacji z wyjątkiem tramwaju jadącego szybciej niż średni czas przejazdu.
Ważony	Przydzielanie światła „jeźdź” na podstawie analizy strat czasu poszczególnych użytkowników skrzyżowania, z uwzględnieniem wag liczonych między innymi według średniego napełnienia pojazdów.
Częściowy	Kompromis między minimalizacją strat czasu komunikacji zbiorowej i potrzebami innych użytkowników. Zapalania się światła „jeźdź” po skończeniu poprzedniej fazy (krótkie czasy oczekiwania), zazwyczaj przez możliwość włączenia w różnych momentach cyklu lub skrócenie fazy.
Koordinacja tramwajowo-samochodowa	Kompromis między wymogami koordynacji tramwajowej i samochodowej na wspólnym odcinku. Pod względem jakości koordynacja tramwajowo-samochodowa jest porównywalna z priorytetem częściowym.
Wydłużenie sygnału	W razie zgłoszenia gdy sygnalizator wskazuje sygnał „jeźdź” możliwość wydłużenia sygnału gwarantująca przejazd; w innych sytuacjach brak priorytetu.
Brak	Tak jak w sygnalizacji stałoczasowej.
Ujemny	Zwiększenie strat czasu w porównaniu z sygnalizacją stałoczasową.

zapewnienia priorytetu pełnego potrzeba zlokalizować pierwszy czujnik wykrywający tramwaj w odległości obejmującej (wzór 1 [4,21]):

- realizację minimalnej długości zielonego światła dla relacji kolizyjnej,
- realizację czasu międzyzielonego po relacji kolizyjnej,
- zapalenie zielonego światła z wyprzedzeniem pozwalającym motorniczemu kontynuować płynną jazdę.

odległość ta może osiągnąć nawet 350 m.

Wzór (1) może być rozrzeszony o kolejne elementy – np. koordynacja sygnalizacji świetlnej, wymagana przez Rozporządzenie [25] może wymagać oddalenia tego czujnika nawet o dalsze 200 m. Poza tym wzór (1) zakłada możliwość wyłączenia światła zielonego zaraz po upływie jego minimalnej długości, co jest niekorzystne dla przepustowości samochodowej relacji kolizyjnej – optymalizacja sterowania

Wzór (1) [4,21]

$$L_j \geq S_{nj} + (T_{rj} + T_{mzj} + T_{zielmin}) * V_{maxj} = S_{nj} + (T_{rj} + \frac{L_{ei} + L_{pi}}{V_{ei}} - \frac{L_{di}}{V_{max}} + T_z + T_{zielmin}) * V_{maxj}$$

gdzie:

V_{maxj} – maksymalna handlowa prędkość pojazdu priorytetowego,

S_{hj} – droga hamowania pojazdu priorytetowego z prędkości V_{max} do 0,

T_{rj} – czas reakcji prowadzącego pojazd priorytetowy (1 sekunda),

T_{mzj} – czas międzyzielony po relacji i przed relacją j ,

L_{ei} – droga od linii zatrzymania do końca obszaru kolizji relacji i z relacją priorytetową,

L_{pi} – długość standardowego pojazdu na relacji i ,

L_{di} – droga od linii zatrzymania do końca obszaru kolizji relacji priorytetowej,

V_{ei} – prędkość zjazdu standardowego uczestnika ruchu relacji i ,

$T_{zielmin}$ – minimalna długość otwarcia (zielonego światła) dla relacji i ,

T_z – długość światła żółtego (3 s dla pojazdów, 0 dla pieszych, rowerzystów i tramwajów).

Podstawiając wartości dla zwykłego skrzyżowania z wydzielonym torowiskiem i sygnalizacją stałoczasową przy prędkości tramwaju 40 km/h otrzymuje się odległość od linii zatrzymania około 200 m, jeżeli jednak skrzyżowanie jest rozległe, a przejścia dla pieszych długie, to

z punktu widzenia przepustowości może wymagać zaś wydłużenia odległości pierwszy czujnik – linia zatrzymania nawet o kolejne 350 m (a przy prędkości tramwaju ponad 40 km/h jeszcze więcej). Wreszcie tramwaj, obdarzony pełnym priorytetem, może nie być jedynym pojazdem z priorytetem nad innym strumieniem: analizy skrzyżowania przy Moście Teatralnym pokazały, że zapewnienie hierarchii priorytetu tramwaj->samochód na wprost lub w lewo->samochód w prawo->pieszy przy dużym obciążeniu ruchem i ograniczeniu maksymalnego oczekiwania na zielone światło do 120 sekund wymaga dalszego oddalania pierwszego czujnika tramwajowego, tym razem o około 100 m [9]. Zależności te zestawiono w tabeli 3.

Powyższe odległości wyraźnie pokazują, że realizacja pełnego priorytetu często będzie wymagać uwzględnienia czasu postoju na przystankach oraz wpływu sterowania ruchem na sąsiednich skrzyżowaniach. Konieczne może się więc okazać sterowanie odcinkowe [19].

Jak wynika z tabeli 1, pełny priorytet zrealizowano w Poznaniu na 8 skrzyżowaniach,

Tab. 2. Realizacja priorytetu tramwajowego w Poznaniu; opracowanie na podstawie [4,17] oraz późniejszych obserwacji

Priorytet	Liczba sygnalizacji*			
	Na skrzyżowaniu	Na przejściu	Na przejeździe	Razem
Bezwzględny	---	---	---	---
Pełny	7,5	5,0	4,0	16,5
Wysoki	12,5	3,0	1,0	16,5
Częściowy	15,5	1,0	1,0	17,5
Brak	24,5	---	1,0	25,5
Ujemny	2,0	---	---	2,0
Priorytet dla wlotu bocznego (np. wyjazd straży pożarnej, przejście dla pieszych)	---	2,0	4,0	6,0
Sygnalizacja stałoczasowa	9,0	---	---	9,0
Koordinacja akomodowana	4,0	3,0	---	7,0
Koordinacja stałoczasowa	3,0	---	---	3,0
Sygnalizacje pominięte – wbudowane w 2009 roku lub obecnie modyfikowane	20,0	1,0	---	21,0
Razem:	98,0	15,0	11,0	124,0

* Niektóre sygnalizacje dają różny priorytet w zależności od pory dnia, w takiej sytuacji wpisywano je jako pół skrzyżowania dla obu skrzyżowań

Tab. 3. Oddalenie pierwszego czujnika tramwajowego od linii zatrzymania na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną potrzebne dla realizacji pełnego priorytetu tramwajowego na standardowych skrzyżowaniach zwykłych i skanalizowanych (bez ruchu okrężnego)

	Prędkość tramwaju [km/h]		
	30	40	50
P1: Realizacja priorytetu tramwajowego	75-270 m	120-380 m	170-490 m
P2: P1 + koordynacja samochodowa z sąsiednim skrzyżowaniem	115-390 m	175-540 m	240-690 m
P3: P1 + optymalizacja przepustowości na skrzyżowaniu	75-520 m	120-715 m	170-810 m
P4: P2 + P3	115-640 m	175-870 m	240-1010 m
P5: Realizacja hierarchii priorytetów	75-350 m	120-480 m	170-620 m

w tym na 3 działa on okresowo. Pozostałe 5 skrzyżowań to skrzyżowania o małym poprzecznym do tramwaju ruchu samochodowym. Przyczyn braku pełnego priorytetu na większej liczbie skrzyżowań należy upatrywać w:

- złej jakości czujników,
- wadliwej lokalizacji czujników (na skrzyżowaniu przy Moście Teatralnym badania symulacyjne wskazały, że wadliwa lokalizacja czujników mogła spowodować 3-krotny wzrost strat czasu tramwajów [18]), w tym

wadliwemu sterowaniu w sytuacji gdy tuż przed linią zatrzymania jest przystanek,

- oporom politycznym przed nadmiernym blokowaniem ruchu samochodowego,
- założonymi ograniczeniami czasu oczekiwania na zielone światło,
- ograniczeniami wynikającymi z przepustowości przystanków [9] oraz z przepisami związanymi z przejazdem tramwajów przez rozjazdy [15].

Z drugiej strony należy pamiętać, że tramwaje służą pasażerom – nie jest więc korzystne, jeżeli tramwaj, co prawda będzie miał priorytet, ale dojście na przystanek będzie zajmowało kilka minut (zazwyczaj winna tak długiego czasu jest obsługa grup samochodowych, ale przy dużych natężeniach tramwaje też mogą zauważalnie blokować dojście [9]).

Priorytet wysoki

Priorytet wysoki zezwala na niewielkie opóźnienie (kilka, kilkanaście sekund) wybranych tramwajów w celu poprawienia obsługi innych uczestników ruchu. Badania symulacyjne przeprowadzone dla skrzyżowania przy Moście Teatralnym pokazały, że takie kilkusekundowe opóźnienie może decydować o możliwości włączenia zielonego światła dla pieszych, co znacząco poprawia jakość obsługi ruchu pieszego przy nieznacznym pogorszeniu obsługi tramwaju. Dla samochodów ten zysk jest mniejszy, ale również kilkusekundowe opóźnienie tramwaju może przynieść zauważalny zysk.

Nie zawsze zapewnienie pełnego priorytetu jest uzasadnione – przy taktowanym rozkładzie jazdy i zmiennym czasie obsługi na przystankach tramwaje jadące w godzinach o mniejszym obciążeniu potokami pasażerów będą mogły szybciej opuszczać przystanki. Szybsze opuszczanie przystanku nie przełoży się jednak na przyspieszenie przejazdu, gdyż motorniczy będzie dostosowywał się do rozkładu jazdy [12]. W związku z tym w pewnych godzinach nieszczytowych można zredukować priorytet do wysokiego bez szkody dla faktycznej jakości obsługi pasażerów [20]. Warunkiem jest obniżenie priorytetu tylko w tych godzinach, w których w ramach jednego zestawu rozkładu jazdy czas swobodnego przejazdu tramwaju jest mniejszy od maksymalnego czasu w tym zestawie.

W Poznaniu wysoki priorytet występuje głównie w miejscach, gdzie planowano priorytet pełny, ale błędy projektu (np. czujniki zlokalizowane zbyt blisko, pominięcie konieczności dania sygnału „jedź” z wyprzedzeniem) lub realizacji obniżyły poziom priorytetu. Są jednak miejsca, gdzie założono od razu wysoki priorytet, bądź dla ograniczenia strat czasu na relacjach kolizyjnych (priorytet działa zgodnie z założeniem), bądź też przy nietypowych rozwiązaniach – przykładem może być skrzyżowanie ul. Wołyńskiej z ul. Wojska Polskiego ze wspólnym pasem tramwajowo-samochodowym, obciążonym niewielkim ruchem samochodów. Ponieważ detekcja nie analizuje liczby samochodów, możliwe jest przy ich nieco większej liczbie chwilowe przytrzymanie tramwaju.

Warto w tym miejscu wspomnieć o problemie jaki pojawił się na dającym wysoki priorytet (priorytet ograniczony lokalizacją czujników na wylocie kolejnego skrzyżowania oraz koordynacją samochodową na ulicy Kościuszki) skrzyżowaniu ulic Fredry i Kościuszki. Samochód ekipy remontującej chodnik zajął pas samochodowy, w związku z czym samochody wjeżdżały na torowisko i blokując przejazd tramwajów czekały na zielone światło. Światła tego nie dostawały, bo tramwaje po zgłoszeniu wymuszały dla siebie priorytet, ale nie mogły jechać, bo były blokowane przez samochody. Powstał w ten sposób w miejscu normalnie pozbawionym długich kolejek zator w obie strony (rys. i fot. 1).

Priorytet rozkładowy

Założeniem priorytetu rozkładowego jest porównywanie czasu pojawienia się tramwaju na czujniku z czasem według rozkładu i odpowiednie nadawanie priorytetu. W ten sposób tramwaj przyspieszony będzie sterowany spolegliwie wobec relacji kolizyjnych, a tramwaj opóźniony dostanie pełny priorytet. Rozwiązanie jest niewątpliwie warte rozważenia, jednakże ze względu na brak w poznańskich tramwajach nadajników podających numer linii pozostaje nadal teoretyczne.

Koordinacja

Innym obok priorytetu rozkładowego typem priorytetu wysokiego jest koordynacja tramwajowa. Koordinacja zakłada, że tramwaj jadący w wiązce koordynacyjnej zgodnie ze średnim czasem przejazdu lub wolniej powinien przejeżdżać płynnie, natomiast tramwaj jadący szybciej może być przytrzymany. Ze względów energetycznych warto postarać się, aby przy-

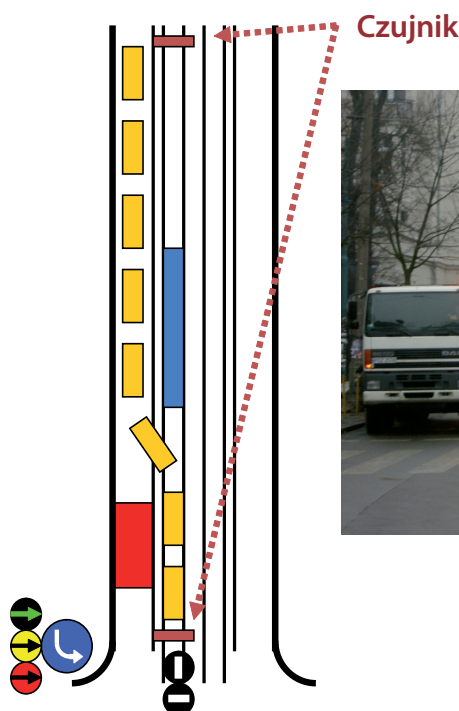
trzymanie to odbywało się na przystankach. Zaletą koordynacji jest usztywnienie przejazdu tramwaju na kolejnych skrzyżowaniach, co pozwala zoptymalizować sterowanie pozostałymi grupami sygnałowymi.

W koordynacji istotną kwestią jest sposób włączenia tramwaju w wiązkę koordynacyjną na pierwszej sygnalizacji. Istnieją następujące możliwości:

- tramwaj decyduje o czasowej lokalizacji wiązki; problemem może być zsynchronizowanie wiązek tramwajów jadących z przeciwnych stron,
- rozkład jazdy decyduje o czasowej lokalizacji wiązki – należy wtedy zadać pytanie co się dzieje z tramwajami opóźnionymi w stosunku do rozkładu jazdy,
- czasowa lokalizacja wiązki jest usztywniona – wtedy na wlocie w ciąg koordynacyjny tramwaj może mieć duże straty czasu, które należy skompensować długim odcinkiem koordynacji.

Poznańskie doświadczenia z koordynacją są niewielkie, co biorąc pod uwagę jej zalety (wysoki priorytet przy ograniczonym negatywnym wpływie na ruch samochodowy) jest dość dziwne. Z dłuższych skoordynowanych odcinków warto wymienić ulicę Grunwaldzką, gdzie jednak zastosowany algorytm jest mieszanką koordynacji i priorytetu wysokiego. Charakterystyczną cechą tego projektu było to, że priorytet był znacznie lepiej widoczny niż wynikało to z dokumentów. W dokumentach bowiem na wszelki wypadek założono przyspieszenie o 1 minutę, gdy tymczasem pomierzone przyspieszenie wyniosło 2,5-3,5 minuty [2].

Spektakularne doświadczenie koordynacji tramwajowej można było obserwować na ciągu ul. Św. Marcin, gdzie tramwaj wypuszczony w odpowiednim momencie z pierwszego skrzyżowania (ul. Gwarna) był w stanie przejechać



1. Zator na ulicy Fredry spowodowany postojem ciężarówki ekipy budowlanej i wysokim priorytetem dla tramwajów

płynnie skrzyżowania drugie (ul. Kościuszki) i trzecie (al. Niepodległości); jeżeli jednak wskutek zakłóceń ruszał z drugiego skrzyżowania, to na trzecim nie zdążył przejechać. Przykład pokazuje, że dobre sterowanie ruchem tramwajów może obniżyć czas zajmowany przez tramwaj na kluczowym skrzyżowaniu. System był obiecujący [7,24], niestety opóźnienie budowy inteligentnej sygnalizacji świetlnej na ulicy Gwarnej wymusiło poszerzenie więzki koordynacyjnej.

Badania symulacyjne nad koordynacją tramwajową przeprowadzono dla ciągu ul. Głogowskiej [7,8,18,24], gdzie założono usztywnienie lokalizacji więzki przez synchronizację na skrzyżowaniach granicznych koordynacji (z ulicami Hetmańska i Krzywą). Wyniki średnich strat czasu pokazuje tabela 4. Koordynacji jednak nie zrealizowano ze względu na zbyt blisko położone skrzyżowania – ostatecznie zastosowano priorytet częściowy i wysoki. W oparciu o wyniki symulacji była zgłaszana konieczność modyfikacji organizacji ruchu (zamknięcie przejazdu w poprzek ulicy Głogowskiej na skrzyżowaniu z ulicami Palacza i Krauthofera oraz umożliwienie skrętu w lewo z ulicy Głogowskiej na tym skrzyżowaniu), ale decyzje o geometrii ulicy zostały podjęte przed rozpoczęciem analiz z zakresu inżynierii ruchu.

du z Ronda Kaponiera dla tramwaju skręcającego przez wcześniejsze wyłączenie zielonego światła dla relacji kolizyjnej [6,24].

Brak priorytetu

Na części skrzyżowań poznańskich, pomimo wbudowania akomodowanej sygnalizacji świetlnej, nie zastosowano priorytetu tramwajowego. Przyczyną była geometria skrzyżowania (skrzyżowania z wyspą centralną), oszczędność na detekcji lub problemy technicznych w historycznej zabudowie; były jednak sygnalizacje, gdzie priorytet tramwajowy po prostu zrezygnowano. Analizy nad priorytetem tramwajowym w Poznaniu wskazały jednak, że w tylko jednym miejscu (skrzyżowanie trasy winiarskiej z al. Solidarności – II ramą) brak priorytetu jest uzasadniony; na pozostałych skrzyżowaniach należy zastosować priorytet, a skrzyżowania z wyspą centralną włączyć w ciągu skoordynowane [17,21].

Priorytet ujemny

W pojedynczych lokalizacjach w Poznaniu realizacja akomodowanej sygnalizacji w miejsce stałoczasowej spowodowała pogorszenie jakości ruchu tramwajowego, a więc zastosowano

Należy odnotować, że skrzyżowań z priorytetem ujemnym pojawiło się zaledwie kilka, ostatnio niektóre z nich są przeprogramowywane.

Problemy ze stosowaniem priorytetu na przystankach

Realizacja priorytetu wymaga przewidzenia momentu pojawienia się tramwaju. Może to być trudne jeżeli w odległości mniejszej niż lokalizacja pierwszego czujnika pojawi się przystanek. Czas obsługi pasażerów na przystanku jest bowiem wartością probabilistyczną, tymczasem priorytet nie powinien ponad potrzebę ograniczać obsługę grup kolizyjnych [19]. Problem ten można rozwiązać stosując następujące sposoby:

1. Procedura priorytetu jest uruchamiana dopiero po ruszeniu z przystanku. Rozwiązanie takie dla przystanków położonych tuż przy linii zatrzymania przy możliwości wyłączenia wszystkich grup kolizyjnych powoduje opóźnienie rzędu 7-14 sekund, a więc zejście z priorytetu pełnego na częściowy. Dobitną ilustrację wady tego rozwiązania, ograniczającego o 7% przepustowość, pokazuje przystanek Most Dworcowy, gdzie występują zatory tramwajowe (fot. 2). Metodę tę należy więc uznać za niekorzystną [20].
2. Procedura priorytetu uruchamiana jest przed przystankiem (czujnik nr 1) i weryfikowana w momencie ruszenia z przystanku (czujnik nr 2). Jeżeli przystanek jest oddalony od linii zatrzymania, to metoda ta może być bardzo korzystna: odczyt z czujnika nr 1 ograniczy włączanie grup kolizyjnych, natomiast odczyt z czujnika nr 2 dopiero posłuży co wyłączenia grup kolizyjnych [24].
3. Motorniczy na przystanku, widząc że obsługa pasażerów zbliża się ku końcowi, włącza żądanie światła „jedź”. Procedura ta została zastosowana na nowej trasie przez Most Św. Rocha i jest obecnie weryfikowana, można jednak uznać że efekty są na poziomie priorytetu wysokiego – są zachęcające [17].
4. Czas postoju na przystanku jest szacowany. Metoda ta może występować samodzielnie lub wspomagać metody 2 i 3, jest skuteczna jeżeli w danej godzinie rozrzut czasu obsługi pasażerów jest niewielki. Ważne jest, aby wykorzystać czujniki do ciągłej weryfikacji czasu postoju na przystanku w podziale na małe (np. godzinne) okresy bazowe [19].

Inny problem pojawia się jeżeli przystanek jest za skrzyżowaniem – wtedy drugi tramwaj, czekając aż pierwszy obsłuży pasażerów, może blokować skrzyżowanie (fot. 3). Rozwiązaniem, sprawdzonym na razie symulacyjnie z obiecującymi wynikami [9], może być włączenie do algorytmu sterowania procedury uwzględniania zajętości przystanku, a więc przesunięcie momentu wykorzystania pełnego lub wysokiego priorytetu.

Tab. 4. Wyniki badań symulacyjnych nad koordynacją tramwajową na ul. Głogowskiej w Poznaniu [7,8]

Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. T oznacza przystanek przed linią zatrzymania.	Tramwaje na Górczyn				Tramwaje do centrum			
	cykl 90-sekundowy		cykl 120-sekundowy		cykl 90-sekundowy		cykl 120-sekundowy	
	SO [s]	MO [s]	SO [s]	MO [s]	SO [s]	MO [s]	SO [s]	MO [s]
Hetmańska (T)	46,6	95	65,7	205	3,9	9	12,2	23
Zajeżdźnia	2,4	3	2,3	3	3,5	6	3,6	6
Palacza (T)	7,6	15	8,8	19	7,6	12	7,8	12
Górczyńska	3,8	8	3,9	6	0,0	0	0,3	5
Kosynierska	0,0	0	0,1	3	4,9	6	4,9	6
Sielska (T do centrum)	0,3	4	0,8	6	16,8	27	8,8	18
Krzywa	14,7	82	15,2	22	56,0	95	39,6	80

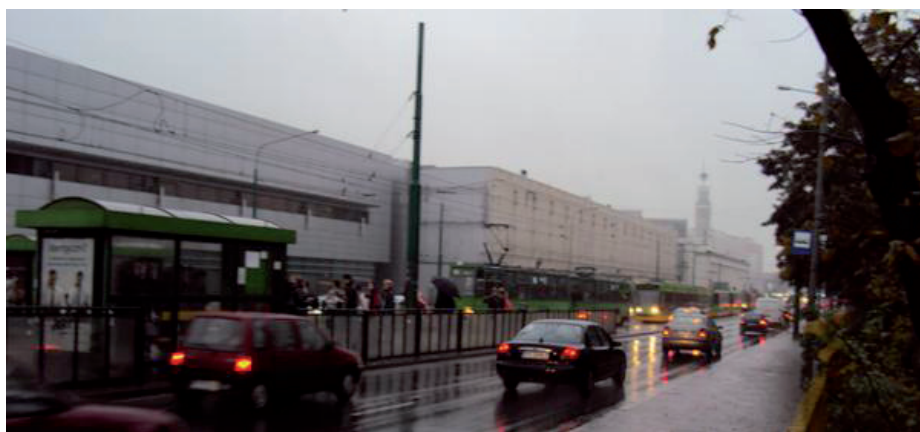
SO – średnie opóźnienie tramwaju
MO – maksymalne opóźnienie tramwaju

Priorytet częściowy

Priorytet częściowy powoduje zazwyczaj odczuwalne przez pasażerów zatrzymanie tramwaju, jednakże czas postoju nie jest zbyt długi. Nie można więc uznać priorytetu częściowego za metodę zapewniającą płynny przejazd, natomiast jest to jednak widocznie lepsze rozwiązanie od braku priorytetu.

W Poznaniu priorytet częściowy zastosowano na skrzyżowaniach obciążonych dużym ruchem samochodowym – tramwaj wciska się między dwie fazy, natomiast ich nie skraca; pozwala to wykorzystać przepustowość wlotu, może natomiast generować straty wynikające z czasów międzyzielonych. Osobną kwestią jest sterowanie na skrzyżowaniach z wyspą centralną będących węzłami tramwajowymi – na skrzyżowaniach tych geometria skrzyżowania silnie ogranicza metodę sterowania [22]. Warto więc wspomnieć o przyspieszeniu zjaz-

priorytet ujemny. Powodem takiego stanu była oszczędność na detekcji – na skrzyżowaniu Grunwaldzka – Wojskowa zastosowano tylko jeden czujnik, który w związku z tym musiał być zlokalizowany nie dalej niż 20 m od linii zatrzymania. W rezultacie po zgłoszeniu tramwaj musiał czekać na wyłączenie zielonego światła na przejściu i przez czas międzyzielony, co w porównaniu z uprzednio działającą koordynacją pogorszyło jakość obsługi. Inna sytuacja wystąpiła na skrzyżowaniu ulic Garbary – Małe Garbary: tu tramwaj mógł być obsługiwany tylko w jednej fazie cyklu, jeżeli jednak się nie pojawił to faza była modyfikowana. Mała odległość czujnika od linii zatrzymania powodowała, że tramwaj podjeżdżający do skrzyżowania tak, aby skorzystać ze swojej fazy był zbyt późno zgłaszany – na tyle późno, aby zmiany w fazie uniemożliwiały już jego puszczenie. Tymczasem przy sygnalizacji stałoczasowej ów tramwaj skorzystał ze swojej fazy przejeżdżając płynnie.



2. Zator na ulicy Roosevelta. Zmiana detekcji i algorytmu sterowania umożliwiającą wcześniejsze zgłoszenie tramwaju mogłaby podwyższyć przepustowość tramwajową o 70%



3. Tramwaj, czekając na możliwość wjazdu na przystanek, blokuje przejście dla pieszych

Rozjazdy

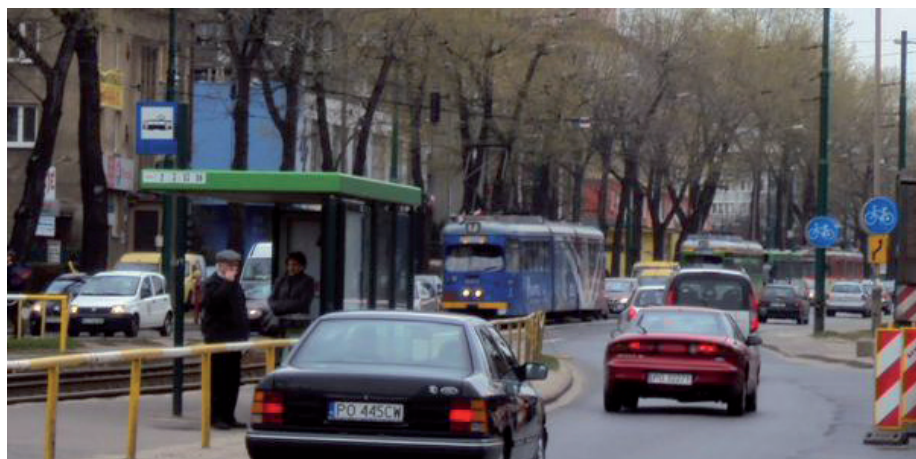
Konieczność nastawiania rozjazdów i przejazdu przez nie może istotnie ograniczyć efekty stosowania priorytetu. Pierwszy powód to ograniczenie prędkości na rozjazdach do 10-15 km/h, które w algorytmach sterowania trzeba koniecznie uwzględnić. Warto też w tym miejscu zadać pytanie o lokalizację czujników, pominięcie w obliczeniach odległości pierwszego czujnika części drogi hamowania z 40 km/h do 0 jeżeli tramwaj i tak musi hamować do 10 km/h nie wpływa bowiem zauważalnie na jakość sterowania [15].

System sterowania zwrótnicami może jednak wymusić zachowanie odstępu między tramwajami – może to stanowić istotny problem ze względu na wydłużenie obsługi tandemu tramwajów nawet o 7 sekund oraz na ograniczenie pojemności odcinków akumulacyjnych [22], włącznie z groźbą spowodowania pętli krytycznej. Problem został szerzej opisany w [15].

Sieciowa architektura informacji

Opisane w tabeli 3 odległości sięgają nie tylko okolicznych przystanków, ale również skrzyżowań. Czas pojawienia się tramwaju na kolejnym skrzyżowaniu będzie więc zależał od sposobu obsługi na skrzyżowaniu poprzedzającym – konieczna jest więc wymiana informacji nie tylko w relacji czujnik – sterownik (a może lepiej: sterowniki), ale również w relacji sterownik –

sterownik [19]. Ponadto jeżeli po drodze występuje węzeł tramwajowy, to czujniki muszą odczytać, czy dana informacja dotyczy konkretnego skrzyżowania, czy też tramwaj skręci na węzle w innym kierunku. Te wszystkie zależności (a można temat rozszerzyć chociażby o informację pasażerską) wskazują na konieczność rozważenia sieciowej architektury detekcji i sterowania nawet przy realizacji priorytetu na pojedynczym skrzyżowaniu [19]. Założenia sieciowej architektury detekcji tramwajowej w Poznaniu są obecnie opracowywane.



4. Tramwaje w zatorze samochodowym bardziej niż priorytetu potrzebują swobodnego przejazdu

Jakość realizacji infrastruktury

Bardzo ważną rzeczą jest dbałość o jakość infrastruktury priorytetu tramwajowego, bowiem nawet małe niedociągnięcia mogą znacząco pogorszyć jakość sterowania (np. co zostało wspomniane wcześniej, zwiększyć trzykrotnie straty czasu). W sytuacji, gdy każdy projekt sygnalizacji ma charakter autorski trudno uznać za właściwą zasadę dominacji ceny w przetargach – cena powinna być, aby dobra firma nie zażądała milionów złotych za dobry projekt, natomiast podstawowym kryterium powinna być deklarowana jakość obsługi.

Niezbędna dla zapewnienia dobrej infrastruktury ITS jest weryfikacja rezultatów sterowania – weryfikacja ta musi sprawdzać zgodność realizacji z założeniami i zapewnić możliwość poprawienia algorytmu sterowania (taka możliwość powinna być zapisana w umowie z wykonawcą), ale również prowadzić do wniosków racjonalizatorskich [5].

Zatory samochodowe

Na torowiskach wspólnych z pasami ruchu samochodowego istotniejsza od zapewnienia priorytetu na skrzyżowaniach może okazać się możliwość dojeżdżania do nich (fot. 4). W takiej sytuacji konieczny jest odpowiedni system sterowania ruchem samochodowym, bramiący dopływy samochodowe do krytycznego odcinka. W zależności od lokalizacji system ten może uwzględniać lokalizację tramwaju (np. przy braku zgłoszeń wpuszczać kilka samochodów więcej) lub nie (np. jeżeli odcinek akumulacji za odcinkiem wspólnego pasa samochodowo-tramwajowego pomieści więcej samochodów niż jest w stanie przejechać w jednym cyklu na skrzyżowaniu powodującym zator). Poznań nie wprowadził dotychczas działań z zakresu ITS służących ochronie torowisk tramwajowych przed zatorami samochodowymi, być może takie rozwiązania pojawią się na ulicy Mostowej i, w związku z EURO2012, na ulicy Grunwaldzkiej.

Wnioski

- Doświadczenia poznańskie wskazują na to, że z wielu względów warto stosować priorytety

dla tramwajów, straty czasu na sygnalizacjach stanowią bowiem 85% strat czasu związanych z obciążeniem ulic ruchem [13]. Niestety ta prawda ma trudności w przebicciu się do decydentów.

- Porównanie prędkości handlowej na trasie Poznańskiego Szybkiego Tramwaju i na trasie tramwajowej przez Górny Taras Rataj wskazuje, iż metodami ITS (priorytetem) można zapewnić w wielu miejscach jakość ruchu porównywalną z tą, jaką daje wydzielona trasa. Ograniczenia prędkości wynikające z konieczności pokonywania wydzieloną trasą przeszkód mogą nawet spowodować, że trasa ta będzie gorsza od dobrze wyposażonej trasy naziemnej z priorytetem tramwajowym [14].
- Systemy ITS są znacznie bardziej czułe na różne zakłócenia niż sygnalizacja stałoczasowa, konieczne jest więc monitorowanie ich funkcjonowania, a w razie potrzeby włączenie programu stałoczasowego.
- Dobry priorytet może wymagać daleko odsuniętej detekcji – detekcja ta sięgnie sąsiednich skrzyżowań, stąd warto postarać się o spójną architekturę wymiany informacji między czujnikami i sterownikami oraz wzajemnie między sterownikami.
- Warto inwestować w dobrą jakość systemu priorytetu tramwajowego, gdyż niewielkie błędy mogą powodować istotne pogorszenie jakości obsługi – błędy te powodowały np. zakłócenia na skrzyżowaniu takie jak dla pełnego priorytetu tramwajowego, przy obsłudze tramwajów na poziomie priorytetu częściowego. Dobra jakość systemu wymaga jednak:
 - przetargu bez dominacji kryterium ceny, lub nawet konkursu;
 - uwzględnienia ograniczeń takich jak zatory samochodowe czy przejazd przez rozjazdy;
 - świadomości, że „sygnalizacja akomodowana daje w stosunku do sygnalizacji stałoczasowej większe możliwości – zarówno poprawy sytuacji, jak i zrobienia błędu.” [5];
 - możliwości weryfikacji i poprawienia algorytmu sterowania po zainstalowaniu;
 - odporności na naciski polityczne.
- Możliwości ITS w Poznaniu (a pewnie tak samo w innych miastach) są wykorzystane zaledwie w niewielkim stopniu. Największą barierą wykorzystania ITS wydaje się być bariera wyobrażenia sobie różnych zastosowań istniejącej infrastruktury. ◀

Literatura

[1] M. Dąbrowa-Bajon: Podstawy sterowania ruchem kolejowym. Politechnika Warszawska, Warszawa 2002.

[2] T. Folwarski, J. Saganowski: Zintegrowany system sterowania ruchem na ulicy Grunwaldzkiej w Poznaniu. Zastosowane technologie i efekty. Materiały VI Konferencji Naukowo-Technicznej „Transport a rozwój zrównoważony”, Poznań 2007.

[3] S. Gaca, W. Suchorzewski, M. Tracz: Inżynieria ruchu drogowego. WKiŁ, Warszawa 2008.

[4] M. Kaczmarek, J. Rychlewski: Analiza możliwości usprawnienia transportu tramwa-

jowego w Poznaniu. Opracowanie na zlecenie Urzędu Miasta w Poznaniu, Poznań 2005.

[5] M. Kaczmarek, J. Rychlewski: Detekcja jako niezbędny element systemu zmiennoczasowej sygnalizacji świetlnej w miastach. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1621, Gliwice 2004.

[6] M. Kaczmarek, J. Rychlewski: Sterowanie ruchem na rondach. II Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego.” Poznań, 1999.

[7] M. Kaczmarek, J. Rychlewski: Sterowanie skoordynowane ruchem w arterii komunikacyjnej z priorytetem dla tramwajów. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Transport XXI wieku”, Warszawa, 2001.

[8] M. Kaczmarek, J. Rychlewski: Sterowanie skoordynowane ruchem z priorytetem dla tramwajów. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Nowoczesne rozwiązania techniczne w komunikacji tramwajowej”, Wrocław, 2000.

[9] M. Kaczmarek, J. Rychlewski: Sterowanie zależne od ruchu z priorytetem dla tramwajów na skrzyżowaniu ulic. Materiały VI Konferencji Naukowo - Technicznej „Transport a rozwój zrównoważony”, Poznań 2007.

[10] M. Kruszyna M, J. Lutogńiewski, B. Trzciniowicz: Sygnalizacje świetlne z priorytetem dla komunikacji zbiorowej we Wrocławiu. Transport miejski 7-8/2002.

[11] A. Krych: Ewaluacja pilotażowego programu Ecos-Phare inteligentnego sterowania ruchem ulicznym priorytetem dla tramwaju. Materiały II Konferencji Naukowo-Technicznej „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań 1999.

[12] A. Krych: Prędkość normatywna i straty czasu w ruchu tramwajowym. Materiały VII Konferencji Naukowo-Technicznej „Transport a rozwój zrównoważony”, Poznań 2009.

[13] A. Krych: Straty i koszty strat czasu w komunikacji publicznej. Materiały III Konferencji Naukowo - Technicznej „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań 2001.

[14] A. Krych: Szybki i szybszy tramwaj – ewolucja idei i ich aplikacji na przykładzie Poznania. Materiały konferencji „Transport publiczny w Warszawie kluczem harmonijnego rozwoju stolicy Polski”, Warszawa 2006.

[15] R. Kupś, A. Majchrzycki, J. Rychlewski: Wpływ rozjazdów na jakość ruchu tramwajowego. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej 3/2007.

[16] J. Piotrowski: Wstęp do Materiałów Seminarium Naukowego Inteligentne systemy sterowania ruchem ulicznym w mieście Poznaniu. Poznań 1996.

[17] J. Rychlewski: Analiza efektywnego udzielenia priorytetu. Prezentacja na Forum Transportowym SITK, Poznań 2009.

[18] J. Rychlewski: Evaluation of rail traffic quality in Poznań by computer simulation. Computational Methods in Science and Technology 9 (1-2/2004).

[19] J. Rychlewski: ITS w sterowaniu ruchem tramwajowym. Wysłane do materiałów konferencyjnych III PKITS w Warszawie.

[20] J. Rychlewski: Modelowanie ruchu tramwajów. Przegląd ITS 5/2008.

[21] J. Rychlewski: Priorytet dla transportu zbiorowego na sygnalizacji świetlnej. Materiały VIII Konferencji Komunikacji Zbiorowej, Lubin 2007.

[22] J. Rychlewski: Przepustowość sieci tramwajowej na przykładzie EURO2012. Materiały VII Konferencji Naukowo-Technicznej „Transport a rozwój zrównoważony”, Poznań 2009.

[23] J. Suda: Priorytety dla pojazdów jako metoda realizacji celów i zadań systemu zarządzania komunikacją zbiorową. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Nowoczesne rozwiązania techniczne w komunikacji tramwajowej”, Wrocław, 2000.

[24] Materiały firmy Vialis, Poznań 2005.

[25] Szczegółowe warunki techniczne dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunki ich umieszczania. Załączniki 1-4 do rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003. Dz. U. 220/2003 poz. 2181.

dr inż. Jeremi Rychlewski
Politechnika Poznańska, ZDK IIL