

Mariusz KACZMAREK<sup>1</sup>, Jeremi RYCHLEWSKI<sup>2</sup>

## ZMIENNO CZASOWA SYGNALIZACJA ŚWIETLNA NA SKRZYŻOWANIACH W MIASTACH

**Streszczenie.** Zmiennoczasowa sygnalizacja świetlna pozwala znacząco poprawić jakość ruchu na miejskich skrzyżowaniach, jednocześnie jednak wzrasta ilość możliwych defektów projektu i wykonania takiej sygnalizacji. Osiem lat doświadczeń stosowania złożonych programów sygnalizacji akomodowanej i acyklicznej w Poznaniu pozwala wyciągnąć pewne wnioski i sformułować ostrzeżenia. Niniejszy artykuł ma na celu syntezę doświadczeń prezentowanych w latach poprzednich: uwzględniając punkt widzenia różnych użytkowników ruchu, stanowi jednocześnie analizę wpływu zmiennoczasowej sygnalizacji na system transportowy miasta Poznania. Pracę kończą propozycje metod sprawdzania jakości akomodowanej i acyklicznej sygnalizacji i wnioski.

## APPLICATION OF TRAFFIC RESPONSIVE MANAGEMENT IN CITY TRAFFIC

**Summary.** Application of traffic responsive management allows for a significant improvement of traffic quality on city junctions. This advantage, however, comes with an increase of possible defects in design and construction of such tool. 7 years of experience in applying complex algorithms for traffic signals on Poznań's junctions allows to extract some conclusions and warnings. A synthesis of the experience presented on earlier occasions, with a point of view of different street users, is a goal of this paper. Such synthesis is therefore an analysis of influence of traffic responsive management on transportation system of Poznań. Proposals of traffic responsive lights programme check-up and conclusions sum up this paper.

### 1. WPROWADZENIE

Stałoczasowa sygnalizacja świetlna charakteryzuje się cyklicznym powtarzaniem wszystkich wskazań sygnałów w ściśle określonych stałych odstępach czasu, natomiast w zmiennoczasowej sygnalizacji świetlnej następuje zmienność tych odstępów dla niektórych lub wszystkich wskazań [16]. Zmienność ta polega na dostosowaniu długości zielonego światła w cyklu do sytuacji ruchowej, rezygnacji z niektórych faz, przyjęciu sterowania grupami w miejsce sterowania fazowego lub rezygnacji z określenia kolejności zezwolenia na ruch dla poszczególnych grup pojazdów. Płynna długość cyklu i czasów otwarcia, a także zmiany kolejności poszczególnych faz niosą ze sobą istotne zwiększenie możliwości poprawy jakości ruchu, ale również zakresu potencjalnych defektów projektowania i wykonawstwa.

<sup>1</sup> Zakład Badań Operacyjnych i Sztucznej Inteligencji, Instytut Informatyki Politechniki Poznańskiej, Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, tel. (61) 6652128, e-mail: mariusz.kaczmarek@cs.put.poznan.pl

<sup>2</sup> Zakład Dróg Kolejowych, Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej, Piotrowo 5, 61-138 Poznań, tel. (61) 6652407, e-mail: jeremi.rychlewski@put.poznan.pl

Poznań jest w czołówce polskich miast w zakresie stosowania zmiennoczasowej sygnalizacji świetlnej, zarówno na poziomie lokalnych sterowników, jak też centralnego sterowania koordynacją sygnalizacji świetlnej. Osiem lat doświadczeń pozwala na wyciągnięcie wniosków dotyczących wpływu akomodowanej i acyklicznej sygnalizacji świetlnej na wszystkich poszczególnych użytkownikach ulic, a więc również łącznie na system transportowy miasta lub jego części. Syntetyczny charakter pracy i ograniczenia edytorskie pozwalają tylko ogólnie opisać niektóre problemy – większość z nich została jednak przedstawiona szczegółowo we wcześniejszych publikacjach.

Niniejszy referat opisuje systemowe podejście do sygnalizacji świetlnej na pojedynczym skrzyżowaniu, nie obejmuje natomiast zagadnień koordynacji sygnalizacji świetlnej jako systemu sterowania ruchem miejskim.

## 2. SYGNALIZACJA ŚWIETLNA A UCZESTNICY RUCHU

### A. Ruch samochodowy

Ruch samochodowy jest jedyną formą ruchu ulicznego często zagrożoną zatorami (zatory tramwajowe są rzadkim zjawiskiem, a piesze lub rowerowe – wyjątkowym). Z tego powodu wiele programów sygnalizacji jest optymalizowanych z punktu widzenia przepustowości wlotów jezdni lub strat czasu samochodów, co z kolei pozytywnie wpływa na eliminację większości błędów.

Pokazane w tablicy 1 wyniki badań symulacyjnych i terenowych poznańskich ulic wskazują na istotną przewagę sterowania zmiennoczasowego nad stałoczasowym. Skala poprawy jakości ruchu zależy między innymi od stopnia zatłoczenia i geometrii skrzyżowania. Odczyty z czujników wskazują na wzrost przepustowości o około 20% w skali miasta. Dla porównania największe wystawy Międzynarodowych Targów Poznańskich generują dodatkowo około 5% ruchu – wzrost ten wystarczy, aby w istotny sposób pogorszyć jakość ruchu w mieście.

Tablica 1

Poprawa warunków ruchu samochodowego w wyniku zastosowania akomodowanego programu sygnalizacji. Parametry dla sygnalizacji stałoczasowej = 100%

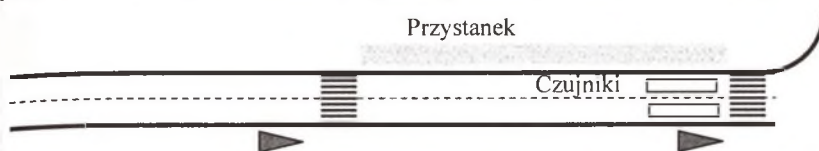
Badany obszar	Praca przewozowa	Straty czasu	Srednia prędkość
Ulica Bukowska	+ 35%	-60%	+85%
Rondo Kaponiera	+9%	-10%	+13%
Most Teatralny	+8%	-44,1%	+39%
II Rama rano	*	-30,3%	brak danych
II Rama popołudniu	*	-31,1%	brak danych
Niezłomnych	+12%	-34,6%	+21%
Niepodległości	+13%	-65,0%	+79%
Rondo Rataje	+6%	-16%	brak danych
Kraków: Góralska-Zakopiańska	brak danych	-20,9%	brak danych

\*dane dla krytycznego skrzyżowania Reymonta-Hetmańska-Arciszewskiego-Grochowska w ciągu II Ramy.

Źródło: [2][4][6][7][8][10][13][20]

Zastosowanie zmiennoczasowej sygnalizacji świetlnej można wykorzystać do wzrostu przepustowości danego obiektu lub do redukcji strat czasu poprzez zmniejszenie długości cyklu. Skrócenie długości cyklu stanowi bardzo istotną zaletę w gęstej zabudowie miejskiej

oraz w tzw. minisieczkach ulic [8], pozwala bowiem wykorzystać pojemność akumulacyjną krótkich pasów ruchu. Badania przeprowadzone dla kilku obiektów w Poznaniu wykazały, że wprowadzenie skróconego cyklu w połączeniu z odpowiednią akomodacją pozwoliło na wielu skrzyżowaniach zlikwidować blokowanie pasów w strefie rozrządu [7][8]. Akomodacja może też odegrać istotną rolę na skrzyżowaniach z wyspą centralną zapobiegając blokowaniu wewnętrznych segmentów [6]; na skrzyżowaniach tych zaobserwowano również stałość wartości przepustowości w stanach przesyconych (dla sterowania stałoczasowego przesylenie doprowadzało do zmniejszenia przepustowości o ponad 50%) i większą elastyczność ukierunkowaną na wyrównanie strat czasu na poszczególnych wlotach [10]. Do nietypowych rozwiązań można też zaliczyć ochronę przystanków transportu zbiorowego przed spaliniami, zrealizowaną na ulicy Głogowskiej w



Rys. 1. Przystanek tramwajowy na ulicy Głogowskiej w Poznaniu. Prowadzą do niego przejścia na obu jego końcach

Fig. 1. Tram stop on Głogowska street in Poznań connected to two pedestrian crossings

Poznaniu (rys. 1): czujniki czuwają, aby wszystkie pojazdy, które wjechały na odcinek równoległy do przystanku, mogły bez zatrzymania przejechać przez skrzyżowanie [9].

Udanym doświadczeniem jest zastosowanie zmiennoocyklicznej sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniach zlokalizowanych blisko przejazdów kolejowych, strzeżonych zazwyczaj samoczynną sygnalizacją przejazdową (typu B lub C) [19]. Sygnalizacja taka działa jak na zwykłym skrzyżowaniu do momentu zgłoszenia pociągu, następnie najpierw umożliwia opuszczenie obszaru kolizji przez pojazdy zjeżdżające z przejazdu, a potem obsługuje relacje nie korzystające z przejazdu. Po przejechaniu pociągu sterownik przywraca równowagę ruchową skrzyżowania obsługując przede wszystkim relacje przechodzące przez przejazd.

## B. Transport zbiorowy

Głównym powodem zainstalowania w 1996 roku na skrzyżowaniu Most Teatralny – Roosevelt – Dąbrowskiego acyklicznej zależnej od ruchu sygnalizacji świetlnej była konieczność zapewnienia dobrej jakości ruchu tramwajowego na skrzyżowaniu obciążonym 132 pociągami w godzinie (ponad 2 pociągi na minutę). Brak cyklicznych ograniczeń w programie sygnalizacji umożliwił realizację pełnego priorytetu (opis priorytetu na sygnalizacji został opisany w publikacji [5]) dla ruchu tramwajowego, co radykalnie poprawiło jego jakość (tablica 2), a także zmniejszyło zużycie energii o 30% [17]. Jeżeli w wyniku braku zapotrzebowania sterownik pomija fazę z sygnałem „jedź” dla autobusu, to priorytet częściowy związany z detekcją dostaje grupa przejmująca po fazie autobusowej miejsce w cyklu. Za priorytet dla autobusu można natomiast uznać włączenie sygnału „jedź” średnio szybciej niż w programie stałoczasowym.

Wielkość poprawy warunków ruchu dla transportu zbiorowego zależy w dużej mierze od opisanej w [5] skali priorytetu. Realizacja pełnego priorytetu na skrzyżowaniu Most Teatralny – Roosevelt – Dąbrowskiego pozwoliła zapewnić płynny przejazd dla większości tramwajów przy maksymalnym pojedynczym opóźnieniu nie przekraczającym 20 sekund. Pomimo tak dobrych warunków istnieje nadal możliwość 3-krotnego zmniejszenia strat czasu przy zastosowaniu priorytetu idealnego – priorytet ten jest jednak czuły na jakość projektu, wykonania i zastosowanych materiałów.

Tablica 2

Średnie straty czasu i średnia prędkość tramwajów na skrzyżowaniu Most Teatralny – Roosevelta – Dąbrowskiego w Poznaniu w zależności od sposobu sterowania

Metoda sterowania ruchem	Średnia strata czasu	Średnia prędkość
	[s/poj.]	[km/h]
Badania skrzyżowania bez uwzględniania otoczenia [14]		
Brak sygnalizacji, pierwszeństwo na ul. Roosevelta	20,7	28,59
Sygnalizacja stałoczasowa	43,2	19,27
Sygnalizacja zależna od ruchu, priorytet idealny (nie został osiągnięty z powodu błędów projektu i wykonania)	0,9	33,74
Badania uwzględniające zjazd PST (70 m dalej) oraz przystanki [4]		
Sygnalizacja zależna od ruchu, priorytet idealny	7,1	27,50
Sygnalizacja zależna od ruchu, pełny priorytet	24,9	23,58
Sygnalizacja zależna od ruchu, pełny priorytet oraz koordynacja z sąsiednimi skrzyżowaniami (planowana)	19,6	24,54

Poprawy jakości ruchu tramwajowego można się spodziewać również bez priorytetu przy wprowadzeniu akomodowanej sygnalizacji świetlnej połączonej z redukcją długości cyklu, co pokazuje tablica 3. Niestety, w Poznaniu są również przykłady priorytetu ujemnego, a więc pogorszenia jakości ruchu tramwajowego po wprowadzeniu sterowania zmiennocyklicznego – wynikają one ze złej detekcji, złego programu lub priorytetu dla samochodów.

Tablica 3

Poprawa warunków ruchu tramwajowego w wyniku zastosowania akomodowanego programu sygnalizacji i skrócenia cyklu. Tramwaje nie mają priorytetu, występuje jedynie możliwość wydłużenia sygnału. Parametry dla sygnalizacji stałoczasowej = 100%

Badany obiekt	Średnia strata czasu	Średnia prędkość
	[s/poj.]	[km/h]
Rondo Kaponiera	-52%	+27%
Nieźłomnych (przy Dworcu Autobusowym)	-47%	+29%
Ciąg ulicy Św. Marcin w szczycie rannym	-74%	+37%
Ciąg ulicy Św. Marcin w szczycie popołudniowym	-63%	+33%

Źródło: [6][7]

Lokalizacja przystanku tramwajowego tuż przed linią zatrzymania wprowadza w program sygnalizacji zmiennocyklicznej dodatkowy element związany ze zmiennym czasem obsługi pasażerów. Zastosowanie idealnego priorytetu jest w takiej sytuacji niewłaściwe, oznaczałoby bowiem zablokowanie skrzyżowania przez cały czas wymiany pasażerów (co można zaobserwować przy niektórych przystankach kolejowych). Realizacja priorytetu pełnego lub częściowego jest możliwa przy zastosowaniu detekcji wzbudzonej przez motorniczego z odpowiednim wyprzedzeniem w stosunku do przewidywanej chwili odjazdu lub uwzględnieniu w programie średniego czasu obsługi (zakłada się, że tramwaj, który szybciej zakończył obsługę, może chwilę poczekać) odpowiedniego dla danej pory dnia. Dobrym rozwiązaniem (zrealizowanym we Wrocławiu [11]) przy zastosowaniu priorytetu częściowego jest montaż dodatkowego sygnalizatora pokazującego liczbę sekund do momentu zapalenia się światła „jeźdź” lub literę C oznaczającą ponad 9 sekund oczekiwania.

Zlokalizowanie przystanku tramwajowego za skrzyżowaniem nie wpływa na stosowane w Poznaniu programy sygnalizacji zmiennoczasowej. Na silnie obciążonych węzłach tramwajowych można jednak zaobserwować blokowanie skrzyżowania (głównie przejścia dla pieszych) przez tramwaj oczekujący wjazdu na przystanek, na którym obsługiwany jest inny tramwaj. W rezultacie motorniczowie, robiąc miejsce dla kolejnego tramwaju, dojeżdżają do końca przystanku, co wydłuża drogę dojazdu pasażerów, a na przystankach o kształcie klina powiększa też konflikt między wsiadającymi i wysiadającymi. Odpowiedni program sygnalizacji zmiennoczasowej pozwoliłby zlikwidować problem blokowania skrzyżowania, przyspieszyć i poprawić jakość obsługi pasażerów.

Na skrzyżowaniach, na których występują zwrótnice tramwajowe, należy w programie sygnalizacji przeanalizować potencjalny wpływ metody sterowania zwrótnicami – niektóre z nich wymagają zachowania odpowiedniego odstępu między tramwajami, mogą też powodować opóźnienie czasu przejazdu. W Poznaniu zwiększenie odstępu minimalnego między tramwajami ze względu na sterowaniami zwrótnicami spowodowało również chwilowe blokowanie blisko położonego sąsiedniego skrzyżowania.

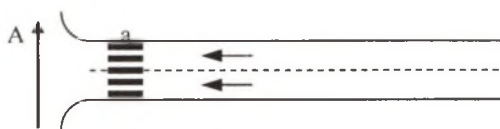
Przedstawione powyżej rozwiązania można również zastosować dla ruchu autobusowego i trolejbusowego; w Poznaniu takie realizacje znajdują się jednak zaledwie w kilku miejscach. Wynika to ze znikomego, w porównaniu z ruchem tramwajowym, stopnia wydzielienia pasów autobusowych z ruchu ulicznego, a także z dominującej roli tramwaju w obsłudze najbardziej zatłoczonych dzielnic. Doświadczenia poznańskie ze zmiennoczasową sygnalizacją uwzględniającą ruch autobusowy obejmują sterowanie wyjazdem z przystanków oraz pojedyncze pasy autobusowe umożliwiające ominięcie zatorów. Dobrym rozwiązaniem zastosowanym w Poznaniu jest zakończenie pasa autobusowego w odległości od skrzyżowania pozwalającej zakumulować pojazdy w ilości przejeżdżającej w jednym cyklu wraz z umożliwieniem wydłużenia zielonego światła w razie pojawienia się autobusu na końcu kolejki [7].

### C. Piesi i rowerzyści

Doświadczenia poznańskich pieszych ze zmiennoczasową sygnalizacją świetlną są zarówno pozytywne, jak i negatywne. Do pozytywów należy zaliczyć skrócenie cyklu na wielu skrzyżowaniach, co wiąże się ze zwiększeniem częstotliwości zapalania się zielonego światła. Zyski płynące z takiej modyfikacji nie są jednak tak duże, jak dla samochodów i transportu zbiorowego, w dodatku niewielka redukcja cyklu, przy uzależnieniu włączenia zielonego światła od zgłoszenia pieszego, może pogorszyć jakość obsługi pieszego [1].

Idealnym rozwiązaniem przy zmiennoczasowej sygnalizacji jest umożliwienie pieszym przejścia zawsze, gdy przez dane przejście nie przejeżdżają lub nie będą zaraz przejeżdżać pojazdy. Takie rozwiązanie można zrealizować, jeżeli każda relacja samochodowa stanowi osobną grupę sygnałową i zostały wydzielone pasy skrajne; w praktyce powyższy układ geometryczny występuje rzadko. Wspólne pasy na wprost i do skrętu (nie wiemy, czy pojazd jedzie na wprost, czy skręca), konieczność koordynacji z sąsiednimi skrzyżowaniami i fazowy charakter sterowania (a nuż nadjedzie jeszcze jakiś spóźniony samochód równoległy do obsługiwanej relacji) zakłócają możliwość idealnego wykorzystania czasu na skrzyżowaniu, najczęściej obniżając jakość obsługi pieszych. Na skrzyżowaniach obciążonych dużym ruchem samochodowym dochodzi problem czasów międzyzielonych – gdy czas międzyzielony po przejściu dla pieszych jest dłuższy niż po równoległej do tego przejścia relacji samochodowej, to w obawie przed nieoptymalnym dla samochodów sterowaniem przejście dla pieszych jest wyłączane znacznie wcześniej; nie wiadomo bowiem, kiedy obsługa relacji równoległej zakończy się.

Częstym błędem jest założenie, że pieszy powinien dostać zielone światło tylko wtedy, gdy zgłosi zapotrzebowanie. W rezultacie na zapalenie się zielonego potrzeba dwukrotnie więcej czasu niż na przejście przez jezdnię pełnosprawnego pieszego (minimalna długość światła zielonego plus czas międzyzielony [15][18]). Pieszy nie dostaje zielonego światła, choć przy sygnalizacji stałoczasowej mógłby jeszcze przejść, a w dodatku, jeżeli przejście przebiega przez wlot skrzyżowania, samochody w tym czasie też nie jadą (rys. 2). Prawidłowym rozwiązaniem w tej sytuacji jest zapalenie zielonego światła pod koniec fazy sygnalizacji niezależnie od zgłoszenia pieszego.

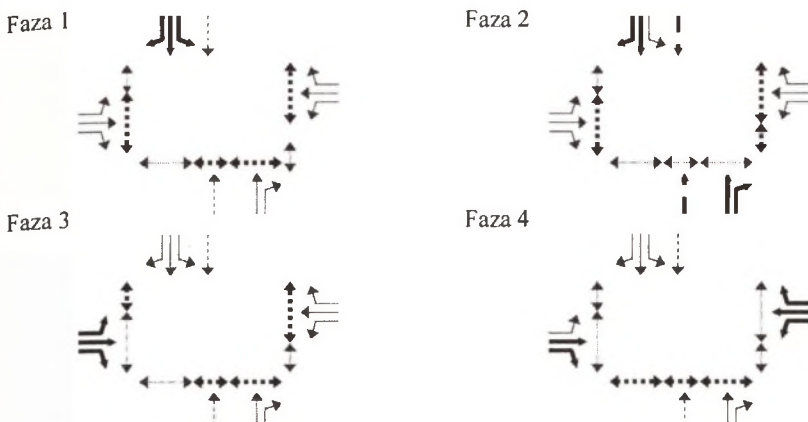


Rys. 2. Przejście a powinno mieć „w cieniu” relacji A cały czas zielone światło  
Fig. 2. Pedestrian crossing a should have green light all the time it is in the shadow of A

Konieczność zgłoszenia przez pieszego zapotrzebowania na przejście powoduje, że pieszy musi zwolnić, co pozwala kierowcy zauważyć pieszego. Praktyka pokazuje jednak, że parosekundowe opóźnienie pieszego może być uznane za informację o czerwonym świetle dla tego pieszego. Na wylotach ruchliwych skrzyżowań zdarza się, że pieszy nie może wejść na przejście pomimo zapalenia się dla niego zielonego światła, ze względu na pojazdy skręcające w lewo [14]. Dylemat czy w sygnalizacji zmiennoczasowej włączać zielone światło na przejściach przez wyloty skrzyżowań tylko na czas zgłoszenia, czy też wtedy, kiedy można, należy rozwiązać odpowiednio do lokalnych przyzwyczajeń.

Niekorzystnymi dla pieszych defektami, występującymi jednakowo dla stało- i zmiennoczasowej sygnalizacji, są również stawianie równości między minimalną i maksymalną długością światła zielonego i brak koordynacji przejść dzielonych wyspą. Dla przejść przez ulicę z jezdnią wlotową oddzieloną od jezdnii wylotowej synchronizacja grup sygnałowych dla pieszych powinna być uwzględniona zarówno w detekcji (patrz [5]), jak też w programie sygnalizacji. Pożądanym rozwiązaniem jest realizacja sygnału zielonego na przejściu przez jezdnię wylotową „w cieniu” lewoskrętu z jezdni wlotowej, co powinno być zapewnione odpowiednią kolejnością faz w sygnalizacji akomodowanej (np. okiennej [8]) oraz zwiększeniem wagi dla grupy pieszej w trakcie obsługi lewoskrętu w przypadku sygnalizacji w pełni zależnej od ruchu. W ten sposób straty czasu pieszych przy przejściu przez jezdnię wlotową są niewielkie, a ewentualne dłuższe oczekiwanie wiąże się z uzyskaniem zielonego światła na przejściu przez jezdnię wylotową w koordynacji. Przykład zrealizowanej w praktyce dobrej, choć nie wzorcowej, koordynacji grup sygnałów dla pieszych na poznańskim skrzyżowaniu Św. Marcin – Niepodległości pokazuje rys. 3.

Zastosowanie zmiennoczasowej sygnalizacji zależnej od ruchu przy priorityciecie samochodów wobec pieszych pokazuje zależność między minimalną długością światła zielonego a zezwoleniem na przechodzenie – im dłuższy minimalny zielony, tym rzadziej piesi dostają zielone światło [14]. Sygnalizacja taka wymaga więc szczególnego wyważenia komfortu przechodzenia i czasu oczekiwania.



Rys. 3. Program faz sygnalizacji z koordynacją grup pieszych na skrzyżowaniu w Poznaniu [8]  
 Fig. 3. Scheme of traffic lights phases with a pedestrian signal group coordination [8]

Pozytywny wpływ sygnalizacji zmiennoczasowej na jakość obsługi rowerzystów wiąże się, tak jak w przypadku pieszych lub samochodów, ze skróceniem czasu cyklu. Do wad sygnalizacji zmiennoczasowej z rowerowego punktu widzenia można zaliczyć przede wszystkim kłopoty z detekcją [7]. Inne defekty obsługi rowerzystów są analogiczne jak dla sygnalizacji stałoczasowej: straty czasu na drodze rowerowej większe niż podczas przejazdu równoległą ulicą, nadmiernie restrykcyjna wobec rowerzystów Instrukcja o Sygnalizacji Świetlnej z 1994 roku [1] (zapisy w obecnie obowiązującej Instrukcji [19] są niejednoznaczne), problemy ze skrętem w lewo i wąskie pasy na wlotach.

#### D. Waga poszczególnych uczestników ruchu

Program sygnalizacji świetlnej jest rezultatem kompromisu w konkurencji uczestników ruchu o najlepsze warunki obsługi. Wyważenie rangi każdego uczestnika jest szczególnie ważne w sygnalizacji zmiennoczasowej ze względu na możliwość dostosowania się do konkretnych sytuacji. Najprostszym podejściem jest równouprawnienie wszystkich obiektów (pojazd, pieszy) wobec kryterium optymalizacji (np. minimalizacji całkowitych lub średnich strat czasu). Jeden obiekt może jednak reprezentować pojedynczą osobę (pieszy), 1,4 osób (średnie napełnienie samochodu w Polsce) lub około 100 osób (tramwaj), dlatego bardziej sprawiedliwym rozwiązaniem jest wyważenie kryterium odpowiednio do napełnienia obiektu. Na skrzyżowaniu Most Teatralny-Roosevelta-Dąbrowskiego w Poznaniu, pomimo pełnego priorytetu dla tramwajów, zastosowanie kryterium minimalizacji średnich strat czasu przy ważeniu poszczególnych uczestników zgodnie z napełnieniem pojazdu spowodowało poprawę jakości ruchu tramwajów kosztem ruchu samochodowego [3]. Innymi kryteriami ważenia uczestników ruchu mogą być np. zasada zrównoważonego rozwoju, zapewnienie płynności i dobrej jakości ruchu na ważnym ciągu, możliwości akumulacji i ekologia.

### 3. UWARUNKOWANIA SYSTEMOWE

#### A. Stany wieczorne

W projekcie sygnalizacji stałoczasowej najtrudniejszym programem jest program okresu szczytowego, wtedy bowiem występuje maksymalne obciążenie skrzyżowania. Dla sygnalizacji zmiennoczasowej stany o małym obciążeniu ruchem mogą również w istotny sposób wpływać na projekt, zwłaszcza na lokalizację i liczbę czujników [7]. W Poznaniu można zaobserwować sygnalizacje działające lepiej w godzinie szczytu niż poza nią – jest to rezultat zastosowania filozofii godzin szczytowych do całej doby. W godzinie szczytu niektóre relacje są obciążone ruchem w każdym cyklu, co w praktyce przekształca charakter sygnalizacji na stałoczasowy; tymczasem w godzinach wieczornych i nocnych pojedynczy pojazd lub pieszy wpływa na wskazania sygnalizatorów. Czujnikami, które często trzeba uwzględnić tylko ze względu na programy wieczorno-nocne, są czujniki piesze lub rowerowe oraz samochodowe oddalone od skrzyżowania o odległość hamowania.

#### B. Koordynacja sygnalizacji zmiennoczasowej

Doświadczenia poznańskie ze skoordynowaną sygnalizacją zmiennoczasową, czyli z tzw. elastyczną koordynacją są pozytywne. Sterowanie jest realizowane dwupoziomowo: sterownik centralny na podstawie danych o ruchu decyduje o zakresie i lokalizacji w cyklu okna wąskiego (zielone gwarantowane) i szerokiego; w ramach okna szerokiego sterownik lokalny decyduje o wydłużeniu lub skróceniu światła „jedź” [2][12]. Rozwiązaniem optymalnym dla skoordynowanego ciągu jest zbadanie zajętości wlotu i zapalenie sygnału „jedź”, tak aby pierwszy pojazd z potoku skoordynowanego zawsze przejeżdżał linię zatrzymania w tym samym momencie cyklu. W praktyce moment zapalenia się światła „jedź” zależy również od ruchu na wlotach bocznych. W Poznaniu zaobserwowano, że pomimo braku ściśle określonego momentu zapalenia się światła „jedź”, kierowcy szybko nauczyli się jeździć w koordynacji; wyjątek stanowią odcinki o zbyt dużej (ponad 400 m) odległości między sygnalizatorami.

Za pomocą symulacji komputerowej sprawdzono również elastyczną koordynację samochodowo-tramwajową [7][9]. Rezultaty badań są zachęcające: zaletą takiego rozwiązania jest zapewnienie płynnego przejazdu tramwaju przy minimalizacji zakłóceń innych użytkowników ruchu spowodowanych priorytetem dla tramwaju i zapewnienie dobrej koordynacji samochodowej w cyklach, w których nie ma tramwaju.

#### C. Układ geometryczny a sygnalizacja świetlna

Realizacja zmiennoczasowej sygnalizacji świetlnej może zmienić optymalną geometrię skrzyżowania i organizację ruchu [7][9]. Zmiany mogą obejmować uzyskanie dodatkowych pasów dla realizacji planowanego priorytetu lub redukcję albo skrócenie innych pasów. Z tego powodu projekt sygnalizacji świetlnej na nowym lub przebudowywanym skrzyżowaniu powinien weryfikować projekt geometrii, a nie z niego wynikać. Należy też przewidzieć małą modernizację układu geometrycznego przy zmianie rodzaju sygnalizacji.

#### D. Detekcja

Detekcja ma istotny wpływ na sterowanie ruchem za pomocą sygnalizacji świetlnej zagadnienie to zostało szczegółowo opisane w [5].



#### 4. WNIOSKI

Zmiennoczasowa sygnalizacja świetlna pozwala w istotny sposób poprawić jakość ruchu na skrzyżowaniu. Poprawa ta dotyczy zarówno zmniejszenia strat czasu uczestników lub zwiększenia przepustowości, jak też zapewnienia priorytetu dla pojazdów transportu zbiorowego

Możliwości, jakie daje zmiennoczasowa sygnalizacja świetlna, dotyczą nie tylko poprawy jakości ruchu, ale także zakresu potencjalnych defektów. Optymalizacja działania tej sygnalizacji wymaga bardziej złożonych algorytmów sterowania i większej liczby zmiennych decyzyjnych.

Sygnalizacja zmiennoczasowa wymaga skomplikowanych algorytmów sterowania, dlatego podczas sprawdzania działania systemu tej sygnalizacji (a więc łącznie z detekcją) należy między innymi sprawdzić następujące elementy:

- czy przy braku innych zgłoszeń samochody jadące z prędkością projektową przejeżdżają płynnie?
- czy założony priorytet dla transportu zbiorowego został zrealizowany?
- czy pieszy ma możliwość przejścia przez jezdnię w każdym momencie, o ile nie jada pojazdy w relacji kolizyjnej lub trwa akurat czas międzyzielony?
- czy detekcja uwzględnia rowerzystów na wszystkich wlotach, na których mają prawo się pojawić?
- czy detekcja pieszych i rowerzystów wiąże się z opóźnieniami; jeżeli tak, to czy w założonym zakresie?
- czy sterownik monitoruje odczyty z czujników i jak reaguje w razie ich awarii?

W zależności od sytuacji (ruchowej i ekonomicznej) można zrezygnować z zastosowania niektórych elementów prawidłowej sygnalizacji zmiennoczasowej; taka decyzja powinna jednak wynikać wyłącznie z przyjętych założeń. Defekty projektu i wykonania mogą w istotny sposób pogorszyć jakość sterowania, nie powinny więc wpływać na rezygnację z przedstawionych wyżej kryteriów.

Doświadczenia poznańskie pozwalają uznać elastyczną koordynację za efektywną i zalecaną do stosowania. Szczegółowe założenia takiej koordynacji powinny zostać dokładniej zbadane.

Proces realizacji zmiennoczasowej sygnalizacji powinien uwzględniać co najmniej badania przed, koncepcję, projekt sygnalizacji, wdrożenie, badania po, analizę jakości i ewentualne poprawki. Zakończenie procesu realizacji na wykonaniu sygnalizacji okazało się w warunkach poznańskich niewystarczające ze względu na dużą ilość defektów.

#### Literatura

1. Beim M., Rychlewski J.: Ruch rowerowy i pieszy na skrzyżowaniach z inteligentną sygnalizacją świetlną. Transport Miejski i Regionalny (wysłane do druku).
2. Kaczmarek M.: Studium projektowe systemu sterowania ruchem w zachodniej strefie miasta Poznania. Seminarium naukowe „Inteligentne systemy sterowania ruchem ulicznym w mieście Poznaniu”, Poznań 10 czerwca 1996, s. 11-28.
3. Kaczmarek M., Krych A., Rychlewski J.: Multi-objective evaluation of traffic at complex intersections with different control strategies. Materiały Międzynarodowej Konferencji „Modelling and Management in Transportation”, Poznań-Kraków 12-17 October 1999, tom 2, s. 17-22.
4. Kaczmarek M., Piotrowski J., Rychlewski J.: Symulacyjne badania efektywności sterowania adaptacyjnego ruchem pojazdów na ulicy Bukowskiej w Poznaniu. Materiały

- I Konferencji Naukowo – Technicznej „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań 8-10 października 1997, s. 140-145.
5. Kaczmarek M., Rychlewski J.: Detekcja jako niezbędny element systemu zmiennoczasowej sygnalizacji świetlnej w miastach. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 2004, seria Transport z. 52 (wysłane do druku).
  6. Kaczmarek M., Rychlewski J.: Sterowanie ruchem ulicznym na rondach. Materiały II Konferencji Naukowo – Technicznej „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań 9-11 czerwca 1999, s. 128-135.
  7. Kaczmarek M., Rychlewski J.: Sterowanie ruchem w centrum Poznania. Materiały III Konferencji Naukowo – Technicznej „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań 15-17 maja 2001, s. 217-228.
  8. Kaczmarek M., Rychlewski J.: Sterowanie ruchem w minisieciach ulic w ramach okien czasowych. Materiały IV Konferencji Naukowo – Technicznej „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań, 21-23 maja 2003, s. 301-309.
  9. Kaczmarek M., Rychlewski J.: Sterowanie skoordynowane ruchem z priorytetem dla tramwajów. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Nowoczesne rozwiązania techniczne w komunikacji tramwajowej”, Wrocław 31 maja – 2 czerwca 2000, s. 131-138.
  10. Kaczmarek M., Walkowiak M.: Adaptacyjne sterowanie ruchem na rondach. Materiały IV Konferencji Naukowo – Technicznej „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań 21-23 maja 2003, s. 291-299.
  11. Makuch J., Kruszyna M.: Separacyjny model uprzywilejowania transportu zbiorowego w poziomie ulicy. Materiały IV Konferencji Naukowo – Technicznej „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań 21-23 maja 2003, s. 321-332.
  12. Rakiewicz M.: Środki sterowania ruchem. Program Ecos-Phare. Materiały Seminarium Naukowego „Inteligentne systemy sterowania ruchem ulicznym w mieście Poznaniu”, Poznań, 10 czerwca 1996, s. 29-39.
  13. Rychlewski J.: Modelowanie symulacyjne sterowania ruchem ulicznym. Praca magisterska, Politechnika Poznańska, Poznań 1996.
  14. Rychlewski J.: Problemy zmienności pierwszeństwa ruchu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Materiały IV Konferencji Naukowo – Technicznej „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań, 21-23 maja 2003, s. 137-146.
  15. Rychlewski J., Beim M.: Czerwone światło dla rowerów? Transport Miejski nr 2/2001 s. 19-22.
  16. Tracz M., Allsop R. E.: Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. WKiŁ, Warszawa 1990.
  17. Analiza i wnioski dotyczące funkcjonowania wdrożonego projektu pilotażowego sterowania ruchem w rejonie Ronda Kaponiera i Mostu Teatralnego. Opracowanie na zlecenie Zarządu Dróg Miejskich w Poznaniu pod red. A. Krycha. Poznań 1999.
  18. Szczegółowe warunki techniczne dla sygnałów drogowych i warunki ich umieszczania na drogach. Załącznik nr 3 do Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. (poz. 2181).
  19. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać skrzyżowania linii kolejowych z drogami publicznymi i ich usytuowanie. Dziennik Ustaw z dnia 20 marca 1996 nr 33, poz. 144.
  20. Kaczmarek M., Pulikowski A.: Sterowanie fazowe a grupowe. Materiały III Konferencji Naukowo – Technicznej „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań 15-17 maja 2001, s. 373-380.

### Abstract

This paper presents synthesis of traffic responsive control developments under Poznań Urban Control and Management System from users' point of view. Traffic responsive control gives possibilities of substantial improvement of traffic quality and junction capacity utilisation level, but also is more sensitive on realisation mistakes, especially detection failures.