

KRUKOWICZ Tomasz ¹

WYZNACZANIE WARUNKÓW CZASOWYCH FUNKCJONOWANIA ALGORYTMÓW STEROWANIA ADAPTACYJNEGO

Artykuł opisuje problematykę wyznaczania warunków czasowych dla algorytmów sterowania adaptacyjnego. Opisano w nim aktualny stan wiedzy w zakresie wyznaczania warunków czasowych. Opis został oparty na analizie ok. 300 projektów sygnalizacji świetlanych z terenu całej Polski. Następnie sklasyfikowano warunki czasowe najczęściej występujące w algorytmach sterowania. Opisano również praktyczną metodę wyznaczania wybranych warunków czasowych. Artykuł określa także kierunki dalszych badań w zakresie wyznaczania tych warunków.

DETERMINATION OF TIMING CONDITIONS IN ADAPTIVE ROAD TRAFFIC CONTROL

The paper discusses some aspects of determination of timing conditions in adaptive road traffic control. The current state of knowledge in the field of determination of timing conditions is described. This description was based on detail analysis of ca. 300 traffic lights designs in different places in Poland. Then the most often timing conditions have been classified. The useful method for determination of chosen timing conditions has been also proposed. Further range of research concerning determination of timing conditions has been specified.

1. WSTĘP

Stosowane obecnie rozwiązania sterowania ruchem stanowią w przeważającej większości rozwiązania adaptacyjne, w których sterowanie ruchem jest zależne od sytuacji ruchowej na skrzyżowaniu. Informacje o ruchu pojazdów pochodzą z detektorów ruchu.

Stany sygnalizatorów w sterowaniu adaptacyjnym wyznaczane są na podstawie algorytmu sterowania, który decyduje o przedłużaniu bądź zakończeniu poszczególnych faz ruchu. W zależności od kryteriów podejmowania decyzji w sterowaniu adaptacyjnym można wyróżnić wiele metod sterowania. W zależności od kryteriów zakończenia (zmiany) faz ruchu metody te mogą opierać się o odstępy czasu (sterowanie akomodacyjne) jak również o inne, bardziej złożone parametry, takie jak długość kolejki, natężenie ruchu, poziom swobody ruchu itp.

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Sterowania Ruchem, Zespół Sterowania Ruchem Drogowym, 00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75, tel. +48 22 234 75 85, e-mail: tkr@it.pw.edu.pl

Niezależnie od zastosowanej metody sterowania konieczne jest wyznaczenie czasów trwania poszczególnych stanów pracy algorytmu sterowania. Zależności czasowe w pracy sygnalizacji świetlnej określają warunki czasowe funkcjonowania algorytmu.

Procedurę wyznaczania warunków czasowych poprzedza wyznaczenie tzw. bazowego programu sygnalizacji. Program ten przedstawia pracę algorytmu sterowania sygnalizacją w warunkach ciągłego obciążenia ruchem na wszystkich wlotach skrzyżowania. W większości metod sterowania warunki czasowe wyznacza się w oparciu o przepisy [5] oraz bazowy program sygnalizacji. Dla prostych algorytmów sterowania wyznaczenie warunków czasowych nie stanowi znaczącego problemu. Natomiast w przypadku programów sygnalizacji o złożonej strukturze liczba warunków czasowych może dochodzić kilkudziesięciu. Po uwzględnieniu wielu programów sygnalizacji pracujących na skrzyżowaniu w ciągu doby liczba niezbędnych do wyznaczenia warunków może wynosić kilkaset, w związku z powyższym konieczne jest stosowanie metod pozwalających na uproszczenie wyznaczania warunków oraz zmniejszenia liczby błędów podczas ich wyznaczania.

2. ALGORYTMY STEROWANIA RUCHEM

Zgodnie z zapisami przepisów [5] algorytm sterowania ruchem to uporządkowany zbiór poleceń opisujący sposób sterowania ruchem na skrzyżowaniu. Definicja ta nie określa wymagań formalnych związanych z zapisem algorytmów.

W praktyce spotyka się różne sposoby zapisu algorytmów:

- opis słowny, za pomocą tekstu ciągłego,
- opis słowny z wykorzystaniem równoważników zdań,
- opis zależności czasowych i logicznych na programie bazowym,
- zastąpienie algorytmu sterowania schematem faz ruchu,
- opis kolejności przejść pomiędzy fazami ruchu za pomocą tabel,
- tabelaryczny zapis warunków detektorowych oraz czasowych dla poszczególnych faz ruchu,
- opis za pomocą schematów blokowych algorytmów (sieci działań).

Wiele wymienionych powyżej rozwiązań nie spełnia podstawowego warunku, jaki spełniać musi algorytm – jednoznaczności. Przedstawione rozwiązania często pomijają warunki czasowe, pozostawiając zagadnienie poprawnego ich wyznaczenia osobie programującej sterownik. Takie rozwiązanie jest niedopuszczalne, gdyż nie zapewnia zgodności programu zaprogramowanego w sterowniku z zatwierdzonym projektem organizacji ruchu. Niestety, w wielu organach zarządzających ruchem, takie projekty są zatwierdzane i realizowane na skrzyżowaniach.

Niezależnie od postaci algorytmów oraz formy ich zapisu można wyróżnić dwa rodzaje warunków w algorytmach:

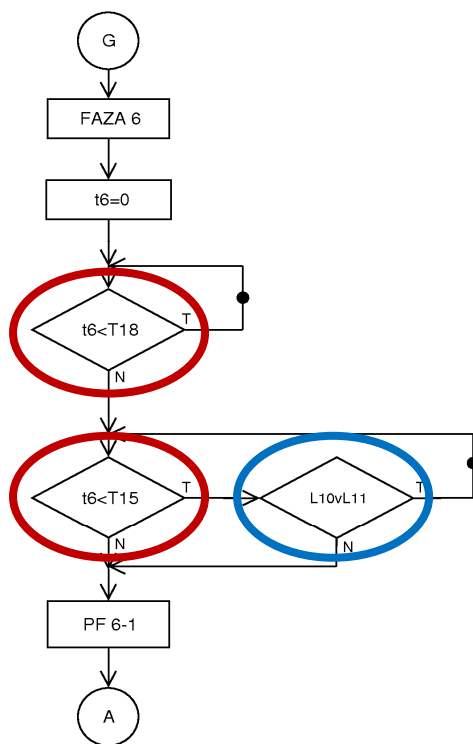
- warunki logiczne (zwane inaczej detektorowymi),
- warunki czasowe.

Postać warunków logicznych jest zależna od zastosowanej metody sterowania i stanowi zagadnienie wykraczające poza ramy niniejszego artykułu. Zależnie od metody sterowania, warunki czasowe mogą się odnosić zarówno do poszczególnych grup sygnałowych, jak również do faz ruchu. Spotyka się jednak często, przy sterowaniu fazami ruchu, warunki

określone dla grup sygnałowych, co utrudnia zaprogramowanie sterownika sygnalizacji. W niniejszym artykule warunki czasowe będą traktowane jako warunki określone dla faz ruchu, a nie dla sygnałów w poszczególnych grupach sygnałowych.

3. ZAPIS ALGORYTMÓW

Jednoznaczna i uniwersalna metodą zapisu algorytmów jest zapis w postaci schematów blokowych, który został opisany w wytycznych [4]. Rozwiązanie to, jak również rozwiązania pochodne, w postaci bibliotek funkcji opracowanych przez producentów oraz specjalnych języków programowania stworzonych dla poszczególnych sterowników, jest rozwiązaniem najbardziej elastycznym i pozwalającym na zapis wszystkich algorytmów sterowania.



Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu dla przykładowej fazy ruchu.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy algorytmu dla przykładowej fazy ruchu zapisany zgodnie ze standardami opisanymi w [4]. W przedstawionej fazie wykonywane są następujące działania:

- wyzerowanie licznika czasu,

- badanie realizacji minimalnego czasu trwania fazy,
- badanie realizacji maksymalnego czasu trwania fazy, podczas badania czasu maksymalnego badane są warunki detektorowe związane z przedłużeniami sygnału zielonego,
- po zakończeniu realizacji fazy następuje przejście do fazy 1.

Czas trwania fazy przedstawionej na rysunku 1 może przyjąć każdą wartość pomiędzy czasem minimalnym T18, a czasem maksymalnym T15. Czas trwania fazy zawierający się pomiędzy tymi wartościami zależy wyłącznie od zajętości odpowiednich detektorów, określających zapotrzebowanie na sygnał zezwalający. Jest to przykład najprostszej fazy ruchu, dla której możliwe jest przedłużanie w zależności od ruchu. W bardziej złożonych algorytmach sterowania sieci działań dla jednej fazy mogą przyjmować znacznie większe rozmiary i zawierać w praktyce do kilkudziesięciu klatek warunkowych oraz klatek akcji.

4. RODZAJE WARUNKÓW CZASOWYCH W ALGORYTMACH

Dla potrzeb niniejszego artykułu przeprowadzono analizę około 300 projektów sygnalizacji świetlnej, realizowanych na terenie całej Polski. W wyniku tej analizy stwierdzono, że w zależności do złożoności algorytmu sterowania podczas projektowania sygnalizacji konieczne jest wyznaczenie następujących warunków czasowych dla poszczególnych faz ruchu:

- minimalny czas trwania fazy,
- maksymalny czas trwania fazy,
- maksymalny czas trwania fazy w przypadku zgłoszeń w grupach kolizyjnych,
- czas trwania fazy w przypadku realizacji sekwencji faz innej niż w programie bazowym,
- określenie tzw. najwcześniejszych, późniejszych oraz najpóźniejszych chwil zakończenia faz ruchu,
- określenie warunków czasowych zakończenia fazy ruchu w programie o strukturze złożonej,
- określenie warunków czasowych związanych z zachowaniem długości cyklu,
- dopuszczenie w warunkach czasowych przekroczenia maksymalnej długości cyklu,
- uwzględnienie w zdefiniowanych warunkach sygnałów dopuszczających skręt w kierunku wskazanym strzałką (tzw. „zielonych strzałek”),
- określenie warunków czasowych zwiększania składu faz ruchu.

Powyżej przedstawiono najczęściej spotykane w projektach przykłady warunków czasowych. W bardziej skomplikowanych algorytmach mogą występować nieopisane powyżej rodzaje warunków czasowych.

Minimalny czas trwania fazy wyznacza się, biorąc pod uwagę wymagania rozporządzenia [5] oraz nadwyżki sygnałów zielonych w przejściach międzyfazowych poprzedzających daną fazę oraz następujących po danej fazie. W skomplikowanych algorytmach sterowania mogą występować różne czasy minimalne w zależności od realizowanej sekwencji faz ruchu. W takim przypadku należy wyznaczyć minimalne czasy trwania dla każdej pary faza poprzedzająca/faza następująca i uwzględnić je w algorytmie sterowania.

Maksymalny czas trwania fazy wyznacza się na podstawie bazowego programu sygnalizacji. Jest to przedział przełączeń, w którym w żadnej grupie nie następuje zmiana sygnału, a zbiór grup wyświetlających sygnał zezwalający nie stanowi podgrupy sygnałów otrzymujących sygnał zielony w żadnym innym przedziale przełączeń. Wyznaczony maksymalny czas trwania fazy odpowiada czasowi trwania fazy w cyklicznym programie bazowym. W szczególnym przypadku czas ten może być równy czasowi minimalnemu.

W przypadku algorytmów pozwalających na pozostawianie sterownika w pewnej fazie przez nieograniczony czas należy wyznaczyć maksymalny czas trwania fazy do czasu zgłoszenia w grupie konfliktowej z aktualnie realizowanymi. Czas ten odpowiada maksymalnemu czasowi trwania fazy. W pewnych sytuacjach dopuszcza się wydłużenie tego czasu o pewną arbitralnie określoną wartość, która pozwala na niezatrzymanie pojazdów znajdujących się bardzo blisko skrzyżowania w przypadku zarejestrowania zgłoszenia w grupie kolizyjnej.

Dla sygnalizacji pracującej w koordynacji liniowej bądź obszarowej konieczne jest wyznaczenie większej liczby warunków czasowych. W zależności od zasad pracy niezbędne jest zatem wyznaczenie najwcześniejszych, późniejszych oraz najpóźniejszych chwil zakończenia sygnałów zezwalających. Pozwalają one na prawidłowe funkcjonowanie ciągu skoordynowanego bądź pracy w sieci skoordynowanej.

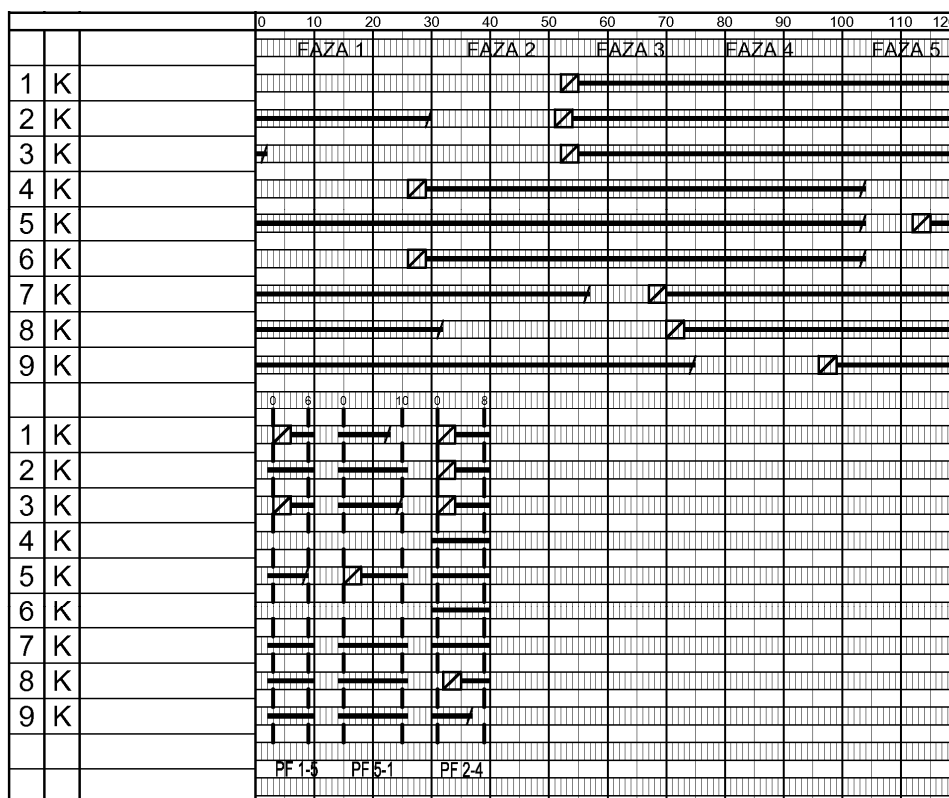
W programach o strukturze złożonej, tj. takich w których poszczególne grupy sygnałowe otrzymują sygnał zielony w jednej fazie, należy podczas wyznaczania warunków czasowych uwzględnić zapewnienie pojazdom odpowiednich czasów trwania sygnałów w każdej grupie sygnałowej – niezależnie od zapotrzebowania bądź jego braku w innych grupach.

Warunki czasowe w algorytmach sterowania skoordynowanego oraz sterowania z wykorzystaniem nadwyżek sygnału zielonego powinny uwzględniać zachowanie długości cyklu sygnalizacji. Niewielkie przekroczenia długości cyklu dopuszczalne są wyłącznie w przypadku skrzyżowań izolowanych, jednakże podczas wyznaczania warunków czasowych należy ocenić zmianę przepustowości we wszystkich grupach sygnałowych w przypadku wydłużenia cyklu programu sygnalizacji. W analogiczny sposób należy uwzględniać przepustowość sygnałów dopuszczających skręt w kierunku wskazanym strzałką. Zagadnienie to dotyczy zarówno sygnałów kolizyjnych jak i bezkolizyjnych. Niedopuszczalne jest nieuwzględnienie „zielonych strzałek” w wyznaczaniu warunków czasowych, gdyż może to powodować zmniejszenie przepustowości w stosunku do przepustowości zapewnionej w programie bazowym.

Znaczący wpływ na bezpieczeństwo ma wyznaczanie warunków czasowych określających okresy w których dopuszczalne jest zwiększanie składu faz ruchu. Ograniczenia te wynikają z zapisów rozporządzenia [5], w którym zapisano: *pary strumieni o dopuszczalnym jednoczesnym zezwoleniu na ruch powinny być sterowane tak, aby strumień podporządkowany nie miał możliwości dojazdu do punktu kolizji wcześniej niż strumień z pierwszeństwem przejazdu lub przejścia. Z zapisu tego wynika ograniczenie uderzające w szczególności w pieszych. Wyświetlenie sygnału zezwalającego dla grupy pieszej dopuszczalne jest przez bardzo krótki czas po rozpoczęciu sygnałów zezwalających we współbieżnych grupach kołowych. Metody zapobiegania dyskryminacji pieszych w takim przypadku opisano w pracach [2], [3].*

5. WYZNACZANIE WARUNKÓW CZASOWYCH

Ze względu na ograniczony rozmiar niniejszego artykułu przykłady wyznaczenia warunków czasowych przedstawiono wyłącznie dla wybranych warunków z listy przedstawionej w rozdziale 4. W celu ilustracji omawianych przykładów zamieszczono pięciofazowy program sygnalizacji o strukturze złożonej. Dla czytelności przedstawiono wyłącznie grupy sygnałowe kołowe. Diagram paskowy programu sygnalizacji przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Program sygnalizacji oraz programy przejść międzyfazowych do ilustracji przykładów z rozdziału 5.

5.1 Minimalny czas trwania fazy

Minimalny czas trwania fazy musi zapewniać spełnienie wymagań [5] w zakresie minimalnych sygnałów zielonych dla poszczególnych grup. Im krótsze czasy minimalne, tym większe możliwości dostosowania sterowania do potrzeb uczestników ruchu i możliwość wykorzystania czasu cyklu w najbardziej obciążonych relacjach (większa elastyczność sterowania). W zależności od realizacji różnych przejść międzyfazowych minimalny czas trwania fazy może być różny.

Przykładowo:

- czas trwania fazy 2 jest determinowany przez minimalny czas sygnału zielonego w grupie 2K oraz 8 K (zakłada się, że w grupach 3K i 1K czas minimalny został spełniony w fazie 1),
- w programie adaptacyjnym minimalny czas sygnału zielonego w obydwu grupach zgodnie z zapisami [5] wynosi 5s,
- podczas realizacji sekwencji faz 1-2-3 minimalny czas trwania fazy 2 wynosi 3 s, gdyż 2 sekundy czasu minimalnego realizowane są w przejściu pomiędzy fazą 1 a fazą 2,
- w przypadku realizacji sekwencji faz 1-2-4 czas minimalny wynosi 4 sekundy, gdyż w przejściu fazowym PF 1-2 nie jest realizowany sygnał zielony dla grupy 8K a w przejściu 2-4 występuje tylko 1 sekunda czasu zielonego.

W związku z powyższym (przy założeniu istnienia nie więcej niż jednego przejścia międzyfazowego pomiędzy parami faz) dla każdej fazy można stworzyć macierz określającą minimalny czas trwania fazy w zależności od fazy poprzedniej i następującej po danej fazie. Macierz taka będzie miała wymiar: liczba faz x liczba faz i będzie stanowiła podstawę do prowadzenia automatycznych obliczeń warunków czasowych.

5.2 Najpóźniejsza chwila realizacji fazy

Najpóźniejsza chwila podjęcia decyzji o realizacji fazy musi uwzględniać minimalny czas jej trwania oraz nieprzekroczenie długości cyklu sygnalizacji. W związku z tym najpóźniejsza chwila zakończenia fazy 1 przed realizacją fazy 3 zdefiniowana jest następująco (1):

$$T_{1,5}^{\max} = T_c - t_{5,1} - t_5^{\min} - t_{1,5} + \alpha_{5,1} \quad (1)$$

gdzie: $T_{1,5}^{\max}$ – najpóźniejsza chwila zakończenia fazy 1 przed fazą 5

T_c – długość cyklu,

$t_{5,1}$ – czas trwania przejścia międzyfazowego 5-1,

t_5^{\min} – minimalny czas trwania fazy 5

$t_{1,5}$ – czas trwania przejścia międzyfazowego 1-5,

$\alpha_{5,1}$ – czas trwania przejścia międzyfazowego 5,1 po rozpoczęciu cyklu.

Po podstawieniu wartości liczbowych zgodnie z przykładem otrzymuje się: $T_c = 120$ s, $t_{5,1} = 10$ s, $t_5^{\min} = 5$ s, $t_{1,5} = 6$ s, $\alpha_{5,1} = 2$ s otrzymuje się wartość warunku czasowego $T_{1,5}^{\max}$ zdefiniowanego jako najpóźniejsza chwila zakończenia fazy 1 przed fazą 5 wynoszącą 101 s.

Analogiczne obliczenia należy przeprowadzić dla innych zestawów faz ruchu, uwzględniając również realizację więcej niż jednej fazy ruchu przed danym warunkiem czasowym, uwzględniając również zapotrzebowanie na fazy następujące po przekroczeniu danego warunku czasowego.

5.3. Warunek czasowy dopuszczających zwiększenie składu fazy ruchu

Podstawowym warunkiem zapewniającym bezpieczne zwiększenie składu faz ruchu jest spełnienie zależności (2):

$$t_d^p \geq t_d^s \quad (2)$$

gdzie: t_d^p – czas dojazdu strumienia podporządkowanego (nieposiadającego pierwszeństwa przejazdu),

t_d^s – czas dojazdu strumienia z pierwszeństwem przejazdu.

Najczęściej zagadnienie to dotyczy sytuacji, w której wlot sterowany grupą sygnałową ogólną otrzymał sygnał zezwalający, po czym nastąpiło zgłoszenie we współbieżnej grupie pieszej. W takim przypadku zależność (2) przyjmuje postać (3):

$$\frac{s_d}{v_d} < T \quad (3)$$

gdzie: s_d – droga dojazdu strumienia podporządkowanego do punktu kolizji ze strumieniem posiadającym pierwszeństwo,

v_d – prędkości dojazdu strumienia podporządkowanego do punktu kolizji ze strumieniem posiadającym pierwszeństwo (odpowiada prędkości dopuszczalnej na danej drodze bądź prędkości miarodajnej),

T – maksymalne opóźnienie wyświetlenia sygnału zielonego w grupie z pierwszeństwem przejazdu po wyświetleniu sygnału w grupie podporządkowanej.

W praktyce projektowania wartości T przyjmują wartość 1 s, w przypadku dużych skrzyżowaniach 2 s, w wyjątkowych przypadkach (bardzo długa droga dojazdu) 3 sekundy.

6. WNIOSKI

Przeprowadzona analiza wykazała, że zagadnienie wyznaczania warunków czasowych nie jest szeroko opisane w dostępnej literaturze. Czynności związane z wyznaczaniem warunków czasowych są prowadzone przez każdego projektanta sygnalizacji świetlnej, jednak nie stosowane są do tego celu jednolite procedury.

Procedura wyznaczania warunków czasowych jest ważnym elementem procesu tworzenia algorytmów sterowania adaptacyjnego. Prawidłowe ich wyznaczenie ma duży wpływ na efektywność sterowania adaptacyjnego, a w pewnych przypadkach również na bezpieczeństwo. Zagadnienie wyznaczenia warunków czasowych, w szczególności w przypadku wielofazowych programów o strukturze złożonej przyjmuje bardzo złożoną postać. Z tego powodu przewidywane są prace mające na celu automatyzację procesu wyznaczania warunków czasowych, pozwalające zastąpić stosowane obecnie metody intuicyjne.

Dla potrzeb sprawdzania wykonanych projektów sygnalizacji konieczne jest również opracowanie metody weryfikacji wyznaczonych innymi metodami warunków czasowych. Planowane są prace pozwalające na automatyzację ww. czynności z wykorzystaniem wspomagania komputerowego.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Allsop R.E., Tracz M. Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. WKiŁ 1990
- [2] Krukowicz T., „Poprawa efektywności sterowania adaptacyjnego poprzez optymalizację przejść międzyfazowych”, Prace Naukowe Transport, zeszyt 72, Warszawa, 2010

- [3] Krukowicz T., „Wyznaczanie programów przejść międzyfazowych przy wykorzystaniu różnych funkcji celu” Logistyka 4/2010, Poznań, 2010
- [4] Richtlinien für Lichtsignalanlagen RiLSA, Ausgabe 2009
- [5] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach (Dz. U. 220 poz. 2181 z dnia 23 grudnia 2003 r. z późn. zm.), Kancelaria Prezesa Rady Ministrów, Warszawa, 2003-2011
- [6] Szatkowski M., Materiały pomocnicze do wykładu z przedmiotu Sterowanie ruchem drogowym I, prace niepublikowane, Warszawa, 2004