

Piotr Kawalec¹

Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej

Sylwia Sobieszuk-Durka²

Biuro Drogownictwa i Komunikacji Urząd m. st. Warszawy

Analiza zależności między przyjętym algorytmem sterowania na pojedynczym skrzyżowaniu a efektami sterowania obszarowego

1. WSTĘP

Obszarowe sterowanie ruchem drogowym, polegające na właściwym wyznaczeniu pewnych parametrów sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniach w wybranym obszarze, przy jednoczesnym ścisłym uzależnieniu wartości tych parametrów od wartości parametrów na pozostałych skrzyżowaniach, zależnie od przyjętej metody oraz postawionej (wspólnej dla całego obszaru) funkcji celu – poprzez uzyskanie swoiste zmniejszenie losowego charakteru strumieni pojazdów dopływających do poszczególnych skrzyżowań – może być sposobem eliminacji bądź łagodzenia niektórych negatywnych zjawisk w ruchu drogowym.

O potrzebie koordynacji sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniach, szczególnie w obszarach miejskich, przekonani są zarówno zmotoryzowani uczestnicy ruchu drogowego, jak i specjaliści w tej dziedzinie – inżynierowie ruchu. O optymistycznych oczekiwaniach co do efektów synchronizacji sygnalizacji świetlnej najlepiej świadczą zarówno nieustannie trwające prace nad rozwijaniem, czy doskonaleniem, systemów obszarowego sterowania ruchem drogowym jak i intensywnie szerzące się zainteresowanie nimi zarządców ruchu w miastach.

Rozwój reprezentujących wspomniane systemy metod sterowania ruchem drogowym, zakładających pewne odgórne „wytyczne” czy nawet ograniczenia niektórych parametrów sterowania objętych nim skrzyżowań, nie wyparł jednak rozwiązań bazujących na lokalnej, indywidualnej dla poszczególnych skrzyżowań, adaptacji sygnalizacji świetlnej. Analizując historię rozwoju systemów srđ, w tym również tych uznanych współcześnie za zaawansowane, widać niechętnie wręcz podejście do struktur zcentralizowanych, podkreślając zarazem zalety pewnego rozproszenia i podziału funkcjonalnego kilkuwarstwowych, często hierarchicznych lecz wyraźnie już zdecentralizowanych, systemów (np.: UTOPIA [1], ASTRUD [4]).

Istotą lokalnej warstwy systemu adaptacyjnego sterowania ruchem drogowym jest zaszyty w sterowniku algorytm, opisujący zależności, jakie zachodzą między rzeczywistymi warunkami ruchu w rejonie skrzyżowania i czasem a parametrami sterowania (np.: sekwencją i długością poszczególnych faz ruchu), spełniając przy tym wszelkie wymogi formalne (wynikające z warunków bezpieczeństwa lub obowiązującego prawa [2]), takie jak np.: minimalne długości sygnałów zezwalających czy też dopuszczalne następstwo wystąpienia (w przypadku osobnej obsługi pary strumieni – np. strumień skrętu w lewo sterowany sygnalizatorem ogólnym S-1 i strumień skrętu w lewo sterowany sygnalizatorem kierunkowym S-3) lub rozpoczęcia (w przypadku częściowo jednoczesnej obsługi strumieni – np. zastosowanie tzw. „podfazy”) poszczególnych faz ruchu.

W odróżnieniu jednak od skrzyżowania odosobnionego, zależności zapisane w algorytmie sterowania na skrzyżowaniu objętym prostym nawet systemem, uwzględniać powinny dodatkowe (często wyznaczane na poziomie nadrzędnym) ograniczenia, wymagania czy zalecenia. Podporządkowanie się im, uwzględniając przy tym indywidualne uwarunkowania każdego obiektu, stanowić może o charakterze bądź stopniu lokalnej adaptacji sterowania na skrzyżowaniu. Z drugiej zaś strony, ich – zamierzone lub nie – pominięcie,

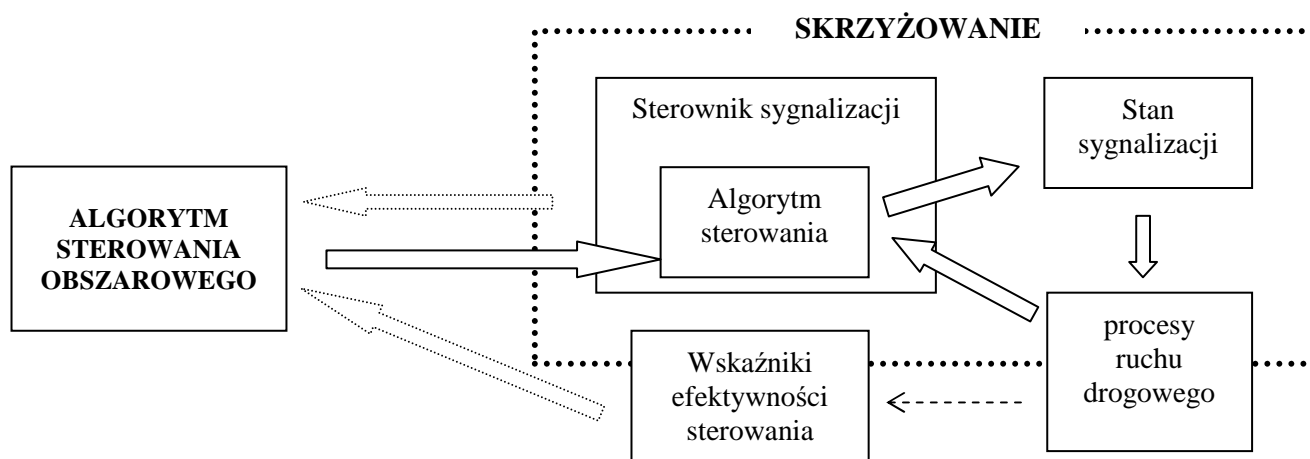
¹pka@it.pw.edu.pl

²ssobieszuk@um.warszawa.pl

zasadniczo wpłynie na rzeczywiste efekty faktycznie realizowanej synchronizacji sygnalizacji świetlnej w obszarze.

2. ZALEŻNOŚCI ZACHODZĄCE W SYSTEMIE STEROWANIA OBSZAROWEGO

Na rysunku 1. przedstawione zostały podstawowe zależności zachodzące w układzie sterowania utworzonym przez nadrzędny algorytm sterowania obszarowego oraz elementy warstwy lokalnej – skrzyżowania. Dane o ruchu (informacje o stanie procesu ruchu, takie jak np.: rzeczywiste natężenie nasycenia strumieni ruchu, występowanie i długości kolejek pojazdów, charakterystyka ich rozładowywania, luki między pojazdami dojeżdżającymi, itp.) na skrzyżowaniu, wyznaczone za pomocą odpowiednio opracowanego układu detekcji, są przesyłane do sterownika, gdzie, za sprawą opisanych w algorytmie procedur, wraz z otrzymanymi z wyższej warstwy informacjami, są wykorzystywane w celu ustalania konkretnych stanów sygnalizacji świetlnej. Wyświetlane na skrzyżowaniu sygnały bezpośrednio wpływają na procesy ruchu, których oddziaływanie nierzadko wychodzi poza obręb konkretnego skrzyżowania, wywierając znaczny wpływ na, określane przy pomocy tzw. wskaźników oceny efektywności (np. długości kolejek, liczby zatrzymań, straty czasu), warunki ruchu skrzyżowań sąsiadujących. Wartości analizowanych w obszarze wskaźników (lub ich odchylenia od wartości oczekiwanych) świadczyć mogą o poprawności (bądź nie) przyjętych na poszczególnych poziomach sterowania zasad.



Rys. 1. Schemat oddziaływania: algorytm lokalny – system.

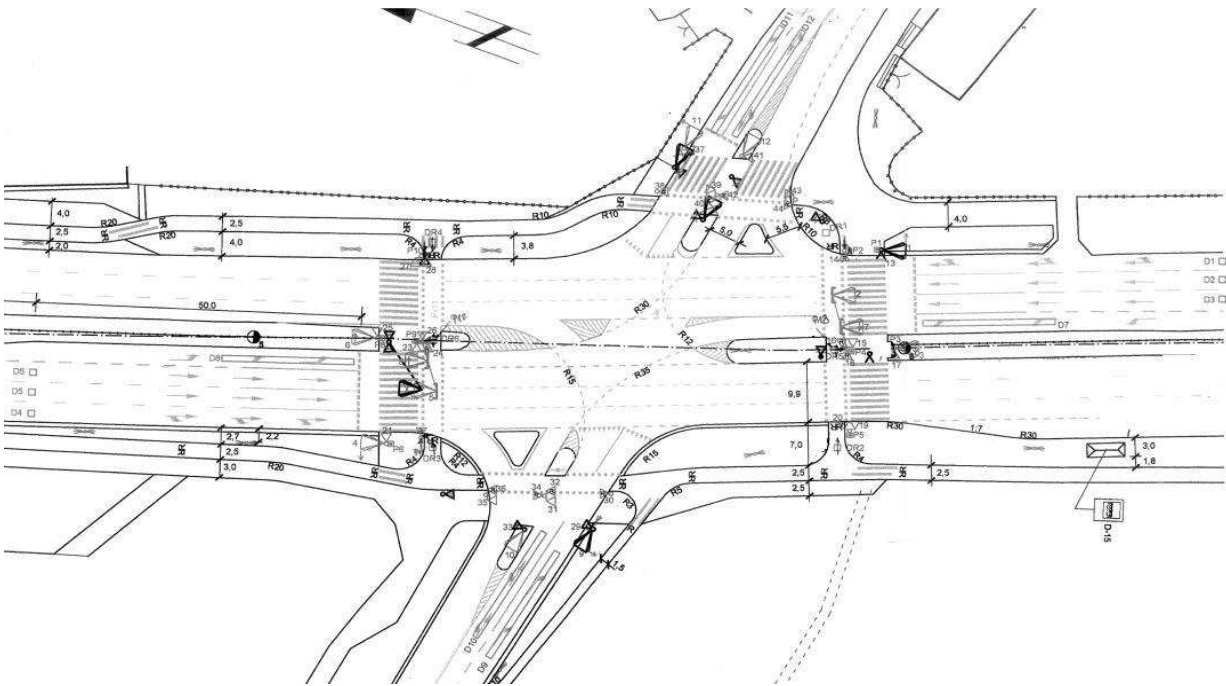
3. ZADANIE KOORDYNACJI LINIOWEJ

Chcąc przybliżyć problematykę obopólnej zależności pomiędzy algorytmem sterowania na pojedynczym skrzyżowaniu a efektami sterowania obszarowego posłużyć się można przypadkiem prostej, liniowej koordynacji sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniach w ciągu komunikacyjnym.

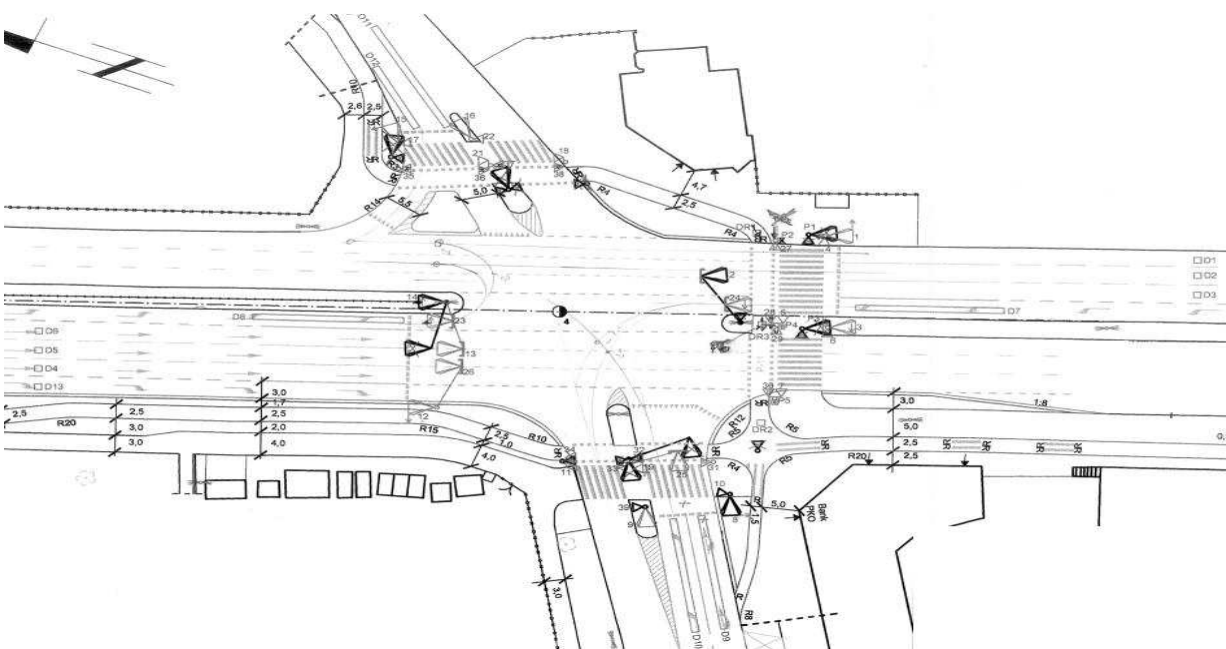
Jako przykład wybrano trzy, połączone liniowo, skrzyżowania (A, B i C). Ich plany sytuacyjne wraz z lokalizacją sygnalizatorów i detektorów ruchu, przedstawiono na rysunkach 2 – 5 [3].



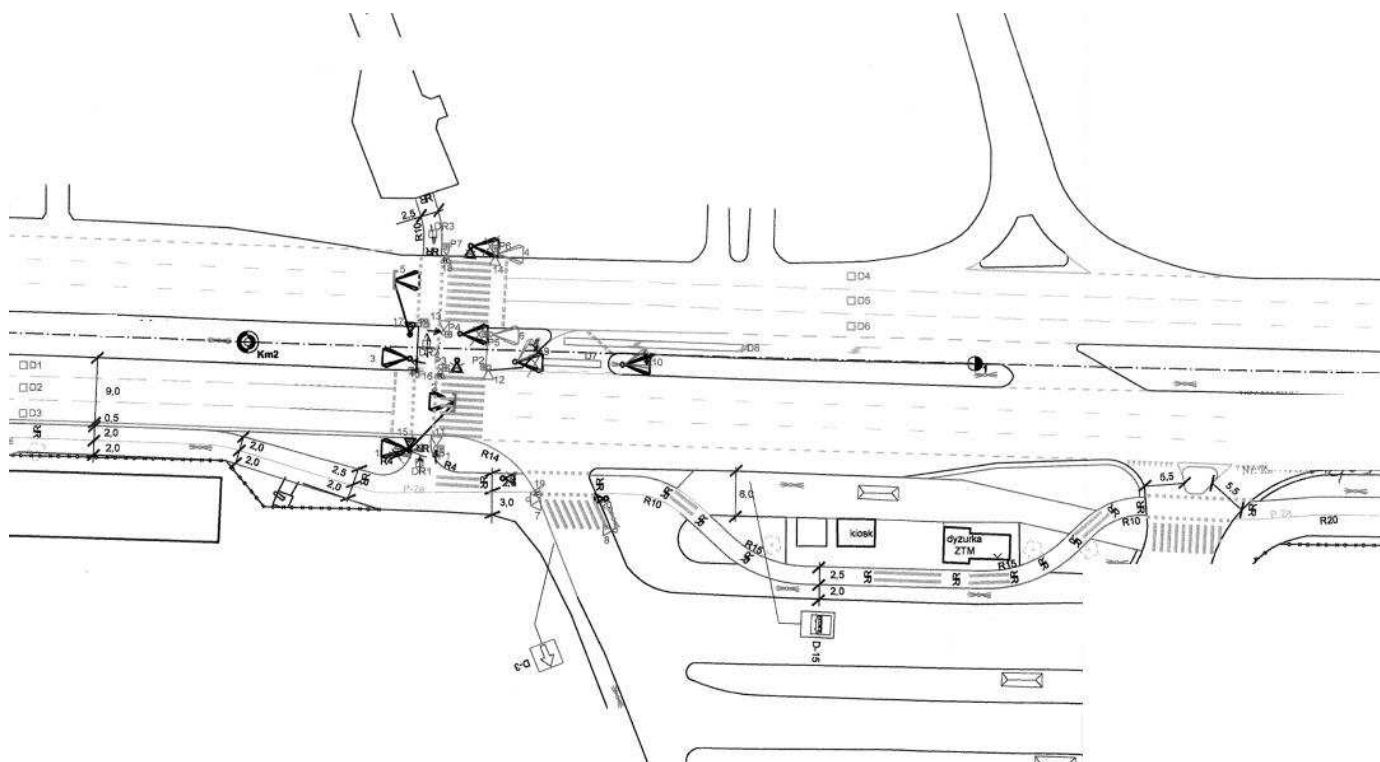
Rys. 2. Lokalizacja skrzyżowań poddanych koordynacji
Źródło: [5].



Rys. 3. Plan sytuacyjny wraz z lokalizacją sygnalizatorów i detektorów na skrzyżowaniu A.



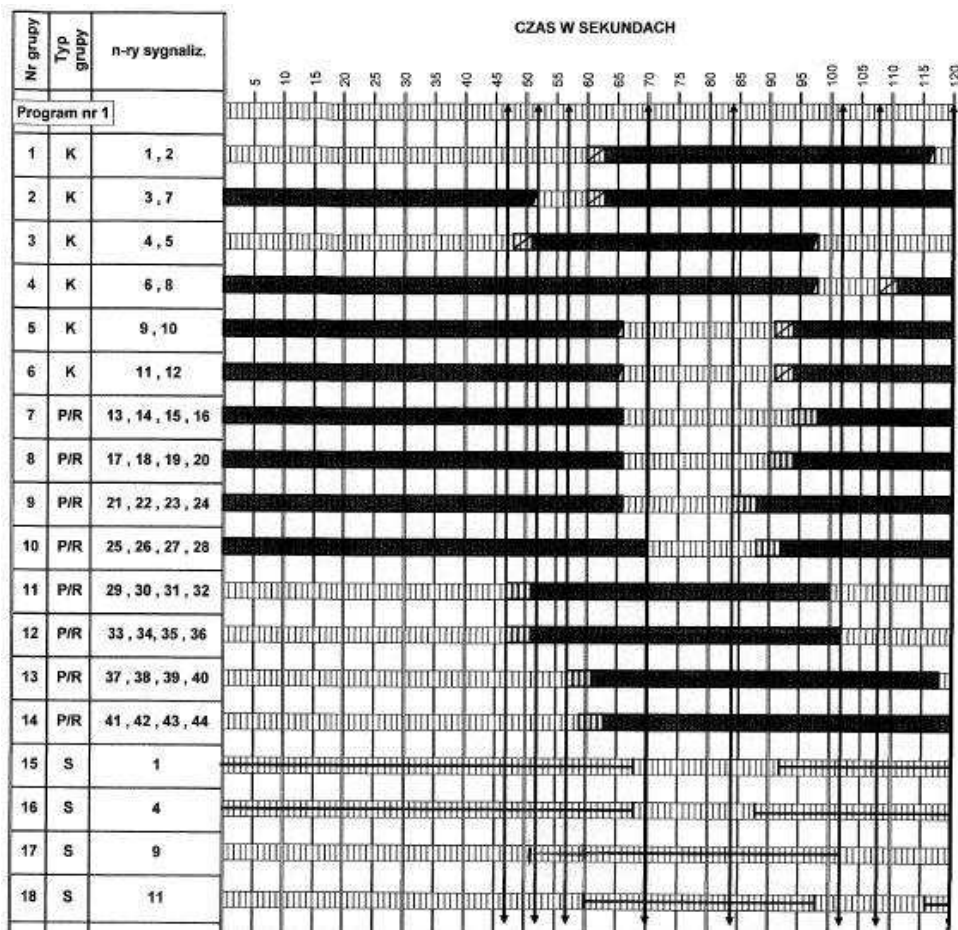
Rys. 4. Plan sytuacyjny wraz z lokalizacją sygnalizatorów i detektorów na skrzyżowaniu B.



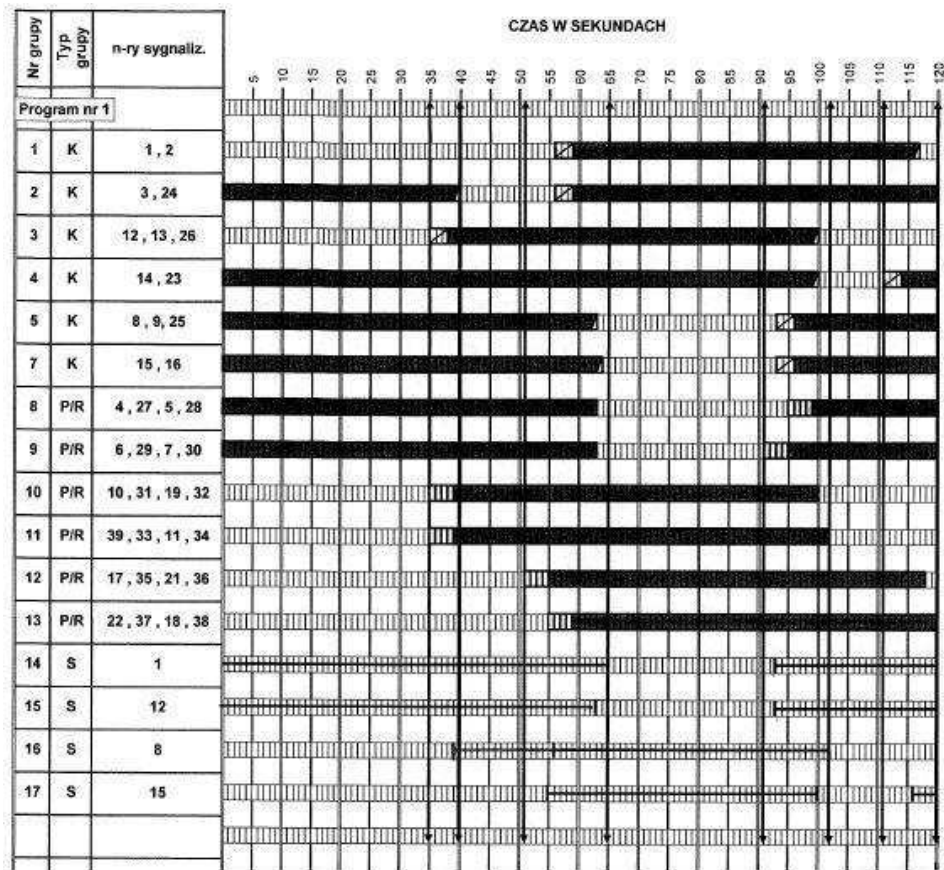
Rys. 5. Plan sytuacyjny wraz z lokalizacją sygnalizatorów i detektorów na skrzyżowaniu C.

Zasadniczym elementem każdego prawidłowo wykonanego projektu ruchowego sygnalizacji świetlnej dla skrzyżowania, bez względu na założenia co do przyjętej zasady sterowania (cykliczne/adaptacyjne, praca w koordynacji/praca izolowana), jest zbiór cyklicznych programów o określonych strukturach, których wyznaczenie poprzedzone jest zawsze szeregiem pomiarów, analiz i obliczeń. Zbiór ten, którego liczebność zależna jest zwykle od ustalonego harmonogramu pracy sygnalizacji, popartego zazwyczaj potrzebą zapewnienia obsługi ruchu o znacząco różniącej się charakterystyce w poszczególnych porach doby czy dniach tygodnia, stanowić dopiero może fundament do dalszych prac projektowych stwarzających możliwość adaptacji oraz koordynacji sygnalizacji świetlnej.

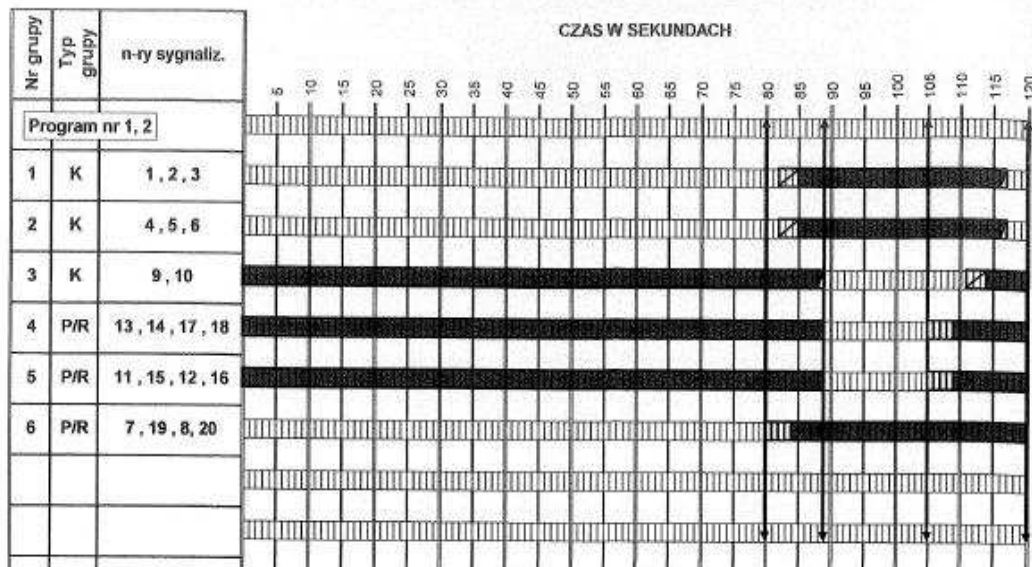
Cykliczne programy bazowe sygnalizacji, nawet przy zakładanej adaptacji sterowania, są więc podstawą do obliczenia parametrów koordynacji. Przedstawione na rysunkach 6 – 8 [3] programy dla wybranych skrzyżowań, sporządzone dla określonej pory dnia, zostały sprowadzone do jednakowej długości cyklu, dzięki czemu możliwa jest ich koordynacja. Dobór wartości przesunięć fazowych (offsetów) będących efektem dążenia do osiągnięcia maksymalnej sumy szerokości wiązek koordynacyjnych w obu kierunkach, pozwolił na wyznaczenie ostatecznego ich przebiegu (rys. 9).



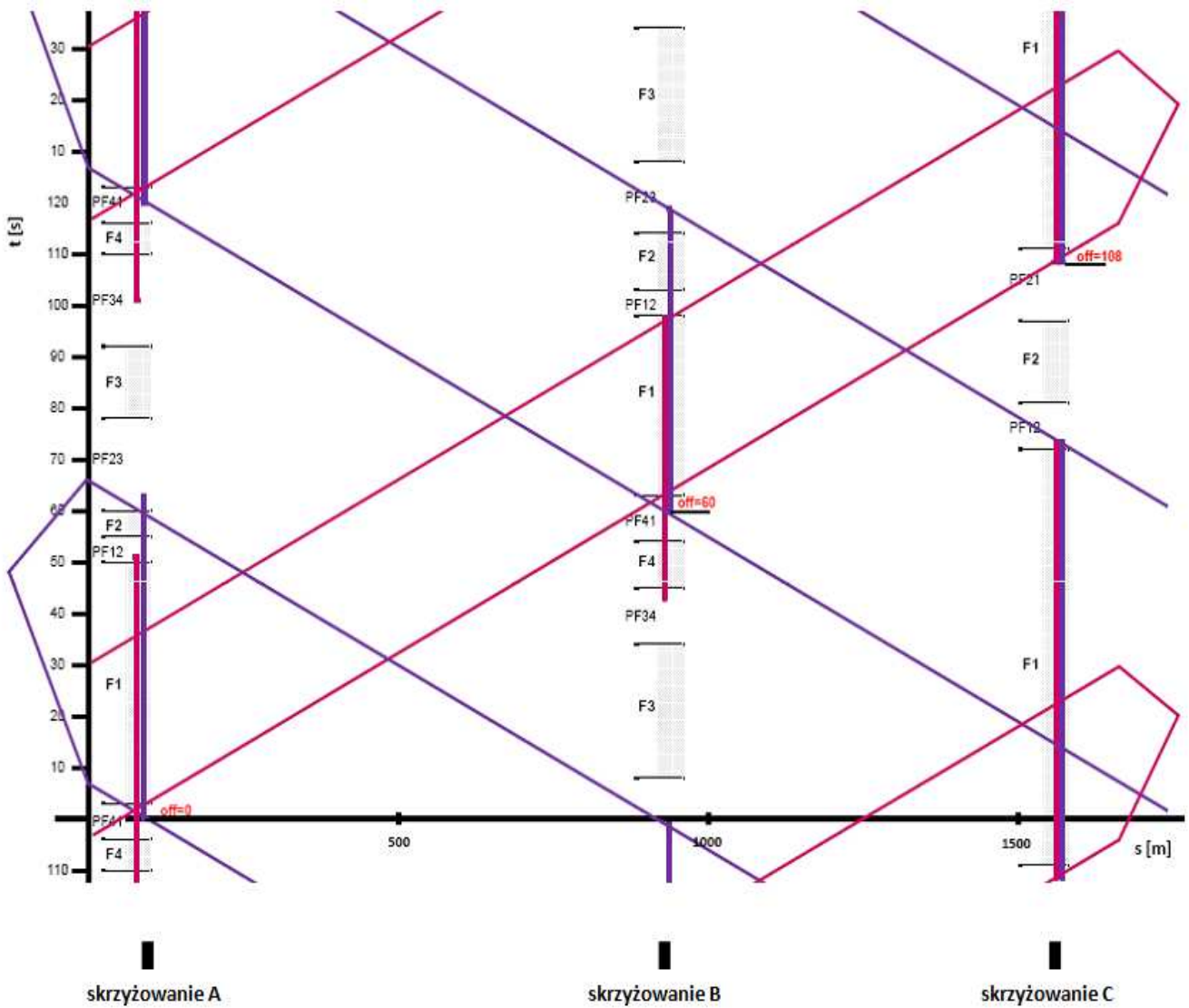
Rys. 6. Bazowy program sygnalizacji dla skrzyżowania A.



Rys. 7. Bazowy program sygnalizacji dla skrzyżowania B.



Rys. 8. Bazowy program sygnalizacji dla skrzyżowania C.



Rys. 9. Przebieg wiązek koordynacyjnych przy sterowaniu cyklicznym.

Uzyskane wiązki koordynacyjne o sumarycznej szerokości 92 s oraz odpowiednim dla szczytu porannego stosunku ich szerokości 10:17 stanowią rozwiązanie dla założonej w podanym przykładzie funkcji celu. Parametrami określającymi uzyskane rozwiązanie są wartości offsetów, odnoszące się tu do początków sygnałów zielonych określonych grup sygnałowych poszczególnych skrzyżowań:

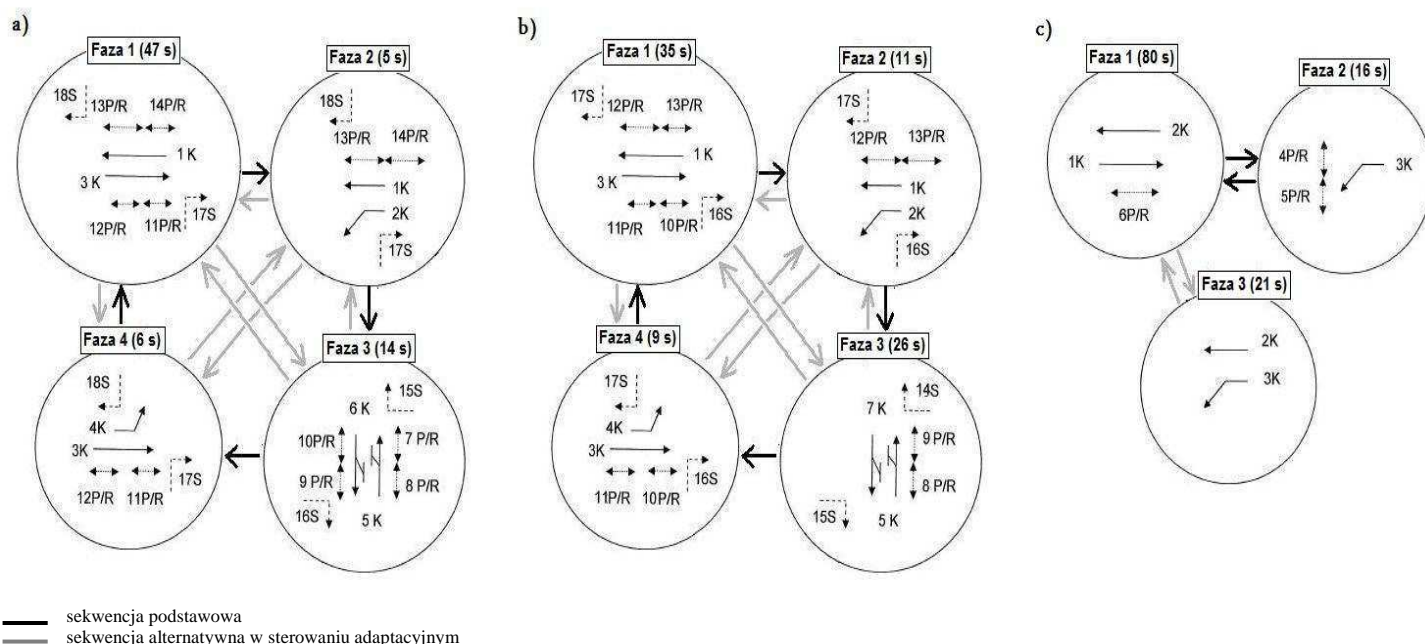
- dla skrzyżowania A: offset = 0 s, dla grupy 1K,
- dla skrzyżowania B: offset = 60 s, dla grupy 1K,
- dla skrzyżowania C: offset = 106 s, dla grup: 1K i 2K

4. ALGORYTM STEROWANIA DLA SKRZYŻOWAŃ SKOORDYNOWANYCH

Przebieg wiązek koordynacyjnych zależy jest od ustalonych, jak pokazano wyżej, wartości offsetów, ale też od innych parametrów, stałych w przypadku sterowania cyklicznego, ale zmiennych w sterowaniu adaptacyjnym, takich, jak np. długości faz ruchu oraz ich sekwencja.

Wyjściową kolejność realizowanych faz ruchu oraz ich zakładane długości w sterowaniu na poszczególnych skrzyżowaniach przedstawiono na rys. 10. Wyznaczenie schematu możliwych faz ruchu oraz dopuszczalnych przejść fazowych jest kolejnym etapem w projektowaniu adaptacyjnej sygnalizacji świetlnej. Określenie zasad oraz czasu realizacji poszczególnych faz zawarte jest w opracowanym dla każdego ze skrzyżowań algorytmie sterowania, poprzez ustaloną kolejność przepatrywania oraz odpowiedni dobór warunków: logicznych (mówiących o aktualnej sytuacji ruchowej) oraz czasowych.

W przytaczanym przykładzie tzw. fazą główną, a więc taką, do której zawsze następuje powrót nie później niż tuż po zakończeniu czasu przewidzianego na realizację aktualnego cyklu, dla każdego ze skrzyżowań jest faza 1. Faza ta zawsze zawiera kołowe grupy sygnałowe poddane koordynacji. Kontrola czasu pozostałego do końca bieżącego cyklu jest, przy powszechnie stosowanej metodzie koordynacji, niezbędna dla możliwości uzyskania koordynacji sygnalizacji. Sam jednak fakt panowania nad długością cyklu, tak by nie odbiegała ona od długości ustalonej dla pozostałych skrzyżowań, oraz gwarancja rozpoczęcia fazy głównej nie później niż z początkiem cyklu, często jednak bywa warunkiem niewystarczającym do utrzymania zakładanych na nadrzędnym poziomie sterowania efektów koordynacji (np. zakładanej szerokości wiązki).

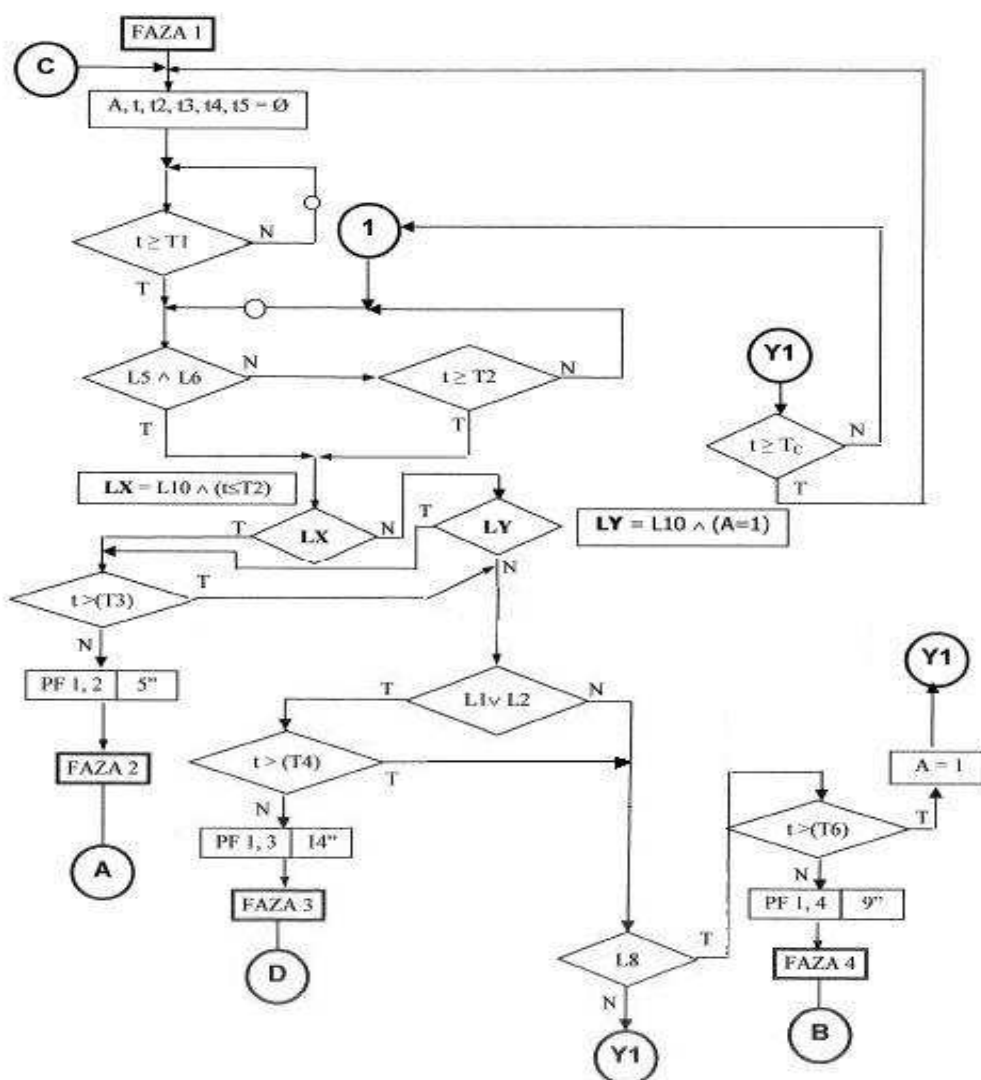


Rys. 10. Schemat faz ruchu dla skrzyżowań: a) A, b) B, c) C.

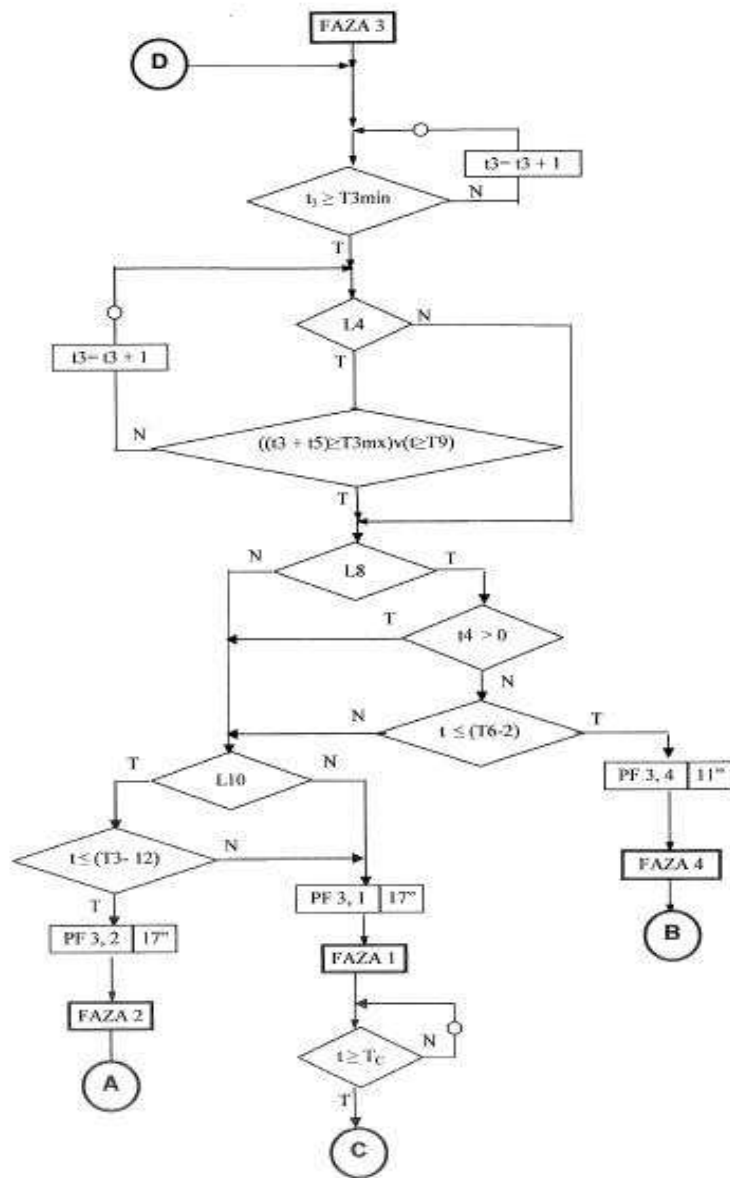
Na rysunku 9. przedstawiono przebieg wiązek koordynacyjnych oraz dokładne odzwierciedlenie kolejności i długości faz zgodnie z przedstawionymi wcześniej programami bazowymi (rysunki: 6 – 8 [3]). Adaptacja na najniższym poziomie sterowania, której zasady zapisane są w algorytmach zaszytych w sterowniki na poszczególnych skrzyżowaniach, często jednak dopuszcza pewną lokalną swobodę, która w istotny sposób wpłynąć może na rzeczywiste efekty koordynacji sygnalizacji świetlnej ciągu skrzyżowań. Przypadek wspomnianego zjawiska przeanalizowany zostanie na przykładzie algorytmu sterowania jednego z rozpatrywanych skrzyżowań – skrzyżowania B.

Część algorytmu opisująca sposób postępowania podczas realizacji fazy 1 ma postać jak na rysunku 11. Wybrany warunkom czasowym przypisano następujące wartości (tab.1):

Przechodząc kolejno przez bloki algorytmu fazy 1, realizując ją do czasu T2, pojawia się pytanie o warunek logiczny L10, związany z grupą kołową 2K, a więc relacją skrętu w lewo. Niech więc w tym przypadku nie wystąpi zapotrzebowanie na skręt w lewo (LX=N i LY=N). Kolejny napotkany blok zawiera pytanie o fazę 3 (L1 lub L2), na którą zapotrzebowanie zostało wykryte. Dodatkowym sprawdzanym tu warunkiem jest warunek czasowy T4, ale skoro $T4 > T2$ – realizacja fazy 3 jest możliwa. Kolejnym krokiem jest więc przejście do fazy 3, poprzedzone realizacją przejścia międzyfazowego PF 1, 3.



Rys. 11. Algorytm sterowania dla wybranych faz ruchu skrzyżowania B.



Rys. 11 (c.d.). Algorytm sterowania dla wybranych faz ruchu skrzyżowania B.

Tablica 1. Wybrane warunki czasowe algorytmu sterowania na skrzyżowaniu B.

warunek	Wartość [s]	Opis warunku
T1	13	Najwcześniejsza chwila zakończenia fazy 1
T2	35	Późniejsza chwila zakończenia fazy 1
T3	100	Najpóźniejsza chwila rozpoczęcia fazy 2
T3min	14	Minimalna długość fazy 3
T3mx	26	Maksymalna długość fazy 3
T4	75	Najpóźniejsza chwila rozpoczęcia fazy 3
T6	97	Najpóźniejsza chwila rozpoczęcia fazy 4
T9	103	Najpóźniejsza chwila zakończenia fazy 3
Tc	120	Długość cyklu

Istotne w analizowanym przypadku warunki logiczne oznaczają (tab.2):

Tablica 2. Wybrane warunki logiczne algorytmu sterowania na skrzyżowaniu B.

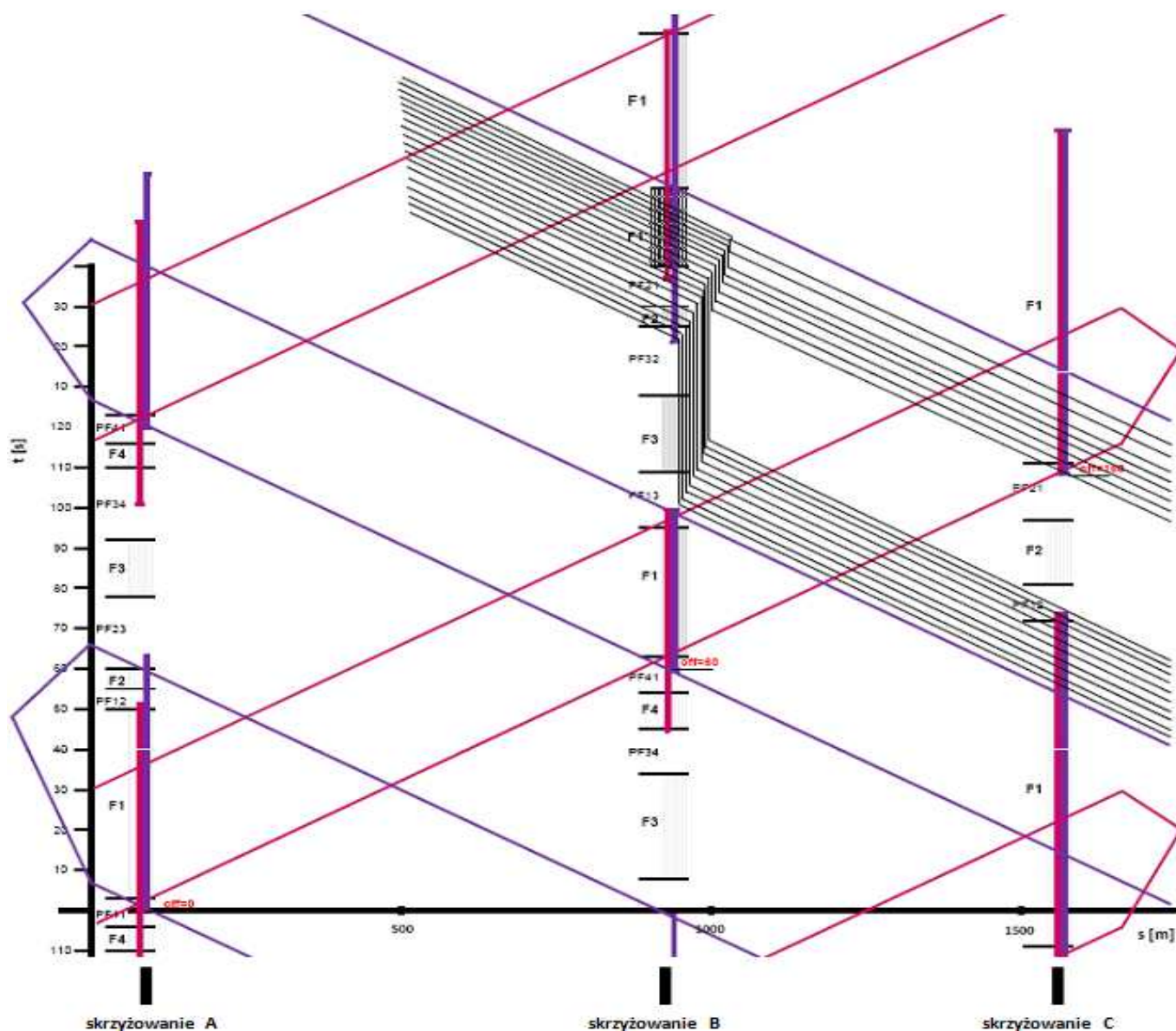
warunek	Opis warunku
L1	żądanie realizacji grupy 5K lub 7K (faza 3) – zajętość jednego z detektorów: D9, ..., D12
L2	żądanie realizacji grup 8P/R, 9P/R (faza 3) – zgłoszenie z jednego z detektorów: P1, ..., P5, DR1, ..., DR3
L4	potrzeba wydłużenia fazy 3 – zajętość jednego z detektorów: D9, ..., D12
L5	brak zapotrzebowania dla grupy 1K – luka czasowa na detektorach: D1, D2, D3,
L6	brak zapotrzebowania dla grupy 3K – luka czasowa na detektorach: D4, D5, D6
L8	żądanie realizacji grupy 4K (faza 4) – zajętość detektora D8
L10	żądanie realizacji grupy 2K – (faza 2) – zajętość detektora D7

Rysunek 11. przedstawia też część algorytmu poświęconą fazie 3. Przyjmując do analizy warunki czasowe i logiczne jak wyżej (tab. 1 i tab. 2), założmy, że zapotrzebowanie na fazę 3 jest znikome, a więc będzie ona realizowana wyłącznie przez możliwie krótki czas (warunek L4 nie jest spełniony). Wówczas pojawia się, zawarte w warunku L8, pytanie o zapotrzebowanie na fazę 4. W przypadku braku zarejestrowanego zgłoszenia potrzeby realizacji fazy 4, ponawia się pytanie o pominiętą wcześniej fazę 2. Tym razem zarejestrowana została zajętość detektora przyporządkowanego do warunku L10, nie został też jeszcze osiągnięty czas T3-12. Następuje więc, poprzez przejście międzyfazowe PF 3, 2, przejście do fazy 2, która następnie, ze względu na brak kolejnych zgłoszeń, jest realizowana przez minimalny zakładany czas ($T_{2min} = 5$ s). Po tym czasie następuje powrót do fazy 1, doczekanie do wypełnienia cyklu, i ponowna realizacja algorytmu, poprzedzona zerowaniem wszystkich parametrów w chwili $T_c = 120$ s.

Przedstawiony powyżej przebieg zdarzeń tworzy charakterystyczną dla danego cyklu sekwencję faz o określonych długościach. Przyjmując, że pozostałe skrzyżowania funkcjonowały na zasadach zbliżonych do tych zawartych w programach bazowych, tzn. w określonych momentach wystąpiło tam zapotrzebowanie na realizację każdej z przewidzianych faz ruchu, opierając się na wyznaczonych wcześniej, niezmiennych, wartościach offsetu, odwzorować można faktyczny dla tego przypadku przebieg wiązek koordynacyjnych (rys. 12).

Analizując zrealizowaną w opisanym przypadku sekwencję faz ($F1 \rightarrow F3 \rightarrow F2 \rightarrow F1$) na skrzyżowaniu B wyraźnie widać, że różni się ona od podstawowej: $F1 \rightarrow F2 \rightarrow F3 \rightarrow F4 \rightarrow F1$. Faza 2 nie wystąpiła bezpośrednio po fazie 1, lecz dopiero po trzeciej, a faza 4 została całkowicie pominięta. Fazy: 2 i 3 były realizowane przez minimalnie krótki czas, tj. odpowiednio: 5 s i 14 s, nie jak zakładał program bazowy przez 11 s i 26 s. Ze względu na rygor stałej długości cyklu, fakt skrócenia wspomnianych faz oraz pominięcia fazy 4 spowodował pewną nadwyżkę czasu w bieżącym cyklu, która została wykorzystana na fazę 1 (fragment F1' przebiegu faz skrzyżowania B – rys. 12).

W efekcie faza 1 – zawierająca obie koordynowane grupy sygnałowe – otrzymała w tym cyklu łącznie 51 s, a więc o 16 s więcej niż przewiduje program bazowy. Złudne jest jednak podejrzenie o zwiększenie efektywności sterowania w obszarze. To, co lokalnie wydaje się korzystne (wzrost przepustowości kierunków koordynowanych na jednym skrzyżowaniu) nie musi wcale skutkować pozytywnym efektem koordynacji. Wystarczy przyjrzeć się otrzymanym szerokościom wiązek koordynacyjnych. Widać wyraźnie, że wiązka w kierunku skrzyżowania A (z założenia „obsługująca” główną, charakterystyczną dla szczytu porannego, relację) jest węższa od tej uzyskanej przy sterowaniu cyklicznym (39 s zamiast 59 s). Ponadto, jak pokazano przy pomocy uśrednionych międzywęzłowych trajektorii ruchu, na wlocie skrzyżowania B od strony skrzyżowania C tworzy się dodatkowa kolejka pojazdów, które, jak wynika z dalszych przebiegów trajektorii ich ruchu, zmuszone będą ponownie się zatrzymać dojeżdżając do skrzyżowania A. Automatycznie rośnie więc liczba zatrzymań oraz straty czasu na analizowanym odcinku.



Rys. 12. Przebieg wiązek koordynacyjnych przy sterowaniu adaptacyjnym ze zmienioną sekwencją faz na skrzyżowaniu B.

5. PODSUMOWANIE

Opisane wyżej zjawiska trudno nazwać pożądanymi w kontekście zakładanych efektów sterowania obszarowego. Przytoczony przykład, pomimo niskiego stopnia złożoności zarówno pod względem liczby skrzyżowań, ich położenia, jak i przyjętej metody sterowania, doskonale obrazuje konsekwencje nieadekwatnej do nadrzędnie wyznaczonych celów zasady lokalnej adaptacji na skrzyżowaniu. Konsekwencje te, przy wykorzystaniu do wyznaczenia zadanej funkcji celu (znalezienie takich stałych wartości offsetów na skrzyżowaniach, by suma szerokości wiązek w obu kierunkach była największa) zasady optymalizacji statycznej, poddają w wątpliwość sens wysokiej „elastyczności” algorytmów sterowania na skrzyżowaniu skoordynowanym. Być może przy tego typu metodach obszarowego sterowania, autonomia skrzyżowań powinna być bardziej ograniczona, lub dodatkowo uwarunkowana faktyczną sytuacją ruchową na pozostałych skrzyżowaniach. Alternatywą, być może pozwalającą na większy zakres lokalnej adaptacji, jest w pełni dynamiczna optymalizacja w sterowaniu obszarowym, rozumiana jako ciągle poszukiwanie ekstremum (np. maksymalnych sum szerokość wiązek dla koordynacji liniowej, lub innych, często kombinowanych, wskaźników efektywności sterowania w przypadku bardziej złożonych obiektów – długości kolejek, liczby zatrzymań, itp), przy jednoczesnym uwzględnianiu przebiegu zmian decyzji najniższej warstwy sterowania – podejmowanych poprzez realizację indywidualnych

algorytmów na poszczególnych skrzyżowaniach. Rozwiązaniem takiej optymalizacji mogłyby być np. zmienne (chwilowe) długość „cykli”, zmienne wartości offsetów, czy też na bieżąco dobierany zestaw grup koordynowanych, przy uwzględnieniu możliwości zmiennej lokalizacji punktów krytycznych w obszarze.

Streszczenie

W artykule przedstawione zostaną rozważania wzajemnej zależności między algorytmami sterowania na pojedynczym skrzyżowaniu a algorytmami sterowania obszarowego, oraz ich wpływ na efektywność sterowania w systemie obejmującym ciąg bądź sieć skrzyżowań ulic. Problem podziału funkcji decyzyjnych między poziomami lokalnym i centralnym w systemach sterowania ruchem drogowym (srd), towarzyszy tym systemom od momentu ich powstawania. Analizując historię rozwoju systemów srd, w tym również tych uznanych wspólnie za zaawansowane, widać wręcz niechętnie podejście do struktur zcentralizowanych, natomiast podkreślane są zalety pewnego rozproszenia i podziału funkcjonalnego kilkuwarstwowych, często hierarchicznych, lecz wyraźnie już zdecentralizowanych, systemów (np.: UTOPIA, ASTRUD). Na przykładzie synchronizacji liniowej (koordynacji) na ciągu skrzyżowań, zaprezentowane zostaną dylematy związane z pogodzeniem lokalnej adaptacji sygnalizacji świetlnej dla poszczególnych skrzyżowań, z wymaganiami, ograniczeniami i zaleceniami dotyczącymi efektywności sterowania na koordynowanym ciągu.

Słowa kluczowe: sterowanie, ruch drogowy, algorytmy, koordynacja.

Analysis of the dependencies between the adopted control algorithm on a single crossroads and the effects of area control

Abstract

The article will present considerations of mutual dependencies between control algorithms on a single crossroads and algorithms of area control and their influence on the efficiency of controlling within the system covering a sequence or network of crossroads. The problem of division of decision functions between local and central levels within road traffic control systems has existed since the moment of their creation. On the example of linear synchronicity (coordination) at a sequence of crossroads, dilemmas shall be presented connected with combining local adaptation of traffic lights for particular crossroads with requirements, limitations and recommendations concerning efficiency of control on a coordinated sequence.

Key words: traffic control, algorithms, coordination.

LITERATURA

- [1] Peek Traffic Sp. z o.o.: UTOPIA. Nowoczesne Zarządzanie Transportem. Broszura informacyjna.
- [2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury 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, 2003 z późn. zmianami.
- [3] Sitarski Marek, Komprojekt s.c. Projektowanie Komunikacyjne: Projekt stałej organizacji ruchu dotyczący budowy ścieżki rowerowej w ciągu ul. Czerniakowska – Powsińska – Wiertnicza. Modernizacja sygnalizacji świetlnej. Część ruchowa. Dokumentacja wykonana na zlecenie Zarządu Miejskich Inwestycji Drogowych w Warszawie, Warszawa 2010.
- [4] System sterowania ruchem drogowym ASTRUD, <http://arex.pl/>, 2012-03-16.
- [5] Mapa Polski, <http://www.targeo.pl/>, 2012-03-16.