

Piotr KAWALEC¹, Tomasz KRUKOWICZ²

WYBRANE PROBLEMY PROJEKTOWANIA ADAPTACYJNEJ SYGNALIZACJI ŚWIETLNEJ

Streszczenie. Artykuł opisuje problemy występujące w praktyce projektowania adaptacyjnej sygnalizacji świetlnej. Oparty jest na doświadczeniach autorów w tej dziedzinie. W artykule zawarto krótki opis etapów projektowania oraz problemów w nich występujących.

Opisano zagadnienie wyboru faz ruchu oraz sekwencji faz i wpływu tego etapu na dalsze etapy projektowania. Przedstawiono przykład niewłaściwego wyboru zestawu faz i wynikających z niego ograniczeń w sterowaniu. Omówiono problematykę złożoności projektowania przy zastosowaniu większej liczby faz ruchu.

W dalszej części artykułu scharakteryzowano problemy związane z wyznaczaniem przejść międzyfazowych. Opisano najczęściej spotykane błędy oraz potencjalne zagrożenia wynikające z niewłaściwego wyznaczenia przejść międzyfazowych. Przedstawiono problematykę pracochłonności wyznaczania przejść międzyfazowych przy sterowaniu wielofazowym.

Kolejną część artykułu poświęcono zagadnieniom związanym z wyznaczaniem warunków czasowych sterowania. Przedstawiono rodzaje warunków czasowych oraz sposób ich wyznaczania i wpływ na elastyczność sterowania.

W podsumowaniu opisano kierunki prowadzonych aktualnie badań w zakresie projektowania sygnalizacji świetlnej oraz stosowane metody rozwiązywania problemów opisanych w artykule.

Artykuł opiera się na przykładach praktycznych, pochodzących z projektów sygnalizacji świetlnej dla rzeczywistych skrzyżowań.

Słowa kluczowe. Sterowanie ruchem drogowym, sygnalizacja świetlna, sterowanie adaptacyjne

CHOSEN PROBLEMS OF DESIGNING VEHICLE ACTUATED ROAD TRAFFIC CONTROL

Summary. Problems occurring in practice of designing actuated traffic control are described in the paper. It is based of own experience of the authors. Short description of designing stages is given and of specific problems as well.

At the beginning, the issues of selection of traffic stages and their sequence are discussed focusing on impact of this stage for further designing. The case of inappropriate selection of a

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

² Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Sterowania Ruchem, Zespół Sterowania Ruchem Drogowym, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel. 22 234 75 85, tkr@it.pw.edu.pl

set of stages and resulting control constraints are described. The complexity of designing process when more traffic stages considered is also discussed.

Further, the problems of interstages defining are presented. The most common mistakes and risks resulting from improper interstages defining are described. The labour intensity required for interstages defining at multistage control systems is signalized.

The next part of the paper focuses on problems of determination of control time conditions. Different types of time conditions, methods of their determination and impact on control flexibility are presented.

As resumé, the trends of current research in the field of traffic control and methods used to solve the problems described are presented. This paper is based on practical cases of real crossroads traffic control designs.

Keywords. Road traffic control, traffic lights, vehicle actuated control

1. WPROWADZENIE

Projektowanie adaptacyjnej sygnalizacji świetlnej stanowi jedno z typowych zadań stawianych przed inżynierami ruchu drogowego. Praktyka projektowania wskazuje jednak, że poszczególni projektanci stosują różne metody projektowania, a efekty ich prac nie zawsze w pełni odpowiadają zamierzonym celom.

Nie została wydana w języku polskim żadna pozycja poświęcona projektowaniu adaptacyjnej sygnalizacji świetlnej, uwzględniająca aktualny stan prawny oraz wiedzę techniczną. Osoby projektujące uzyskują wiedzę i umiejętności podczas studiów na różnych uczelniach technicznych. Niejednokrotnie projektowaniem i zatwierdzaniem projektów sygnalizacji zajmują się osoby wykształcone w odległych od transportu dziedzinach, a nawet nieposiadające wykształcenia technicznego.

2. ETAPY PROJEKTOWANIA ADAPTACYJNEJ SYGNALIZACJI ŚWIETLNEJ

Projektowanie sygnalizacji świetlnej jest procesem wieloetapowym. W przypadku realizacji przez doświadczonego projektanta bądź nieskomplikowanych zagadnień proces ten ma charakter sekwencyjny. W przypadku zagadnień złożonych proces ma charakter iteracyjny, po otrzymaniu wyników pewnego etapu pracy może zaistnieć konieczność powrotu do wcześniejszych prac i wprowadzenia korekt. W projektowaniu sygnalizacji można wyróżnić:

- etap przygotowawczy – obejmujący wykonanie pomiarów lub prognoz ruchu, zdobycie materiałów do projektowania, opracowanie projektu organizacji ruchu i koncepcji sterowania ruchem,
- etap projektowania sygnalizacji świetlnej – obejmujący projektowanie sygnalizacji cyklicznej oraz adaptacyjnej,
- etap uzgodnień i zatwierdzania projektu – wynikający z regulacji administracyjnych, w wyniku tego etapu niejednokrotnie konieczny jest powrót do etapu projektowania.

2.1. Czynności związane z projektowaniem sygnalizacji świetlnej

Podczas projektowania sygnalizacji świetlnej zasadniczym problemem do rozwiązania jest stworzenie programu sterowania oraz algorytmu sterowania. Czynności wykonywane podczas projektowania można podzielić na [1], [2]:

1. Projektowanie cyklicznej sygnalizacji świetlnej:
 - a) rozmieszczenie sygnalizatorów na skrzyżowaniu, przyporządkowanie strumieni ruchu do grup sygnałowych oraz określenie sposobu sterowania,
 - b) określenie kolizyjności poszczególnych grup sygnałowych, wyznaczenie faz ruchu dla programu bazowego,
 - c) wyznaczenie minimalnych czasów międzyzielonych,
 - d) wyznaczenie sekwencji faz, określenie długości cyklu,
 - e) wyznaczenie udziałów sygnałów zezwalających w poszczególnych grupach,
 - f) wyznaczenie programu sygnalizacji.
2. Projektowanie adaptacyjnej sygnalizacji świetlnej:
 - a) wyznaczenie faz ruchu wykorzystywanych w sterowaniu adaptacyjnym,
 - b) określenie dopuszczalności przejść międzyfazowych pomiędzy poszczególnymi fazami,
 - c) wyznaczenie programów przejść międzyfazowych,
 - d) stworzenie koncepcji algorytmu sterowania,
 - e) rozmieszczenie detektorów na skrzyżowaniu,
 - f) wyznaczenie warunków czasowych funkcjonowania algorytmu,
 - g) opracowanie algorytmu sterowania (np. w formie sieci działań).

2.2. Różnice pomiędzy projektowaniem sterowania cyklicznego i adaptacyjnego

Projektowanie cyklicznej sygnalizacji świetlnej jest dobrze opisane w literaturze [1], [3]. Czynności te są wykonywane również podczas projektowania sygnalizacji zależnej od ruchu, ale należy je wykonywać w sposób nieznacznie odmienny niż w przypadku sygnalizacji cyklicznej.

Podczas tworzenia sterowania cyklicznego funkcją sterowania jest funkcją okresową, przez co łatwo jest określić jej wartości w przyszłości. Funkcję sterowania cyklicznego można przedstawić następująco:

$$\bar{\mathbf{u}}(t) = \bar{\mathbf{u}}(t + kc) \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

gdzie:

$\bar{\mathbf{u}}$ – wektor sterowania, przedstawiający stany sygnalizatorów w poszczególnych grupach sygnałowych,

t – czas,

c – długość cyklu.

W przypadku sterowania adaptacyjnego funkcja sterowania jest zależna od:

- czasu (jak w sterowaniu cyklicznym),
- zgłoszeń uczestników ruchu, rejestrowanych za pomocą detektorów,
- aktualnego stanu, w którym znajduje się algorytm sterowania ruchem.

W związku z tym nie można stworzyć prostej zależności funkcyjnej określającej sygnały na sygnalizatorach w poszczególnych chwilach:

$$\bar{\mathbf{u}}(t, \bar{\mathbf{d}}, \bar{\mathbf{s}}(t-1)) \neq \bar{\mathbf{u}}(t + kc) \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

gdzie:

$\bar{\mathbf{s}}$ – wektor stanu algorytmu,

$\bar{\mathbf{d}}$ – wektor stanu detektorów (wejść sterownika).

Dla potrzeb opisu sterowania adaptacyjnego zasadne jest zastosowanie podejścia automatowego – opis sterowania za pomocą automatu skończonego (FSM), czyli piątki uporządkowanej $\langle \mathbf{X}, \mathbf{S}, \mathbf{U}, \delta, \lambda \rangle$. W automacie takim wyróżnia się:

- alfabet wejściowy \mathbf{X} – w przypadku sterowania ruchem są to stany detektorów ($\bar{\mathbf{d}}$) oraz czas (t),
 - alfabet wewnętrzny \mathbf{S} – określony przez projektanta w algorytmie sterowania, w każdej fazie ruchu można wyróżnić wiele stanów, w każdym ze stanów możliwe są inne przejścia do innych stanów,
 - alfabet wyjściowy \mathbf{Y} – w przypadku sterowania ruchem są to stany sygnalizatorów $\bar{\mathbf{u}}$,
 - funkcję przejść δ – określającą sposób przejść pomiędzy poszczególnymi stanami automatu,
 - funkcję wyjść λ – określającą, dla automatu Moore'a stan wyjść (sygnały na sygnalizatorach $\bar{\mathbf{u}}$) w zależności od stanu wewnętrznego algorytmu sterowania \mathbf{S} .
- W algorytmach sterowania ruchem drogowym stany algorytmu należące do jednej fazy muszą zapewniać identyczne wartości wektora wyjść $\bar{\mathbf{u}}$.

W praktyce funkcja wyjść w automatach sterujących ruchem drogowym przyjmuje postać bardzo nieskomplikowaną, jej wyznaczenie nie wymaga rozwiązywania skomplikowanych zagadnień. Zdecydowanie bardziej złożone jest zagadnienie określenia alfabetu wewnętrznego automatu oraz funkcji przejść. Standardem jest opis automatu za pomocą algorytmu sterowania, w którym występują warunki czasowe oraz logiczne (detektorowe). Całkowicie jednoznaczny jest opis za pomocą sieci działań – schematu blokowego algorytmu. Alternatywą jest opis słowny, często stosowany w praktyce przez projektantów. Jego wadą jest brak możliwości dokładnego sprawdzenia kompletności algorytmu oraz jednoznaczności zapisów.

Opisane powyżej różnice powodują, że konieczne jest opracowanie innego podejścia do zagadnień związanych z projektowaniem adaptacyjnej sygnalizacji świetlnej. Wśród podstawowych problemów związanych z projektowaniem można wyróżnić:

- zagadnienie wyznaczania faz ruchu zapewniających możliwość efektywnego sterowania adaptacyjnego,
- zagadnienie wyznaczania przejść międzyfazowych,
- zagadnienie wyznaczania warunków czasowych dla algorytmów sterowania adaptacyjnego.

Podczas projektowania sterowania adaptacyjnego wykorzystuje się tzw. bazowy program sygnalizacji, tj. program realizowany podczas obciążenia wszystkich wlotów skrzyżowania i realizacji maksymalnych czasów sygnałów zezwalających. Niekiedy program taki nazywany jest programem maksymalnym. Aby można było na jego podstawie stworzyć efektywne sterowanie adaptacyjne, konieczne jest uwzględnienie wymagań związanych ze sterowaniem zależnym od ruchu już na etapie tworzenia faz ruchu oraz na etapie stworzenia struktury cyklicznego programu sygnalizacji (sekwencji faz).

3. WYZNACZANIE SKŁADU FAZ RUCHU ORAZ SEKWENCJI FAZ

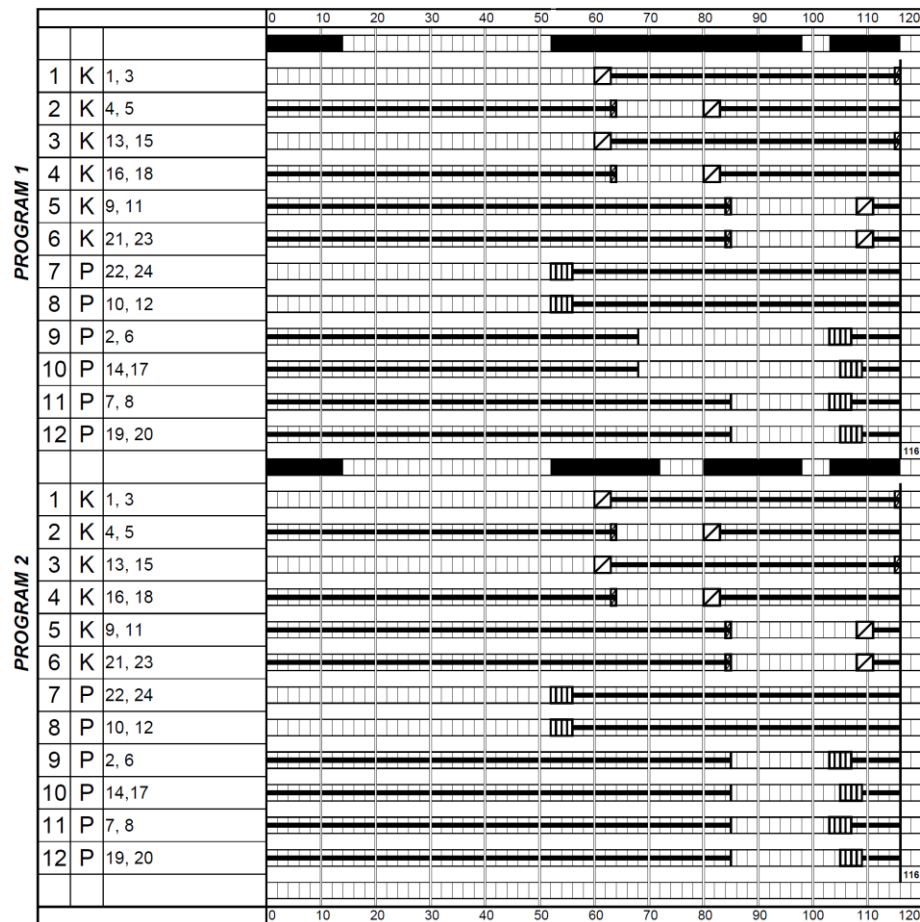
Sterowanie cykliczne zasadniczo odbywa się z wykorzystaniem maksymalnych faz ruchu. Pod pojęciem maksymalnej fazy ruchu jest rozumiany każdy najliczniejszy podzbiór grup sygnałowych, w którym żadna para nie jest parą grup konfliktowych. Dowód efektywności sterowania cyklicznego z wykorzystaniem faz maksymalnych przeprowadzono w [1]. pracy tej jednak tylko wstępnie określono kryteria oceny struktur programu sygnalizacji pod kątem efektywności w przypadku zmian natężenia ruchu. Sformułowana metoda dotyczyła bowiem wyłącznie sterowania cyklicznego.

W sterowaniu cyklicznym istnieje pojęcie przedziałów stałych (przejsć międzyfazowych) oraz przedziałów zmiennych (faz ruchu). Czasy trwania przedziałów zmiennych są określane przez projektanta na etapie tworzenia programu sygnalizacji. W przypadku sterowania adaptacyjnego czasy trwania przedziałów zmiennych są wyznaczane przez sterownik na podstawie algorytmu sterowania i podczas tworzenia zestawu faz ruchu konieczne jest uwzględnienie możliwości wcześniejszego zakończenia fazy.

Kolejnym rozpatrywanym zagadnieniem jest możliwość realizacji faz następujących po danej fazie. Ze względu na istnienie strumieni kolizyjnych o dopuszczalnym jednoczesnym zezwoleniu na ruch nie jest możliwe przejście pomiędzy dowolnymi fazami ruchu. Na brak możliwości przejścia pomiędzy poszczególnymi fazami mogą wpływać także uwarunkowania związane z przebiegiem procesu ruchu drogowego na skrzyżowaniu, m.in. tworzenie się kolejek. Podczas wyznaczania faz ruchu, konieczne jest więc także uwzględnienie liczby faz ruchu, do których jest możliwe przejście z danej fazy.

Miarą elastyczności danej sekwencji faz jest stosunek czasu, w którym możliwa jest analiza warunków detektorowych przez algorytm sterowania do czasu cyklu programu bazowego. Z miary tej bezpośrednio wynika czas trwania stanów algorytmu sterowania, w których nie ma możliwości przejścia do innej fazy. Na rys. 1 przedstawiono dwa przykładowe programy sygnalizacji. Program 1 jest programem optymalnym w przypadku sterowania cyklicznego. W stosunku do programu 2 wydłużony jest czas trwania sygnału zezwalającego w grupach 9P i 10P (wcześniejsze rozpoczęcie wyświetlania sygnału zezwalającego). Rozwiązanie to zapewnia zmniejszenie strat czasu dla pieszych poruszających się w tych grupach. Jednak zastosowanie takiego zestawu faz ruchu narzuca konieczność realizacji po fazie 2 następnej fazy ruchu nr 3. Wynika to z konieczności zapewnienia pieszym możliwości przekroczenia całego skrzyżowania. W przypadku zastosowania zestawu faz ruchu jak w programie 2 straty czasu dla pieszych wzrosną, jednak w przypadku niepełnego obciążenia skrzyżowania istnieje możliwość wcześniejszego zakończenia fazy 2 i przejścia do fazy 3 bądź powrotu do fazy 1, co było niemożliwe w przypadku programu 1.

Podczas tworzenia faz ruchu należy zauważyć, że w praktyce projektanci rzadko wyznaczają więcej niż 7 faz ruchu (w sterowaniu adaptacyjnym). Jest to działanie niekorzystne, gdyż w przypadkach niepełnego obciążenia skrzyżowania sterowanie adaptacyjne z wykorzystaniem sztywno określonych faz ruchu jest mało efektywne. W przypadku większej liczby faz ruchu znacząco rośnie liczba przejsć międzyfazowych i liczba koniecznych do wyznaczenia warunków czasowych. Zaprojektowanie takiej sygnalizacji świetlnej jest bardzo pracochłonne bez wykorzystania wspomagania komputerowego.



Rys. 1. Przykładowe programy sygnalizacji. Kolorem czarnym nad programami oznaczono fragmenty cyklu, w których nie jest możliwa zmiana fazy ruchu

Fig. 1. Sample traffic light programs

4. PROJEKTOWANIE PRZEJŚĆ MIĘDZYFAZOWYCH

Przejściami międzyfazowymi (zwanymi również przedziałami międzyfazowymi, przejściami fazowymi lub przedziałami stałymi) nazywane są okresy w programie sygnalizacji, które znajdują się pomiędzy kolejnymi fazami [4]. W czasie trwania przejść międzyfazowych powinna zostać zrealizowana większość zależności czasowych zapewniających bezpieczeństwo ruchu na skrzyżowaniu. Na czas przejść międzyfazowych składają się:

- końcówki sygnałów zezwalających w grupach kończących ruch,
- sygnały przejściowe końcowe (np. zielony migający, żółty),
- zakładki sygnałów zabraniających,
- sygnały przejściowe początkowe (np. czerwony z żółtym),
- początki sygnałów zezwalających w grupach rozpoczynających ruch.

Możliwa jest realizacja w przejściach międzyfazowych sygnałów zezwalających dla wybranych grup, jak również pewnych charakterystycznych okresów programów sterowania, jak np. realizacja podfazy czy oczyszczanie powierzchni akumulacyjnych. Zagadnienia te wykraczają poza zakres niniejszego artykułu i nie będą dalej omawiane.

Sposób wyznaczania przejść międzyfazowych musi uwzględniać wymagania formalne, które dla programów sygnalizacji określone są w załączniku nr 3 do [2]. Składa się na nie kilka wymagań dotyczących bezpieczeństwa ruchu. Warunki bezpieczeństwa, jakie powinny spełniać przejścia międzyfazowe to:

- spełnienie wymagań w zakresie zachowania minimalnych czasów międzyzielonych,
- spełnienie wymagań w zakresie dojazdu strumieni ruchu rozpoczynających ruch w fazie następującej po przejściu międzyfazowym.

Podstawowym wymaganiem w zakresie zachowania czasów międzyzielonych jest spełnienie zależności (3)

$$t_m(i, j) \geq t_m^{\min}(i, j), \quad (3)$$

gdzie:

$t_m^{\min}(i, j)$ – minimalny czas międzyzielony określony na podstawie przepisów,

$t_m(i, j)$ – czas międzyzielony występujący w programie sygnalizacji (tzw. rzeczywisty), zależny od sposobu wyznaczania przejść międzyfazowych.

Minimalne czasy międzyzielone $t_m^{\min}(i, j)$ przedstawiane są w macierzy minimalnych czasów międzyzielonych T_m^{\min} , która jest macierzą kwadratową, wypełnioną symetrycznie o elementach całkowitych nieujemnych. Podczas wyznaczania przejść międzyfazowych wykonywane są operacje na minorach tej macierzy, zawierających wyłącznie elementy z wierszy odpowiadających grupom, w których kończy się sygnał zielony oraz kolumn dla grup, w których rozpoczyna się wyświetlanie sygnału zezwalającego.

Drugi warunek formalny, jakiemu powinno odpowiadać przejście międzyfazowe dotyczy strumieni kolizyjnych do dopuszczalnym jednoczesnym zezwoleniu na ruch. Ograniczenia w sterowaniu takimi grupami określone zostały w [2]. Konieczne jest sterowanie w sposób zapewniający brak możliwości dojazdu przez strumień podporządkowany do punktu kolizji wcześniej niż strumień z pierwszeństwem przejazdu bądź przejścia. Wynika z tego potrzeba obliczenia, dla par grup kolizyjnych o dopuszczalnym jednoczesnym zezwoleniu na ruch, czasów dojazdu do punktów kolizji i wyznaczenie różnic tych czasów. Wartości te można umieścić w macierzy T_{dk} , która podobnie jak macierz czasów międzyzielonych, będzie wykorzystywana podczas wyznaczania przejść międzyfazowych. Elementy macierzy wyznacza się ze wzoru (4):

$$t_{dk}(i, j) = t_d^{\min}(i, j) - t_d^{\max}(j, i), \quad (4)$$

gdzie:

i, j – grupy sygnałowe kolizyjne o dopuszczalnym jednoczesnym zezwoleniu na ruch,

$t_{dk}(i, j)$ – różnica czasów najkrótszego dojazdu strumienia priorytetowego z grupy i oraz podporządkowanego z grupy j , interpretowana jako maksymalne opóźnienie chwili podania sygnału zezwalającego dla strumienia priorytetowego w stosunku do strumienia podporządkowanego,

$t_d^{\min}(i, j)$ – najkrótszy czas dojazdu strumienia priorytetowego do punktu kolizji ze strumieniem podporządkowanym,

$t_d^{\max}(j, i)$ – najdłuższy czas dojazdu strumienia podporządkowanego do punktu kolizji ze strumieniem priorytetowym; dla strumieni pieszych i rowerzystów należy przyjąć 0.

Jeśli wartości $t_{dk}(i, j)$ oraz $t_{dk}(j, i)$ są jednocześnie ujemne, to należy ponownie wyznaczyć skład faz ruchu na skrzyżowaniu, uznając grupy i oraz j za kolizyjne, gdyż sterowanie z wykorzystaniem analizowanego zestawu faz ruchu jest sterowaniem niedopuszczalnym. Alternatywą jest zmiana geometrii skrzyżowania bądź lokalizacji sygnalizatorów i organizacji ruchu, aby dla każdej pary grup kolizyjnych o jednoczesnym zezwoleniu na ruch strumień z pierwszeństwem przejazdu dojeżdżał do punktu kolizji wcześniej niż strumień podporządkowany. W praktyce projektowania, w takiej sytuacji wyznacza się przejścia międzyfazowe uwzględniające równy start obydwu grup, co w świetle przepisów [2] jest rozwiązaniem niepoprawnym.

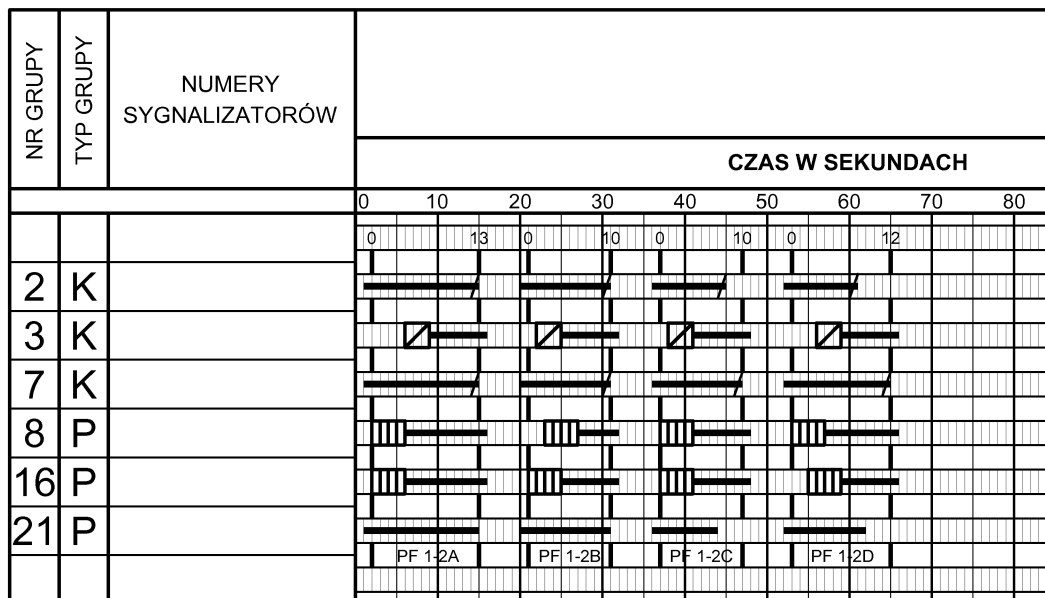
Przejścia międzyfazowe mogą być wyznaczone przy zastosowaniu różnych funkcji celu. Najczęściej stosowanymi kryteriami optymalizacji są:

- maksymalizacja wartości czasów międzyzielonych,
- realizacja równego startu grup sygnałowych,
- minimalizacja długości przejścia międzyfazowego,
- minimalizacja nadwyżek czasu międzyzielonego w stosunku do minimalnego czasu międzyzielonego,
- minimalizacja czasu międzyzielonego pomiędzy grupami miarodajnymi,
- minimalizacja liczby grup sygnałowych o różnych wskazaniach sygnalizatorów.

Na rys. 2 przedstawiono programy przejść międzyfazowych wyznaczonych na podstawie różnych funkcji celu, dla przejścia pomiędzy tymi samymi fazami.

Minor macierzy minimalnych czasów międzyzielonych, wykorzystany do wyznaczenia przejść międzyfazowych ma postać:

$$\mathbf{T}_m^{\min}(\mathbf{1},\mathbf{2}) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 2 & 7 & 21 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 3 \\ 8 \\ 16 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 5 & 9 & 6 \\ 4 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$



Rys. 2. Przykładowe programy przejść międzyfazowych [4]

Fig. 2. Sample interstage programs [4]

W przypadku oznaczonym jako PF 1-2A zastosowano metodę maksymalizacji czasów międzyzielonych. W rozwiązaniu tym czasy międzyzielone pomiędzy wszystkimi grupami są identyczne, równe maksymalnej wartości elementów minora (5). Rozwiązanie takie jest nieefektywne, spotykane jest niezwykle rzadko, np. przez niedoświadczonych projektantów.

W przypadku oznaczonym PF 1-2B zastosowano metodę równego startu grup sygnałowych. Rzeczywiste czasy międzyzielone w przejściu międzyfazowym odpowiadają wartościom maksymalnym z wierszy minora (5). W rozwiązaniu tym, podobnie jak w przypadku poprzednim, nie są analizowane elementy macierzy T_{dk} , choć w zdecydowanej większości przypadków są one spełnione. Metoda ta jest powszechnie stosowana przez projektantów, mimo braku formalnego dowodu na spełnienie wszystkich wymagań formalnych określonych w [2].

Przejście międzyfazowe oznaczone jako PF 1-2C wyznaczono opierając się na kryterium minimalizacji długości przejścia międzyfazowego. Czas trwania przejścia jest identyczny jak w przypadku poprzednim, gdyż nie może być ono skrócone poniżej maksymalnej wartości elementu minora (5), w przypadku grupy pieszej powiększonego o 4 s sygnału zielonego pulsującego. Choć przejście międzyfazowe nie zostało skrócone, to zmniejszeniu uległy czasy międzyzielone pomiędzy poszczególnymi grupami. Rozwiązanie to jest więc bardziej efektywne.

Przejście PF 1-2D zostało wyznaczone na podstawie kryterium minimalizacji czasu międzyzielonego pomiędzy grupami 2 i 3. Grupy te są na analizowanym skrzyżowaniu grupami najbardziej obciążonymi i determinują długość cyklu sygnalizacji oraz czas trwania poszczególnych faz ruchu. W rozwiązaniu tym uzyskano czas międzyzielony $t_m(3,2) = 5$ s, podczas gdy w rozwiązaniach A oraz B wynosił on 9 s, a w rozwiązaniu C 7 s.

Podczas projektowania zachodzi niejednokrotnie konieczność realizacji programu w sterowniku, który ma ograniczoną liczbę modułów grup sygnałowych. W przypadku takim zasadne jest zastosowanie równego startu i zakończenia różnych grup sygnałowych, gdyż pozwala to na sterowanie z jednego modułu wykonawczego kilkoma grupami sygnałowymi. Można zauważyć, że przejściem fazowym 1-2A można sterować sześcioma grupami sygnałowymi wykorzystując jedynie 4 moduły grup sygnałowych w sterowniku. Pominięto przy tym zagadnienie nadzoru sygnałów czerwonych.

W praktyce projektowania, dla zapewnienia efektywności sterowania w stanach zbliżonych do przeciążenia zasadne jest stosowanie przejść wyznaczanych według kryterium minimalizacji czasów międzyzielonych pomiędzy grupami miarodajnymi. Z kolei w sytuacjach niewielkiego obciążenia zastosowanie kryterium minimalizacji długości przejścia międzyfazowego zapewnia większą elastyczność sterowania.

5. OKREŚLANIE WARUNKÓW CZASOWYCH

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

Procedurę wyznaczania warunków czasowych w standardowej metodzie projektowania sygnalizacji poprzedza wyznaczenie bazowego programu sygnalizacji. W większości metod sterowania warunki czasowe wyznacza się na podstawie przepisów [2] oraz bazowego programu sygnalizacji. Dla prostych algorytmów sterowania wyznaczenie warunków czasowych nie stanowi znaczącego problemu. Natomiast w przypadku wielofazowych programów sygnalizacji o złożonej strukturze liczba warunków czasowych może wynosić kilkadziesiąt. Po uwzględnieniu wielu programów sygnalizacji pracujących na skrzyżowaniu w ciągu doby liczba niezbędnych do wyznaczenia warunków może wynosić kilkaset, co powoduje konieczność zastosowania metod pozwalających na uproszczenie wyznaczania warunków oraz zmniejszenia liczby błędów podczas ich wyznaczania.

W zależności do złożoności algorytmu sterowania wyróżnia się następujące warunki czasowe 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, w szczególności uwzględniających priorytet dla wybranych grup uczestników ruchu mogą występować inne rodzaje warunków czasowych. Liczba i rola warunków czasowych w algorytmie zależy wyłącznie od inwencji projektanta oraz biegłości w projektowaniu.

Stosowana przez projektantów procedura wyznaczania warunków czasowych jest procedurą wykorzystującą program sygnalizacji jako nomogram. Poszczególne warunki czasowe są wyznaczane poprzez odmierzanie poszczególnych sygnałów na programie sygnalizacji, z uwzględnieniem:

- różnych punktów traktowanych jako zero podczas obliczeń,
- czasów minimalnych oraz innych warunków formalnych wynikających z przepisów i określonych przed rozpoczęciem wyznaczania warunków,
- wymagań związanych z koordynacją skrzyżowań,
- uwzględnienia wcześniej wyznaczonych warunków czasowych jako składników sumy podczas wyznaczania warunków czasowych.

Klasyczna metoda wyznaczania warunków czasowych wykorzystuje arkusz z programem sygnalizacji, na którym nanosi się następujące wartości:

- początek programu sterowania,
- czas trwania cyklu,
- chwile początku i zakończenia poszczególnych faz ruchu,
- punkt zerowania licznika czasu w algorytmie sterowania,
- minimalne czasy trwania sygnałów dla poszczególnych grup.

Następnie poprzez wykonywanie graficznego dodawania i odejmowania wyznacza się warunki czasowe występujące w danej sekwencji sygnałów. Powyższą analizę należy przeprowadzić dla każdej sekwencji faz, jaka może wystąpić w algorytmie sterowania.

Automatyzacja wyznaczania warunków czasowych jest możliwa pod warunkiem opracowania modelu matematycznego sterowania ruchem. W modelu tym zaplanowano wykorzystanie następujących rozwiązań:

- schemat faz ruchu będzie modelowany za pomocą grafu skierowanego o krotności 1 (digrafu i unigrafu) [5], dla uproszczenia założono możliwość istnienia wyłącznie jednego przejścia pomiędzy poszczególnymi fazami,
- opierając się na ww. grafie stworzona zostanie sieć, w której na poszczególnych tranzycjach jako cechy przedstawione będą macierze rzeczywistych czasów międzyzielonych,
- dla poszczególnych rodzajów warunków czasowych, stworzona zostanie macierz której elementy będą odpowiadać poszczególnym warunkom czasowym.

Dla opracowanej metody planowana jest budowa narzędzia wspomagania komputerowego, które będzie realizować procedurę wyznaczania warunków czasowych.

W ramach procedury przewidywana jest realizacja następujących kroków:

- wyznaczenie wszystkich dróg w grafie, które odpowiadać będą wszystkim możliwym sekwencjom faz,
- określenie warunków czasowych dla danej sekwencji faz,
- wpisanie warunków czasowych do macierzy.

Uzyskane wyniki będą mogły być wykorzystane podczas tworzenia algorytmów sterowania ruchem.

6. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych prac przeanalizowano zarówno proces projektowania adaptacyjnych sygnalizacji świetlnych, jak i wiele projektów sygnalizacji z obszaru całej Polski. Projekty te reprezentują bardzo różne podejście do zagadnienia tworzenia algorytmów sterowania ruchem oraz różny poziom merytoryczny. Jednak można zauważyć, że problemy występujące podczas projektowania są bardzo podobne. Dotyczą one wyznaczania faz ruchu, wyznaczania przejść międzyfazowych oraz określania warunków czasowych, jak również zapisu algorytmów sterowania ruchem.

Konieczne jest opracowanie procedur określających jednoznacznie sposób projektowania adaptacyjnej sygnalizacji świetlnej oraz narzędzi wspomagających projektantów w tym zakresie. W ramach dalszych prac planowane jest opracowanie narzędzi, które pozwolą na automatyzację czynności opisanych w niniejszym artykule.

Bibliografia

1. Szatkowski M.: Sterowanie Ruchem Drogowym – materiały pomocnicze do wykładu, Warszawa 2005.
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 z 2003 r.).
3. Allsop R. E., Tracz M.: Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. WKiŁ, Warszawa 1990.
4. Krukowicz T.: Poprawa efektywności sterowania adaptacyjnego poprzez optymalizację przejść międzyfazowych, [w:] Prace naukowe – Transport, zeszyt 72, Badania elementów i systemów transportowych. OWPW, Warszawa 2010.
5. Korzan B.: Elementy teorii grafów i sieci. Metody i zastosowania. WNT, Warszawa 1978.