

Tomasz Krukowicz
Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Sterowania Ruchem,
Zespół Sterowania Ruchem Drogowym

WYZNACZANIE PROGRAMÓW PRZEJŚĆ MIĘDZYFAZOWYCH PRZY WYKORZYSTANIU RÓŻNYCH FUNKCJI CELU

Streszczenie: Artykuł opisuje zasady tworzenia programów przejść międzyfazowych dla adaptacyjnych algorytmów sterowania ruchem. W artykule scharakteryzowano wymagania formalne, które muszą spełniać programy przejść międzyfazowych. Wymagania te stanowią punkt wyjścia do zapisu formalnego programów oraz określenia ograniczeń nałożonych na funkcję sterowania. Uzasadniono również potrzebę stosowania różnych metod wyznaczania przejść w zależności od rodzaju sterowania i przyjętych zasad sterowania. Opisano następujące metody tworzenia przejść międzyfazowych: maksymalizacja czasów międzyzielonych, realizacja równego startu grup sygnałowych, minimalizacja długości przejścia międzyfazowego oraz metodę opartą na minimalizacji czasów międzyzielonych pomiędzy grupami miarodajnymi. W artykule przedstawiono również ocenę i możliwości zastosowania poszczególnych metod, a także przykłady rozwiązań stosowanych w praktyce projektowania programów sygnalizacji.

Słowa kluczowe: program sygnalizacji, przejście międzyfazowe, sterowanie adaptacyjne, sterowanie akomodacyjne, czas międzyzielony

1. PROGRAMY PRZEJŚĆ MIĘDZYFAZOWYCH W TEORII I PRAKTYCE PROJEKTOWANIA PROGRAMÓW SYGNALIZACJI ŚWIETLNEJ

W obecnych czasach projektowanie sygnalizacji świetlnej, w dużej części, wymaga tworzenia algorytmów sterowania adaptacyjnego, którego najpopularniejszą odmianą jest sterowanie akomodacyjne. W sterowaniu takim stan grup sygnałowych określony funkcją sterowania jest zależny od informacji przekazywanych z detektorów, a decyzje o wartościach funkcji sterowania podejmowane są na bieżąco, na podstawie zaprojektowanego algorytmu. W sterowaniu adaptacyjnym możemy wyróżnić okresy, w których nadawane są wyłącznie sygnały zezwalające lub zabraniające, nazywane fazami oraz okresy, w których następuje zmiana sygnałów nazywane przejściami

międzyfazowymi. Formalną definicję fazy w programie sygnalizacji podano w [9] i jest ona definiowana jako okres, w którym funkcja sterowania przyjmuje wartości takie, że podzbiór grup sygnałowych wyświetlających sygnały zezwalające nie jest podzbiorem żadnego innego zbioru wyświetlającego sygnały zezwalające w innym okresie. Niekiedy fazy nazywane są przedziałami zmiennymi, gdyż ich długość, przy zachowaniu pewnych ograniczeń wynikających z wymagań formalnych oraz charakteru procesu ruchu drogowego, może być zmieniana. Przejściami międzyfazowymi (zwanymi również przedziałami międzyfazowymi, przejściami fazowymi lub przedziałami stałymi) nazywa się okresy w przebiegu funkcji sterowania, które znajdują się pomiędzy kolejnymi fazami. W czasie trwania przejść międzyfazowych powinny zostać zrealizowane zależności czasowe zapewniające bezpieczeństwo ruchu na skrzyżowaniu. Na okres 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)

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 nie są przedmiotem niniejszego artykułu i nie będą dalej omawiane.

1.1. Programy przejść międzyfazowych w przepisach

Polskie akty prawne regulujące opracowywanie projektów sygnalizacji świetlnej to rozporządzenia [7] i [8]. Określają one wymagania narzucane tzw. projektom ruchowym sygnalizacji świetlnej, stanowiącym fragment projektów organizacji ruchu. Według wymagań [8] projekt organizacji ruchu, w przypadku, gdy zawiera sygnalizację świetlną, powinien zawierać program sygnalizacji oraz obliczenia przepustowości. Pewne uszczegółowienie wymagań dla projektów sygnalizacji przedstawiono w [7]. Według przepisów tego rozporządzenia projekt taki powinien zawierać m. in.: schemat podstawowych faz ruchu, minimalne czasy międzyzielone dla strumieni kolizyjnych, wykaz grup kolizyjnych, programy sygnalizacji, algorytm sterowania. Nie jest określona w żaden sposób forma zapisu algorytmu sterowania oraz zasób funkcji, jakie można realizować w takim algorytmie. W odróżnieniu od przepisów niemieckich [6], w polskich przepisach nie jest określony sposób, w jaki należy zapisywać algorytmy sterowania, a co za tym idzie jednoznacznie określać sekwencje sygnałów realizowane przez sterownik. Lukę tę wykorzystuje wielu projektantów, którzy w realizowanych przez siebie projektach umieszczają algorytmy w postaci tabel lub opisów tekstowych, które nie spełniają podstawowego wymagania nakładanego na algorytm, czyli nie określają w sposób jednoznaczny stanu wszystkich sygnalizatorów w każdej sekundzie realizacji programu. Niemieckie wytyczne [6], choć zawierają wiele przykładów zawierających przejścia międzyfazowe, skupiają się głównie na wymaganiach formalnych (bardziej szczegółowych niż przepisy polskie [7]), pozostawiając sposób wyznaczenia programów przejść w gestii projektanta. Z kolei sposób postępowania oparty o wytyczne amerykańskie [5] jest zupełnie inny i nie wykorzystuje pojęcia przejścia międzyfazowego.

1.2. Programy przejść międzyfazowych w algorytmach sterowania

Wiele wątpliwości podczas projektowania sygnalizacji świetlnej wynika z niezdefiniowania pojęcia podstawowej fazy ruchu. Zgodnie z przepisami [7] schemat podstawowych faz ruchu powinien być elementem każdego projektu sygnalizacji świetlnej. Niestety, wiele organów zarządzających ruchem nie wymaga, aby schemat taki zawierał wszystkie możliwe fazy ruchu, jakie mogą wystąpić w algorytmie sterowania. Jeszcze mniej organów zarządzających stawia wymaganie, aby schemat taki zawierał określenie dopuszczalności przejść pomiędzy poszczególnymi fazami ruchu. Zagadnienie doboru faz ruchu, oraz ich sekwencji wykracza poza ramy niniejszego artykułu. Natomiast dla potrzeb wyznaczenia przejść międzyfazowych konieczne jest określenie, które z przejść będą mogły być realizowane. Także niewielka liczba organów zarządzających ruchem nakłada na projektantów obowiązek składania projektów zawierających algorytmy sterowania w postaci schematów blokowych, w których jednym z bloków jest blok realizacji przejścia międzyfazowego. Program przejścia międzyfazowego jest w takim przypadku przedstawiany na diagramie paskowym, jako zapis stanów grup sygnałowych w okresie zmiany fazy ruchu. Taki zapis programów przejść jest oparty na wytycznych niemieckich [6].

2. WYMAGANIA FORMALNE DLA PROGRAMÓW PRZEJŚĆ MIĘDZYFAZOWYCH

Wymagania formalne dla programów sygnalizacji określone są w załączniku nr 3 do [8]. Składa się na nie kilka wymagań dotyczących bezpieczeństwa ruchu. Ze względu na dopuszczalność jednoczesnego zezwolenia na ruch dla grup sygnałowych możemy wyróżnić następujące rodzaje grup sygnałowych w programach przejść międzyfazowych:

1. Pewna grupa sygnałowa kończy sygnał zezwalający i w następnej fazie rozpoczyna inna grupa, o niedopuszczalnym jednoczesnym zezwoleniu na ruch z pierwszą.
2. Pewna grupa rozpoczyna ruch, a w poprzedniej fazie sygnał zezwalający otrzymywała inna grupa konfliktowa.
3. Pewna grupa otrzymuje sygnał zezwalający w fazie przed i po przejściu międzyfazowym.
4. Pewna grupa otrzymuje sygnał zabraniający w fazie przed i po przejściu międzyfazowym.
5. Pewna grupa sygnałowa kończy sygnał zezwalający i w następnej fazie nie rozpoczyna inna grupa kolizyjna – zakończenie wynika z przyjętej strategii sterowania bądź układu faz ruchu.
6. Pewna grupa rozpoczyna ruch, a w poprzedniej fazie sygnału zezwalającego nie otrzymywała inna grupa konfliktowa – rozpoczęcie sygnału wynika z przyjętej strategii sterowania.

W zależności do której grupy zalicza się dana grupa sygnałowa, to sposób wyświetlania sygnałów zezwalających musi być podporządkowany pewnym ograniczeniom. Przypadki opisane w punktach 5 i 6 odrębne zagadnienie i nie będą szczegółowo omawiane, choć

obowiązują w ich zakresie te same zasady formułowania ograniczeń. Przypadki 4 i 5 są przypadkami trywialnymi, z wyjątkiem sytuacji, w której następuje powrót z podfazy do fazy poprzedzającej. Konieczne są w takim przypadku dodatkowe okresy w programie przejścia międzyfazowego, które również nie będą omawiane w dalszej części artykułu.

2.1. Spełnienie wymagań w zakresie minimalnych czasów międzyzielonych

Podstawowym wymaganiem, jakie musi zostać spełnione w programach przejść międzyfazowych jest właściwy dobór czasów międzyzielonych. Zagadnienie obliczania czasów międzyzielonych omówiono w [1], [7] i [11], przy czym w zależności od kraju stosowane powinny być aktualnie obowiązujące przepisy w tym zakresie. Zasadniczym warunkiem, jakie powinno spełniać przejście międzyfazowe jest zależność:

$$t_m(i, j) \geq t_m^{\min}(i, j) \quad (1) [7]$$

mówiąca, że czas upływający od zakończenia sygnału zezwalającego w grupie i do rozpoczęcia sygnału zezwalającego w konfliktowej grupie j (t_m – czas międzyzielony) powinien być większy od obliczonego minimalnego czasu międzyzielonego (t_m^{\min}). Ta zależność jest spełniona we wszystkich znanych metodach wyznaczania czasów międzyzielonych. Dla potrzeb wyznaczania programów sygnalizacji, w tym do wyznaczania programów przejść międzyfazowych, zapisuje się w postaci macierzy, nazywanej macierzą minimalnych czasów międzyzielonych oznaczaną T_m^{\min} . Elementy tej macierzy oznaczane $t_m^{\min}(i, j)$ przyjmują wartości całkowite, nieujemne odpowiadające obliczonym minimalnym czasom międzyzielonym, jakie powinny upłynąć od zakończenia wyświetlania sygnału zezwalającego w grupie i do rozpoczęcia sygnału zezwalającego w grupie j . Dla potrzeb wyznaczania programów przejść międzyfazowych wykorzystuje się minory tej macierzy, które zawierają elementy znajdujące się w wierszach odpowiadających grupom wymienionym w punkcie 1 na poprzedniej stronie i kolumnom odnoszącym się do grup wymienionych w punkcie 2. Wynika to z wymogu spełnienia minimalnych czasów międzyzielonych i dotyczy grup sygnałowych kolizyjnych o niedopuszczalnym jednoczesnym zezwoleniu na ruch.

2.2. Spełnienie wymagań w zakresie dojazdu strumieni do punktu kolizji

Aktualnie obowiązujące przepisy w zakresie projektowania sygnalizacji narzucają ograniczenia dotyczące sterowania strumieniami kolizyjnymi o dopuszczalnym jednoczesnym zezwoleniu na ruch. Do strumieni takich należą m. in. skręt w lewo na sygnalizatorze ogólnym i kierunek na wprost z wlotu przeciwległego jak również skręt w prawo na sygnalizatorze ogólnym i równoległe przejście dla pieszych. Program sterowania powinien zapewnić bezpieczeństwo ruchu strumieni współbieżnych poprzez zagwarantowanie sytuacji, w której strumień z pierwszeństwem przejazdu (bądź przejścia) znajdzie się w punkcie kolizji wcześniej, niż strumień podporządkowany. Wymaganie to ogranicza możliwość swobodnego sterowania dla grup rozpoczynających sygnał zezwalający, tj. wymienionych w punktach 2, 4 i 6. Istniejące prace dotyczące

optymalizacji wyłącznie minorów macierzy czasów międzyzielonych [2], [10] nie pozwalają na zapewnienie spełnienia tej zależności, gdyż zakłada się że wszystkie strumienie ruchu są strumieniami priorytetowymi.

W związku z powyższym zasadne wydaje się rozszerzenie liczby ograniczeń nakładanych na programy przejść międzyfazowych o wymagania dotyczące relacji pomiędzy grupami sygnałowymi w fazie, która rozpoczyna się po zakończeniu przejścia międzyfazowego. Należy więc sformułować następujące wymagania dla programów przejść:

- dla par strumieni kolizyjnych o dopuszczalnym jednoczesnym zezwoleniu na ruch należy obliczyć czasy dojazdu do punktu kolizji; dla strumienia priorytetowego należy obliczyć najdłuższy możliwy czas dojazdu (dojazd ze startu zatrzymanego z niewielkim przyspieszeniem), dla strumienia podporządkowanego najkrótszy możliwy czas dojazdu (dojazd ze startu lotnego z maksymalną dopuszczalną prędkością); program przejścia międzyfazowego powinien spełniać wymagania związane z tymi czasami.
- nie dopuszcza się „dołączania” grup sygnałowych będących grupami priorytetowymi w stosunku do niekończących sygnału zezwalającego grup zawierających strumienie podporządkowane; w przypadku takim konieczne jest zatrzymanie ruchu w grupie sterującej strumieniem podporządkowanym.

Konieczne jest wprowadzenie do zestawu wielkości pozwalających wyznaczać programy przejść międzyfazowych wielkości różnicy czasów dojazdu

$$t_{dk}(i, j) = t_d^{\min}(i, j) - t_d^{\max}(j, i) \quad (2)$$

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

Z wyznaczonych w ten sposób wartości należy utworzyć macierz czasów dojazdu strumieni oznaczoną T_{dk} . Elementy tej macierzy powinny przyjmować wartości całkowite, przy czym mogą być one ujemne.

Jeśli wartości $t_{dk}(i, j)$ oraz $t_{dk}(j, i)$ są jednocześnie ujemne, to należy ponownie wyznaczyć skład faz ruchu na skrzyżowaniu. Nie jest bowiem, przy takim układzie geometrycznym, możliwe spełnienie warunku dotyczącego dojazdu strumieni współbieżnych do punktu kolizji. Sytuacja taka może występować w szczególności na skrzyżowaniach o przesuniętych wlotach. W sytuacji takiej praktyka projektowania polega na zapewnieniu jednoczesnego startu grup kolizyjnych. Rozwiązanie takie, choć jest czytelne dla kierujących, stanowi naruszenie obowiązujących przepisów, w szczególności rozporządzenia [7] i nie powinno być stosowane. Rozwiązanie takie będzie mogło być

stosowane w przypadku usankcjonowania go w aktach prawnych. Jednym z rozwiązań jest w takim przypadku realizacja sterowania zapewniającego rozdzielenie w czasie kolizyjnych strumieni, co zwykle wiąże się z koniecznością zwiększenia liczby faz ruchu i pogorszeniem efektywności sterowania ruchem na skrzyżowaniu. Alternatywę stanowi zmiana geometrii skrzyżowania bądź rozmieszczenia sygnalizatorów i linii zatrzymań, co nie zawsze jest możliwe.

3. METODY TWORZENIA PRZEJŚĆ MIĘDZYFAZOWYCH

Metody tworzenia przejść międzyfazowych określają sposób wyznaczenia macierzy czasów międzyzielonych T_m na podstawie macierzy minimalnych czasów międzyzielonych T_m^{min} . W opinii autora (przedstawionej w rozdziale 2.2.) metody te powinny również uwzględniać wartości macierzy T_{dk} . W zależności od metody mogą one opierać się na pewnym kryterium optymalizacji lub jedynie przedstawiać rozwiązania dopuszczalne. Zagadnienie różnych metod wyznaczania przejść międzyfazowych zostanie przedstawione na przykładzie opracowanym na podstawie [4]. W przykładzie tym wykorzystano 3 grupy kołowe oraz 3 grupy piesze. Grupy 2K, 3K, 7K są grupami kołowymi, a grupy 8P, 16P i 21P to grupy piesze. Grupy 3K, 8K i 16P otrzymują sygnał zezwalający w fazie 1, natomiast grupy 2K, 7K i 21P otrzymują sygnał zezwalający w fazie 2. Grupy otrzymujące sygnał zezwalający w fazie 1 i 2 oraz otrzymujące sygnał zabraniający w obydwu fazach pominięto dla zachowania czytelności przykładu.

Dla tego przykładu przedstawiono minor macierzy czasów międzyzielonych dla przejścia międzyfazowego pomiędzy fazą 1 i 2, który przyjmuje następującą postać:

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

Dla grup 2 i 21, które są grupami kolizyjnymi o dopuszczalnym jednoczesnym zezwoleniu ruch wyznaczono czasy dojazdu dla strumieni z tych grup:

$$t_{dk}(2,21) = 1, \quad t_{dk}(21,2) = +\infty \quad (4)$$

Odpowiadający temu wyrażeniu fragment macierzy T_{dk} przedstawiono poniżej, wstawiono wybrane wartości na podstawie zależności (4).

$$\mathbf{T}_{dk} = \begin{matrix} & 1 & 2 & \dots & 21 & \dots \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \dots \\ 21 \\ \dots \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & 0 & \dots & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \\ \dots & \dots & +\infty & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} & \dots \end{matrix} \quad (5)$$

Wartości te należy interpretować w następujący sposób: podanie sygnału zezwalającego dla grupy 2K może być opóźnione o dowolny czas w stosunku do grupy 21P, natomiast podanie sygnału zezwalającego dla grupy 21P może być opóźnione co najwyżej o sekundę w stosunku do grupy 2K.

3.1. Maksymalizacja wartości czasów międzyzielonych

Metoda ta zapewnia poprawność wyznaczenia czasów międzyzielonych, a co za tym idzie bezpieczeństwo, poprzez przyjęcie w programie maksymalnej wartości minimalnego czasu międzyzielonego w każdym przypadku. Rozwiązanie takie nie zapewnia wysokiej efektywności sterowania, gdyż w większości czasów międzyzielonych występuje znacząca nadwyżka długości. Elementy macierzy rzeczywistych czasów międzyzielonych przyjmują wartości opisane poniższym wzorem:

$$t_m(i, j) = \max_{i, j} t_m^{\min}(i, j) \quad (6)$$

Po wykonaniu obliczeń na podstawie wzoru (6) macierz czasów międzyzielonych dla takiego przypadku przyjmuje postać:

$$\mathbf{T}_m(1,2) = \begin{matrix} & 2 & 7 & 21 \\ \begin{matrix} 3 \\ 8 \\ 16 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 9 & 9 & 9 \\ 9 & 9 & 9 \\ 9 & 9 & 9 \end{bmatrix} & \dots \end{matrix} \quad (7)$$

Odpowiedni programy przejścia międzyfazowego przedstawiono na rysunku 1 i oznaczono jako PF1-2A. Czas trwania tego programu jest stosunkowo długi, a czas tracony w cyklu wysoki ze względu na przyjęcie pomiędzy wszystkimi grupami maksymalnej wartości czasu międzyzielonego. Chwile zakończenia wyświetlania sygnałów zezwalających dla grup kończących są identyczne. Podobnie chwile rozpoczęcia sygnałów zezwalających w fazie następującej po przejściu międzyfazowym. Rozwiązanie takie jest nieefektywne i nie powinno być stosowane w praktyce. Metoda ta jest stosowana wyłącznie przez niedoświadczonych projektantów. Dodatkowo analizą nie zostały objęte czasy dojazdu strumieni. W analizowanym przypadku ograniczenia wynikające z wartości elementów macierzy \mathbf{T}_{dk} są spełnione, choć metoda nie gwarantuje poprawności

uzyskanego rozwiązania dla każdego zestawu danych. Konieczne jest dodatkowe sprawdzenie każdego rozwiązania pod względem zgodności z tym wymaganiem.

3.2. Realizacja równego startu grup sygnałowych

W metodzie tej bezpieczeństwo ruchu zapewnia się poprzez jednoczesne rozpoczęcie wyświetlania sygnałów zezwalających w grupach sygnałowych obsługiwanych w fazie następującej po przejściu międzyfazowym. Dla takiego przykładu możemy wyznaczyć elementy macierzy czasów międzyzielonych ze wzoru:

$$t_m(i, j) = \max_i t_m^{\min}(i, j) \quad (8)$$

Przeprowadzenie obliczeń według wzoru (8) daje nam macierz rzeczywistych czasów międzyzielonych w postaci:

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

Odpowiadające tej macierzy przejście międzyfazowe przedstawiono na rysunku 1 i opisano jako PF 1-2B. W rozwiązaniu takim chwile rozpoczęcia sygnałów zezwalających są identyczne, natomiast chwile zakończenia wynikają z maksymalnej wartości czasu międzyzielonego występującego między grupą kończącą i grupami rozpoczynającymi. Podobnie jak poprzednia metoda, rozwiązanie takie nie analizuje elementów macierzy T_{ak} . Choć w przedstawionym przypadku warunki bezpieczeństwa są zapewnione, to metoda nie daje gwarancji uzyskania poprawnego rozwiązania w ogólności. Metoda ta, jak zaznaczono w rozdziale 2.2. jest powszechnie stosowana przez projektantów, mimo, że uzyskane z jej pomocą rozwiązania mogą być niezgodne z wymaganiami określonymi w [7]. Konieczne jest w związku z tym dodatkowe sprawdzenie każdego rozwiązania pod względem zgodności z tymi wymaganiami.

3.3. Minimalizacja długości przejścia międzyfazowego

Metoda ta polega na iteracyjnym tworzeniu macierzy międzyzielonych. Algorytm tworzenia macierzy zaleca rozpoczęcie tworzenia przejścia międzyfazowego, od najdłuższego czasu międzyzielonego, a następnie wrysowywania kolejnych grup kolizyjnych. Podczas wrysowywania należy uwzględniać ograniczenia opisane w rozdziale 2.1 oraz 2.2. Ze względu na charakter problemu, w czasie opracowywania programu przejścia konieczne jest powracanie do obliczonych wcześniej wartości czasów międzyzielonych i ich zwiększanie w przypadku stwierdzenia naruszenia. Następnie konieczne jest zweryfikowanie warunku bezpieczeństwa ze względu na czas dojazdu.

Podczas kolejnych iteracji niedopuszczalna jest zmiana (zwiększanie) najdłuższego z czasów międzyzielonych.

Przejście międzyfazowe, opracowane z wykorzystaniem procedury iteracyjnej minimalizującej długość przejścia zostało przedstawione na rysunku pierwszym i oznaczone jako PF 1-2C. Przejście to ma identyczną długość, jak przejście PF 1-2B, ale czasy międzyzielone pomiędzy grupami kołowymi (3K-2K) są mniejsze. Należy przy tym zauważyć, że w zależności od sposobu realizacji iteracji można również doprowadzić do skracania czasów międzyzielonych dla grup pieszych kosztem grup kołowych, co może mieć znaczenie w przypadku problemów z zapewnieniem realizacji wymaganych prawem minimów.

Macierz czasów międzyzielonych dla tego przypadku przyjmuje następującą postać:

$$\mathbf{T}_m(\mathbf{1},\mathbf{2}) = \begin{matrix} & 2 & 7 & 21 \\ 3 & \begin{bmatrix} 7 & 9 & 6 \\ 4 & 6 & 4 \\ 4 & 6 & 4 \end{bmatrix} \\ 8 \\ 16 \end{matrix} \quad (10)$$

3.4. Procedury uwzględniające minimaxową funkcję celu

W pracach [1] i [10] przedstawiono procedury realizujące optymalizację czasów międzyzielonych w oparciu o minimaxową funkcję celu. Algorytmy te minimalizują największą nadwyżkę czasu międzyzielonego w stosunku do minimalnego czasu międzyzielonego. Jak zaznaczono w rozdziale 2.2. metody te nie uwzględniają relacji pierwszeństwa pomiędzy grupami sygnałowymi wyświetlającymi sygnały w tej samej fazie. Program komputerowy opracowany w [3] wykonuje obliczenia w oparciu o te algorytmy. W toku obliczeń dla różnych danych wejściowych uzyskiwano wielokrotnie wyniki, w których nie były spełnione warunki wynikające z obliczeń czasów dojazdu dla rozpoczynających grup sygnałowych.

3.5. Procedury minimalizujące czas międzyzielony między grupami miarodajnymi

Procedurę iteracyjną podobną do realizowanej w punkcie 3.3. można realizować zakładając niezmienność czasu międzyzielonego pomiędzy grupami miarodajnymi. W pierwszym kroku należy sprawdzić, czy są spełnione warunki bezpieczeństwa wynikające z dojazdu grup obsługiwanych w fazie rozpoczynanej po przejściu międzyfazowym. Następnie realizuje się procedurę iteracyjną opisaną w punkcie 3.3., ale zakładając niezmienność czasu międzyzielonego pomiędzy grupami miarodajnymi. Zachowanie jak najmniejszego czasu międzyzielonego pomiędzy grupami decydującymi o cyklu sygnalizacji pozwala na jego skrócenie i poprawia efektywność sterowania. W kolejnych krokach należy wyznaczać czasy międzyzielone dla pozostałych grup, przy czym w kolejnych iteracjach nie należy zmieniać ustalonego wcześniej czasu międzyzielonego pomiędzy grupami miarodajnymi.

Podczas opracowywania [4] zastosowano tę metodę wyznaczania programów przejść międzyfazowych. Rozwiązanie to zapewnia najkrótszą wartość czasu międzyzielonego pomiędzy bardzo obciążonymi grupami 3K i 2K. Przejście międzyfazowe uzyskane tą metodą jest dłuższe od najkrótszego, ale zapewnia największą efektywność sterowania w warunkach dużego obciążenia ruchem.

Macierz rzeczywistych czasów międzyzielonych dla takiego programu ma postać:

$$\mathbf{T}_m(1,2) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 2 & 7 & 21 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 3 \\ 8 \\ 16 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 5 & 9 & 6 \\ 4 & 8 & 5 \\ 2 & 6 & 3 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$



Rys. 1. Wyznaczone programy przejść międzyfazowych. Oznaczenia sygnałów według [7]

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono różne sposoby wyznaczania programów przejść międzyfazowych. Przedstawiono zalety i wady metod oraz dopuszczalność uzyskiwanych w efekcie ich zastosowania rozwiązań. W oparciu o te informacje można sformułować opinię dotyczącą zaleceń do stosowania różnych metod wyznaczania przejść dla różnych przypadków projektów sterowania ruchem.

W przypadku przeciążonych skrzyżowań izolowanych należy stosować metodę minimalizacji czasu międzyzielonego pomiędzy grupami miarodajnymi, gdyż pozwala ona na zwiększenie przepustowości skrzyżowania. W stosunku do innych metod jest to wydłużenie sygnału zezwalającego o 2-4 sekund, co w przypadku wlotu trzypasowego może skutkować zwiększeniem przepustowości danej relacji o kilkadziesiąt pojazdów.

Wyjątkiem mogą być sytuacje, w których problemem jest zapewnienie właściwego czasu przejścia dla pieszych – w takim przypadku może zachodzić konieczność minimalizacji czasu międzyzielonego dla grup pieszych.

W sterowaniu akomodacyjnym należy dążyć do stosowania jak najkrótszych przejść międzyfazowych, aby zapewnić jak największą elastyczność sterowania ruchem. Możliwe jest również stosowanie dłuższego przejścia międzyfazowego w przypadku dużego obciążenia skrzyżowania ruchem, a stosowanie innego, krótszego przejścia w okresie, w którym ruch jest mniejszy. Zapewnia to szybsze przywołanie fazy, w której nastąpiło zgłoszenie w przypadku zaistnienia rezerw przepustowości na skrzyżowaniu.

Powyższy artykuł nie wyczerpuje zagadnienia wyznaczania przejść międzyfazowych. W dalszych badaniach planowane jest zautomatyzowanie procesu ich wyznaczania w oparciu o procedury iteracyjne oraz zwiększenie elastyczności i efektywności sterowania poprzez podział przejść międzyfazowych na krótsze fragmenty i analizę warunków logicznych pomiędzy tymi fragmentami. Rozwiązanie takie ma szczególne znaczenie w przypadku sterowań adaptacyjnych realizujących dla wybranych grup uczestników ruchu elementy funkcji priorytetowych.

Bibliografia

1. Allsop R. E., Tracz M., Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. WKiŁ, Warszawa, 1990
2. Borczon S., Optymalizacja podmacierzy czasów międzyzielonych (praca dyplomowa magisterska), WT PW, Warszawa, 1987
3. Kizikukiewicz B., Opracowanie pakietu programów do komputerowego wspomaganie projektowania programów sygnalizacji dla skrzyżowań (praca dyplomowa magisterska), WT PW, Warszawa, 2002
4. Krukowicz T., Projekt ruchowy sygnalizacji świetlnej akomodacyjnej na skrzyżowaniu drogi wojewódzkiej nr 801 z drogą powiatową nr 2770W w km 18+808, Warszawa, 2009
5. Manual on Uniform Traffic Control Devices – Edition 2003, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington, 2003
6. Richtlinien für Lichtsignalanlagen RiLSA – Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr, Ausgabe 1992, Köln, 1992
7. 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. z późn. zm.
8. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie szczegółowych warunków zarządzania ruchem na drogach oraz wykonywania nadzoru nad tym zarządzaniem, Dz. U. 177 poz. 1729 z 2003 r.
9. Szatkowski M., Materiały pomocnicze do wykładu z przedmiotu „Sterowanie Ruchem Drogowym” (praca niepublikowana), Warszawa, 2004
10. Szatkowski M., Metoda automatycznego projektowania programów sygnalizacji dla ulicznych skrzyżowań izolowanych (rozprawa doktorska), WT PW, Warszawa, 1982.
11. Szczuraszek T., Bezpieczeństwo ruchu miejskiego, WKiŁ, Warszawa, 2006

DETERMINATION OF INTERSTAGE PROGRAMS USING DIFFERENT OBJECTIVE FUNCTIONS

Abstract: The paper describes principles for interstage programs creation used for adaptive traffic control algorithms. Formal requirements for interstage programs have been described. The requirements form an input for program notation as well as for determination of control function limitation. The need for use of different methods for determination of interstage depending on control kind and assumed control rules has been justified. Following methods for interstage creation have been discussed: maximization of intergreen times, simultaneous start of signal groups, minimization of interstage duration and minimization of intergreen times

between reliable groups. The assessment of individual methods is also provided as well as possibilities for their application and then some examples of practical use of traffic light program designing.

Keywords: traffic light program, interstage, adaptive control, accommodative control, intergreen time