

STEROWANIE POJEMNOŚCIOWE W SIECI DROGOWEJ

Streszczenie

W artykule zaproponowano modyfikację popularnej formuły Webstera obliczania długości efektywnego sygnału zielonego na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. W metodach bazujących na przydziale udziału w długości cyklu w stosunku do natężeń nasycenia nie uwzględnia się podaży infrastruktury sieci drogowej. W ten sposób sterowanie w sieci drogowej odbywa się głównie w warstwie struktury ruchu z niedostatecznym uwzględnieniem właściwości podaży sieci drogowej. Teoretyczna podaż w sieci drogowej jak pokazano na przykładzie miasta Katowice jest ograniczona do minimum. Przedstawione w artykule pojęcie pojemności komunikacyjnej jest rozszerzeniem powszechnie stosowanego terminu gęstości strumienia ruchu. Pojemność jest odpowiednikiem gęstości dla ustalonej średniej prędkości komunikacyjnej strumienia ruchu i jego struktury rodzajowej na znanej długości odcinka sieci drogowej. W proponowanej koncepcji wykorzystano fakt mniejszej zmienności wartości pojemności komunikacyjnej w stosunku do natężenia ruchu w gęstych sieciach transportowych (na odcinkach o małej długości, rzędu kilkudziesięciu i kilkuset metrów).

Taka metoda pozwala uwzględnić specyfikę podaży każdej sieci drogowej niezależnie od obserwowanej zmienności w ich strukturach ruchu.

WSTĘP

Typowe systemy sterowania sygnalizacją świetlną optymalizują ruch drogowy głównie pod kątem zmierzonych wartości natężenia ruchu drogowego na wlotach skrzyżowania. W takiej metodzie sterowania następuje pomiar natężenia strumienia ruchu w przekroju sieci drogowej, przed sygnalizatorem. Na podstawie zmierzonych wartości natężenia ruchu na poszczególnych wlotach skrzyżowania następuje przydział czasu zielonego dla każdego z kolizyjnych strumieni ruchu drogowego w poszczególnych fazach. Obiektem sterowania są w tym przypadku strumienie ruchu drogowego (kołowe i piesze). Natomiast celem sterowania jest grupowanie pojazdów i pieszych. W ogólnym zarysie, algorytm sterowania sygnalizacją świetlną przydziela długości sygnałów zielonych, proporcjonalnie do odpowiednich wartości zmierzonego natężenia ruchu (długości kolejek). Jeśli natężenie ruchu jest stałe w okresie doby – przydzielane są stałe długości trwania sygnału zielonego (sygnalizacja stałoczasowa). Sygnały mogą być zmienne w reprezentatywnym zakresie dla odpowiednich okresów doby gdzie wolumen ruchu się zmienia w sposób istotny (syg. wieloprogramowa). W zależności od dynamiki zmian wartości natężenia ruchu w poszczególnych strumieniach ruchu na skrzyżowaniu – sygnały też mogą ulegać dynamicznej zmianie w okresie doby (sygnalizacja zmiennoczasowa). Zmianie ulegają długości cykli i sygnałów. W przypadku, kiedy program sygnalizacji płynnie dostosowuje wskazania na sygnalizatorach do warunków ruchu mówi się o sygnalizacji adaptacyjnej [2,3,4]. Przykładem sygnalizacji w pełni zależnej od parametrów ruchu jest sygnalizacja acykliczna [2].

Warto zauważyć, że w takim podejściu, adaptacja sygnalizacji świetlnej następuje do warunków ruchu, które nie są jedynym wyznacznikiem stanu sieci drogowej. Sygnalizacja porządkuje i rozkłada istniejące w sieci potoki ruchu na elementy liniowe infrastruktury. Wynika stąd prosty wniosek, że również one powinny być wyznacznikiem czasów trwania sygnałów, a tymczasem praktycznie każda sygnalizacja świetlna dostosowuje się tylko do warunków ruchu. Część systemów sterowania bazuje nie tylko na określaniu natężenia ruchu drogowego, ale również na zajętości jego liniowych elementów infrastruktury. Systemy sterowania obszarowego bazują na

wskazaniach detektorów ruchu umieszczanych nie tylko przed czołem sygnalizatora, ale również w innych miejscach sieci (upstream, downstream). Co można uznać za formę kontrolowania wartości parametrów odcinków sieci. Tym niemniej detektory te nie obejmują, w większości istniejących systemów sterowania swoim zasięgiem całej infrastruktury liniowej sieci drogowej. Takie rozwiązanie organizacyjno-techniczne nie wchodzi w rachubę w obecnej dobie z uwagi na względy ekonomiczne i techniczne. Czasem w zakresie systemów sterowania obszarowego występują rozwiązania specyficzne gdzie wartości natężenia ruchu są prognozowane, a ruch optymalizowany jest praktycznie dla całej sieci[5].

Jednym z podstawowych celów sterowania ruchem drogowym jest jego porządkowanie-przy czym ruch drogowy w odróżnieniu od kolejowego, (który jest regulowany) jest ruchem samoorganizującym się. Dopiero wprowadzenie na sieci drogowej obiektów sterowania powoduje częściową regulację tego ruchu. Jest ona częściowa z uwagi na dyspersję strumienia ruchu, który to proces postępuje stopniowo bezpośrednio po minięciu przez pojazdy miejsca posadowienia sygnalizatora, który steruje ich ruchem. Ten proces i procesy: włączenia się pojazdów do ruchu w sieci drogowej, oddziaływania pojazdów na siebie na skrzyżowaniach i w strumieniach ruchu powodują wprowadzenie deregulacji w strumieniach ruchu drogowego. W związku z tym strumień ruchu za sygnalizatorem nie jest na ogół kontrolowany w żaden sposób. Podsumowując, w obecnie stosowanych systemach sterowania, strumień ruchu przed i za sygnalizatorem nie jest całkowicie kontrolowany, a kontrola nastawiona jest na dostosowanie sygnalizacji do parametrów ruchu (a więc głównie podaży w sieci drogowej).

W tym artykule przedstawiono inne podejście, które wraz z oraz w miejsce modelu sterowania ruchem (natężeniami strumieni ruchu drogowego) proponuje rozszerzenie tego procesu o sterowanie tzw. pojemnością sieci drogowej (sterowanie pojemnościowe). W odróżnieniu od parametrów strumienia ruchu drogowego (natężenia ruchu, gęstość ruchu, długości kolejek) pojemność sieci drogowej jest w przybliżeniu stała dla krótkich odcinków drogi, określonych średnich prędkości strumienia ruchu i może być zmierzona (zdefiniowana). W miejsce sterowania natężeniami ruchu drogowego, w takim podejściu proponuje się, sterowanie pojemnością sieci drogowej (odcinka sieci).

1. POJEMNOŚĆ ELEMENTÓW SIECI DROGOWEJ

Pojęcie pojemności odcinka drogi, może być kontrowersyjne, jakkolwiek bazuje bezpośrednio na definicji gęstości strumienia ruchu [1,2]. Gęstość strumienia ruchu k jest wyrażana liczbą pojazdów zaobserwowanych na odcinku drogi o określonej długości w danej chwili czasu (lub bardzo krótkim interwale, interwał zależy głównie od metody badania procesu ruchu):

$$k = \frac{n}{L} = \frac{ndt}{Ldt} \quad (1)$$

gdzie:

- n - liczba pojazdów [-],
- L -długość odcinka drogi [metry] [1]

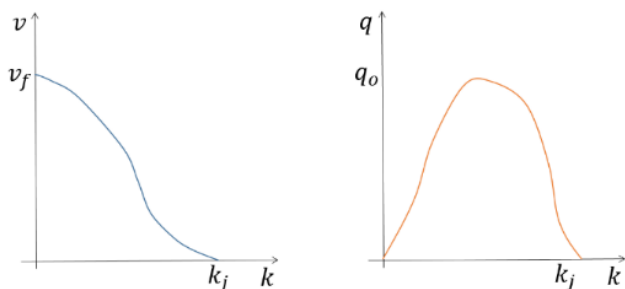
Gęstość strumienia ruchu zmienia się dynamicznie wraz z ze zmianami jego prędkości i natężenia ruchu [1]. W zależności od wartości prędkości strumienia ruchu v i jego intensywności q (krótkookresowe zmiany natężenia ruchu) odcinek drogi charakteryzuje się określoną pojemnością C [poj./L]. Terminu tego nie należy mylić z podobnie oznaczaną przepustowością (choć symbol nawiązuje wprost do terminu anglosaskiego: pojemności). Wartość pojemność dla odcinka drogi jest zmienna w zależności od warunków ruchu, ale zmienność ta jest znacznie mniejsza niż innych charakterystyk obserwowalnych w sieci drogowej dla krótkich odcinków ulic. Na wartość tej charakterystyki wpływ ma również struktura rodzajowa ruchu:

$$C = f(v, q, L, tfs, \dots) \quad (2)$$

gdzie:

- tfs - struktura rodzajowa ruchu.

W literaturze określono związki pomiędzy prędkością, intensywnością i gęstością. Rysunek 1 prezentuje związki ruchu pomiędzy tymi charakterystykami [1,2,6].



Rys. 1. Relacje pomiędzy podstawowymi charakterystykami strumienia ruchu.

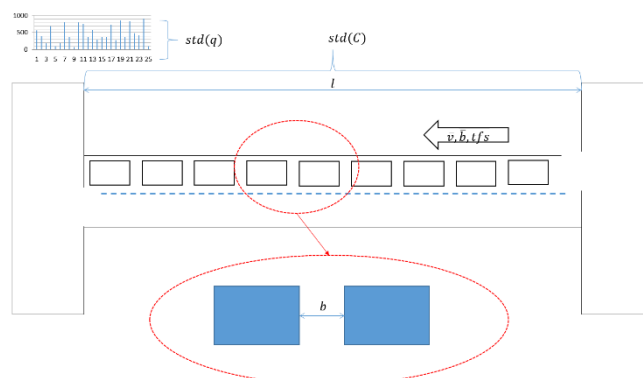
Gęstość ruchu jest najmniejsza dla prędkości ruchu zbliżonych do prędkości ruchu swobodnego v_f (ang. free flow speed) i osiąga maksimum w warunkach zatoru drogowego k_j (ang. jam), zmienia się nieliniowo. W zatorze prędkości spadają do zera lub są małe rzędu kilku kilometrów na godzinę. Można oczekiwać, że również pojemność odcinka drogi C jest największa dla najmniejszych obserwowanych prędkości ruchu (odcinek mieści najwięcej pojazdów) i spada (podobnie jak gęstość) wraz ze wzrostem tejże (konieczność zachowania bezpiecznych odstępów). Podobnie dla małych intensywności ruchu gęstość jest niewielka, potem rośnie wraz ze wzrostem intensywności. Po osiągnięciu optymalnej intensywności

ruchu q_0 spada by osiągnąć maksimum dla zmniejszenia intensywności do zera.

W odróżnieniu od innych stochastycznych parametrów sieci drogowej, jakim z pewnością jest natężenie ruchu, pojemność sieci drogowej dla krótkich kilkudziesięciometrowych odcinków jest zbliżona do wartości stałej dla ustalonych prędkości i danej struktury rodzajowej ruchu. Intuicyjnie można przyjąć, że jeśli sieć drogową opisać się wektorem zmiennych losowych to w takim ciągu danych występuje heteroskedastyczność. Ponadto wariancja natężenia ruchu będzie większa aniżeli analogiczna wariancja pojemności odcinka drogi. Zmienność pojemności na danym odcinku sieci będzie mniejsza aniżeli zmienność natężenia ruchu. Im krótszy będzie analizowany odcinek drogi tym ta prawidłowość będzie mocniejsza. Pojemność odcinka sieci drogowej jest odpowiednikiem gęstości dla ustalonych: średniej prędkości, struktury rodzajowej, ale również natężenia ruchu, warunków pogodowych, zachowań kierujących pojazdami i innych. Jako średnią prędkość można przyjąć prędkość komunikacyjną w danym obszarze sieci drogowej.

Dla znanej prędkości strumienia ruchu i jego struktury rodzajowej można sparametryzować całą sieć drogową w zakresie charakterystyki jej pojemności. Parametryzować można każdy międzywęzłowy odcinek ulicy lub drogi w sieci drogowej. W ten sposób można zdefiniować globalną pojemność sieci drogowej. Tworzy się w ten sposób dla danej sieci drogowej wielowymiarowe tablice indeksowane prędkością i strukturą rodzajową (ew. innymi istotnymi parametrami).

Warto zauważyć, że w przypadku wielu miast liczba zarejestrowanych pojazdów przekracza dostępną długość dróg i ulic znajdujących się w administracji organów zarządzających drogami na ich terenie. Dla przykładu w administracji MZUiM w Katowicach znajduje się ok. 550 km dróg [7]. Dalszych kilkanaście kilometrów znajduje się w zarządzie prywatnego inwestora. W Katowicach zarejestrowano ponad 220 tys. pojazdów [8]. Szacując zgrubnie i optymistycznie, że 20% z tych ulic jest dwupasowa, daje to około 440 km dróg jednopasowych i 110 km dwupasowych (lub więcej, co pominięto w tym szacunku). Łącznie do dyspozycji jest, więc ok. 660 km ulic. Dla uproszczenia przyjmując, że wszystkie zarejestrowane pojazdy są typu SOD i ustalając dla nich długość rzędu 6 metrów (z minimalnym buforem) wychodzi, że na statystyczny oficjalnie zarejestrowany pojazd Katowice posiadają odcinek 0,5 metra drogi. W tym zgrubnym szacunku chodzi o pokazanie skali problemu. Wystarczy dodać, że na ruch lokalny nakłada się ruch i tranzytowy. Ten ostatni zresztą sporych rozmiarów i w efekcie dla wielu z pojazdów popyt na dostęp do infrastruktury drogowej nie jest bilansowany podażą nawet w zakresie prędkości rozwijanych w zatorach ruchu. Ruch w sieci drogowej jest możliwy tylko, dlatego, że większość pojazdów w danej chwili czasu pozostaje w spoczynku.



Rys. 2. Model pojemności odcinka sieci drogowej.

Na rysunku 2 przedstawiono uproszczony model odcinka sieci drogowej. Odcinek charakteryzuje się stałą długością L , pojazdy zajmujące poszczególne pozycje w strumieniu ruchu na takim odcinku poruszają się ze średnią prędkością \bar{v} . Pomiędzy pojazdami, dla danej średniej prędkości można przyjąć średni bufor, wynikający z konieczności zachowania bezpiecznego odstępu między nimi \bar{b} . Struktura rodzajowa ruchu obserwowana na takim odcinku tf_s rzutuje na średnią długość odcinka drogi zajmowaną przez statystyczny pojazd \bar{l}_p . Przy tak określonych parametrach dla modelu odcinka sieci drogowej można obliczyć jego pojemność C .

Zakładając, że odcinek stanowi jeden pas ruchu (tak jak na rysunku 1) natężenie obserwowane w jego przekrojach może się teoretycznie zmieniać od 0 do ok. 2000 pojazdów na godzinę. W dobie oznacza to możliwość zmierzenia na tym odcinku odchylenia standardowego, liczonego pomiędzy skrajnymi wartościami dla natężenia ruchu na poziomie ca. 1400 [-]. Struktura rodzajowa, określona, jako podział pomiędzy pojazdami ciężkimi i lekkimi może się zmieniać o około 10%. W praktyce, poza rzadkimi przypadkami (drogi tranzytowe, tereny przemysłowe, specjalne strefy ekonomiczne), nie obserwuje się udziału pojazdów ciężkich powyżej 10%. Przyjmując średnią długość pojazdu lekkiego na 6 metrów (z buforem wynoszącym 1 metr) oraz pojazdu ciężkiego na 11 metrów można szacunkowo obliczyć pojemność komunikacyjną odcinka sieci dla prędkości zbliżonych do zera. Na odcinku L równym 1000 metrów przy strukturze rodzajowej 99:1, pojemność komunikacyjna wyniesie około $C = 165$ pojazdów. Przy strukturze rodzajowej 90:10, odpowiednia pojemność ta spadnie do około $C = 159$ pojazdów. Oznacza to odchylenie standardowe pomiędzy skrajnymi wartościami wynoszące ok. 4,24 (w odróżnieniu od natężenia ruchu pojemność nigdy nie jest zerowa dla rzeczywistych odcinków sieci). Stąd wniosek, że pojemność komunikacyjna charakteryzuje się teoretycznie mniejszą zmiennością aniżeli natężenie ruchu. Dla odcinków krótkich (kilkudziesięciometrowych) jest zbliżona do stałej. Dla większych średnich prędkości na modelowym odcinku wzrasta średnia wartość bufora między pojazdami (konieczność zwiększenia i zachowania bezpiecznego odstępu). Załóżmy, że przy prędkości 30 km/h średni bufor pomiędzy pojazdami wyniesie 5 metrów. W tym przypadku dla struktury rodzajowej 99:1, pojemność odcinka wyniesie około $C = 100$ pojazdów. Dla struktury 90:10, wartość ta wyniesie $C = 97$. Odpowiednio przyjmując bufor dla prędkości 50 km/h na poziomie 10 metrów otrzymujemy wartości $C = 67$ i odpowiednio $C = 65$. W obliczeniach podano wartości szacunkowe i średnie przy założeniu wykorzystania pojemności na danym odcinku w 100%. Jak ma się zatem pojemność komunikacyjna przy wykorzystaniu 1% pojemności (analogia do porównania wartości natężeń 0 i 2000 poj.h). W tym przypadku na odcinku będzie się poruszał średnio tylko jeden pojazd (ekstremalne prędkości jazdy- niedopuszczalne prawem o ruchu drogowym). Odchylenie standardowe liczone pomiędzy skrajnymi wartościami wyniesie ok. 115 [-]. Jak więc widać z powyższego przykładu, średnio licząc, odchylenie standardowe pojemności komunikacyjnej w najgorszym przypadku powinno być o rząd wielkości mniejsze od natężenia ruchu. Dla wzrostu długości odcinka sieci drogowej należy oczekiwać wzrostu wariacji jego pojemności.

Współczesne sieci drogowe, zwłaszcza na dużych fragmentach obszarów aglomeracji charakteryzują się wysoką gęstością. W podstawowym sensie dotyczy to wskaźników uwzględniających długość dróg i ulic odniesioną do pola powierzchni obszaru zajmowanego przez sieć drogową. W takich sieciach odcinki międzywęzłowe charakteryzują się stosunkowo małymi długościami rzędu dziesiątek i setek metrów (rzadko tysięcy metrów). Dla tego typu odcinków wariacja pojemności komunikacyjnej jest mała. Można, zatem dla każdej sieci drogowej skatalogować zbiór jej odcinków

międzywęzłowych $ZL = \{z l_i\}$ w zakresie średnich pojemności komunikacyjnych dla średnich wartości: prędkości komunikacyjnej, długości odcinka, struktury rodzajowej:

$$z l_i = C_i = \{c_i\} = f(\bar{v}, L, tf_s) \quad (3)$$

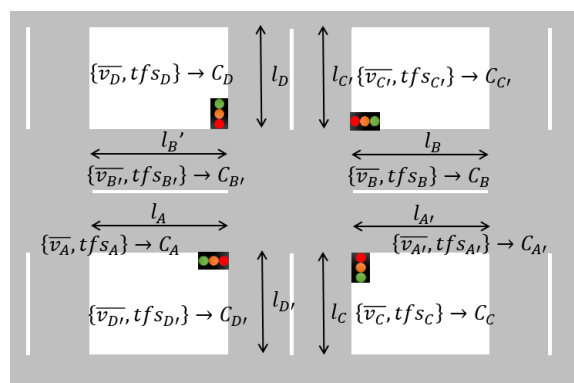
Warto zauważyć, że pomiar prędkości na odcinku drogi jest znacznie prostszy technicznie niż pomiar natężenia ruchu. Już dwa, trzy pojazdy są w stanie określić przybliżone prędkości panujące na danym odcinku. Przykładem są serwisy informacyjne wykorzystujące technologię GPS i nawigacje samochodowe zainstalowane w pojazdach poruszających się w sieci drogowej. Im więcej pojazdów zostaje użytych do aproksymacji prędkości- tym bardziej wiarygodna jest ta wartość. Długości każdego i -tego odcinka drogi L_i są znane dla podmiotów zarządzających siecią drogową. Typowe wartości struktury rodzajowej w niewielkim stopniu zmieniają wartość pojemności komunikacyjnej na odcinku drogi. Zatem można szacować pojemność komunikacyjną w poszczególnych okresach doby głównie na podstawie obserwowanych w popularnych serwisach danych o odcinkowych prędkościach ruchu [9].

2. STEROWANIE POJEMNOŚCIOWE

Zdaniem autora pojemność komunikacyjna odcinka drogi może być wykorzystana, co najmniej, jako wartość uzupełniająca do danych dla algorytmów sterowania sygnalizacją świetlną, posiadając następujące właściwości:

- jest łatwa do obliczenia i skatalogowania,
- ma mniejszą wariację niż inne wykorzystywane w tym celu wartości (pomijając kolejki),
- występuje „offline” (w sieci nieobciążonej ruchem, co jest niezwykle istotne),
- powiązana jest nie tylko ze strukturą ruchu, ale również, a może przede wszystkim z parametrami infrastruktury sieci drogowej.

W takim ujęciu sterowanie ruchem w sieci drogowej ma charakter nie tylko popytowy, ale również podażyowy. W przypadku pojedynczego skrzyżowania dostępny zbiór informacji dla sterowania pojemnościowego przedstawiony został na rysunku 3.



Rys. 3. Sterowanie pojemnościowe- zbiór informacji.

Dla celów sterowania ruchem na każdym wlocie i wylocie skrzyżowania prezentowanego na rysunku 3 dostępne są informacje na temat pojemności komunikacyjnej drogi za i przed każdym sygnalizatorem w postaci zbioru wartości $\{C_A, C_{A'}, C_B, C_{B'}, C_C, C_C', C_D, C_{D'}\}$ ('prim' oznacza w tym przypadku wylot). W systemach klasycznych sterowania sygnalizacją świetlną następuje sterowanie popytem. Na wlotach skrzyżowania zgłaszają się strumienie ruchu o określonej wartości natężenia ruchu (lub długości kolejki). Jest to popyt na dostęp do obszaru konfliktu na

skrzyżowaniu i dalszych elementów sieci drogowej (za skrzyżowaniem). Przydział długości efektywnego sygnału zielonego następuje np. na podstawie formuły Webstera:

$$T = \frac{1.5L_T + 5}{1 - Y} \longrightarrow g_i = \frac{y_i}{Y} (T - \sum_j t_{mj} - 1) \quad (4)$$

gdzie:

T - długość cyklu sygnalizacji [sekundy],

L_T - czas tracony w cyklu,

Y - suma stopni nasycenia[-]

g_i - efektywny sygnał zielony w i -tej fazie

t_{mj} - czas międzyszielony [sekundy]

W pierwszym kroku wyznaczania długości sygnałów obliczana jest długość cyklu T na podstawie długości czasu traconego w cyklu L_T i sumy stopni nasycenia w poszczególnych fazach ruchu. Efektywny sygnał zielony w i -tej fazie g_i wyznaczany jest proporcjonalnie do udziału stopnia nasycenia i -tej fazy do sumy stopni we wszystkich fazach. Formuła Webstera nie uwzględnia w żaden sposób stopnia wykorzystania infrastruktury liniowej za sygnalizatorami (w pewnym sensie również przed tym sygnalizatorem, bo takim estymatorem nie jest natężenie ruchu wyznaczone w jednym przekroju). W tej metodzie przydział sygnałów zielonych jest proporcjonalny do stosunków struktury popytowej na wlotach skrzyżowania. Modyfikacja formuły (4) powinna uwzględnić nie tylko popyt, ale również parametry podaży w zakresie infrastruktury liniowej przed jak i za sygnalizatorem z uwzględnieniem wzajemnych kombinacji relacji występujących na skrzyżowaniu. Można w proponowanym podejściu uwzględnić również więcej niż obszar jednego skrzyżowania. W pierwszym kroku modyfikacji formuły Webstera można uwzględnić w formule (4) proporcje pojemności komunikacyjnej przed sygnalizatorami na wlocie skrzyżowania $C_A: C_B: C_C: C_D$, (C_i) -pojemność i -tego wlotu, wtedy:

$$\sum_1^m C_i = C_{sk} \rightarrow z_i = \frac{C_i}{C_{sk}} \rightarrow g_i = \frac{y_i}{Y} (T - \sum_j t_{mj} - 1)w_1 + z_i / Z(T - \sum_j t_{mj} - 1)w_2 \quad (5)$$

gdzie:

w_1 - waga popytu na dostęp do przestrzeni sieci drogowej [-] <0-1>,

w_2 - waga podaży na przestrzeń przed sygnalizatorem świetlnym [-] <0-1>.

z_i - udział pojemności komunikacyjnej i -tego wlotu w całkowitej pojemności wlotów na skrzyżowanie [-], do obliczeń brany jest maksymalny w danej fazie.

Z - suma pojemności wlotów.

Równanie (5) umożliwia obliczanie długości sygnałów zielonych zarówno przy znajomości natężeń ruchu na wlotach skrzyżowania jak również bez posiadania tej wiedzy. W drugim przypadku przydział sygnałów następuje w oparciu wyłącznie o podaż oferowaną przez dane skrzyżowanie. Jest to znaczne uproszczenie tym niemniej pozwala sterować skrzyżowaniem bez znajomości natężeń.

Konsekwentnie uwzględnienie podaży przestrzeni sieci transportowej na wlotach skrzyżowania uwzględnia zależność:

$$g_i = \frac{y_i}{Y} (T - \sum_j t_{mj} - 1)w_1 + z_i / Z(T - \sum_j t_{mj} - 1)w_2 + z'_i / Z'(T - \sum_j t_{mj} - 1)w_3 \quad (6)$$

gdzie:

z_i - udział pojemności komunikacyjnej i -tego wlotu w całkowitej pojemności wlotów na skrzyżowaniu C [-]

w_3 - waga podaży na przestrzeń sieci drogowej znajdującą się za sygnalizatorem świetlnym [-] (0-1).

Szacowanie podaży na sieć transportową może odbywać się zgodnie z kierunkiem ruchu potoku, tzn. w pojemności komunikacyjnej za skrzyżowaniem uwzględniona zostaje suma pojemności na kolejnym skrzyżowaniu drogowym.

$$\sum_1^m C_i = C_{sk} \rightarrow z_i = \frac{C_i + C_{sk}^j}{C_{sk}^m} \quad (7)$$

gdzie:

C_{sk}^m - pojemność komunikacyjna rozpatrywanego skrzyżowania i wszystkich skrzyżowań przyległych,

C_{sk}^i - pojemność komunikacyjna skrzyżowania przyległego znajdującego się za i -tym wlotem skrzyżowania analizowanego.

Uwzględniając fakt, że za sygnalizatorem świetlnym każdy wlot obciążony jest kombinacją natężeń zależną od relacji występujących na poszczególnych wlotach skrzyżowania obliczanego, można zapisać:

$$g_i = \frac{y_i}{Y} (T - \sum_j t_{mj} - 1)w_1 + z_i / Z(T - \sum_j t_{mj} - 1)w_2 + \varphi(z'_i / Z')(T - \sum_j t_{mj} - 1)w_3 \quad (8)$$

gdzie:

φ - współczynnik przeliczeniowy uwzględniający udział w ruchu na wlocie danej relacji sprzed sygnalizatora:

$$\varphi_d = \frac{\sum q_{rd}}{\sum q_{d-1} + \sum q_d + \sum q_{d+1} + \dots} \quad (9)$$

gdzie:

φ_d - współczynnik przeliczeniowy na danym wlocie [-], d - numer wlotu [-],

$\sum q_{rd}$ - suma natężenia ruchu dla relacji na danym wlocie d

na e -pasach ruchu,

$\sum q_{d-1}$ - suma natężeń z innego wlotu na skrzyżowaniu realizujących ten sam popyt.

Formuła (6) przy nie znajomości natężeń ruchu na wlotach skrzyżowania może być zmodyfikowana do postaci:

$$\sum_1^m C_i = C_{sk} \rightarrow z_i = \frac{C_i}{C_{sk}} \rightarrow g_i = z_i / Z(T - \sum_j f_{mj} - 1)w_3 + z'_i / Z'(T - \sum_j f_{mj} - 1)w_4 \quad (10)$$

gdzie:

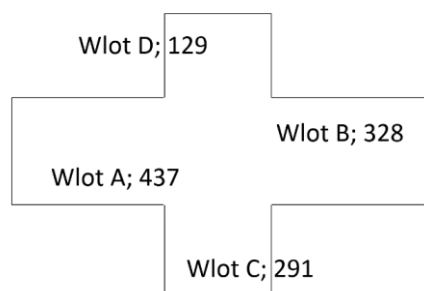
w_3 - waga proporcji pojemności komunikacyjnej wlotu [-],

w_4 - waga proporcji pojemności komunikacyjnej wylotu [-].

Długość cyklu sygnalizacji świetlnej w równaniach (5)-(10) przy braku wiedzy na temat występujących na wlotach natężeń ruchu może być ustalana wzorcowo na podstawie obserwowanych natężeń na skrzyżowaniach o analogicznej strukturze ruchu i długości wlotów. Takie procedury wymagają dalszych badań.

3. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

W celu sprawdzenia postulowanych zmian w procedurach obliczania sygnałów zielonych zademonstrowano poniższy przykład. Na skrzyżowaniu 4 wlotowym zarejestrowano natężenia ruchu odpowiednio 437 (wlot A), 328 (wlot B), 291 (wlot C) i 129 (wlot D). Oznaczenie wlotów przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Sterowanie pojemnościowe- przykład

W analizowanym przykładzie przyjęto na każdym wlocie po jednym strumieniu ruchu na wprost. Czas tracony w cyklu uwzględniając parametry geometryczne skrzyżowania i dopuszczalne prędkości ruchu wynosi 15 sekund. Zastosowanie podstawowej formuły Webstera prowadzi do uzyskania wartości optymalnej długości cyklu sygnalizacji świetlnej równej 44 sekundy. Zastosowano sygnalizację świetlną dwufazową. W fazie pierwszej (obsługiwane wloty A i B) efektywny sygnał zielony obliczono równy 24 sekund, a w fazie drugiej (obsługiwane wloty C i D) 16 sekund.

W kolejnym kroku wykorzystano do obliczeń równanie (5) przyjmując następujące wartości pojemności komunikacyjnej: 45 (wlot A), 52 (wlot B), 45 (wlot C) i 45 (wlot D). W wyniku obliczeń uzyskano następujące wartości efektywnych sygnałów zielonych: w fazie I, 21 sek. w fazie II 18 sek.

W obliczeniach zastosowano wagę $w_1 = 0$ i $w_2 = 1$, czyli akcent w wyrażeniu położono całkowicie po stronie podaży analizowanej sieci transportowej. Jak widać uwzględnienia podaży sieci na skrzyżowaniu (w postaci pojemności komunikacyjnej) zmienia parametry sygnalizacji o 12,5% i 20%. Nastąpiła nie tylko zmiana długości światła, ale i zmiana proporcji faz (splitu).

WNIOSKI

Wzór Webstera jest jednym z najstarszych sposobów wyznaczania długości cyklu sygnalizacji świetlnej, doczekał się też licznych modyfikacji w literaturze przedmiotu [10-12]. Z tego powodu

wzór ten stał się podstawą i przykładem demonstracji modyfikacji obliczania długości sygnałów zielonych. Metoda nadaje się do zastosowania w przypadku obliczania długości sygnałów zielonych. W tych przypadkach uwzględnia nie tylko popyt na wlotach skrzyżowania (natężenie), ale również podaż sieci drogowej bezpośrednio za skrzyżowaniem. Ciekawe perspektywy taka koncepcja stwarza dla obliczania sygnałów przy braku znajomości natężeń ruchu. Należy w tym kontekście poszukiwać prawidłowości pomiędzy strukturą skrzyżowania, długością jego wlotów i wylotów, a panującymi na wlotach natężeniami ruchu. Wymaga to dalszych pogłębiionych badań.

BIBLIOGRAFIA

1. Daganzo C.F., Fundamentals of Transportation and Traffic operations. Pergamon, 1997.
2. Gaca S., Sucorzewski W, Tracz M., Inżynieria ruchu drogowego, WKiŁ, Warszawa 2008.
3. Tracz W., Allsop E. R., Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, WKiŁ, Warszawa 1990 r.
4. <http://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08024/chapter3.htm>; (odsłona 27-09-2015)
5. <http://www.gevas.eu/1/products/individual-traffic/traffic-control/> (odsłona 27-09-2015)
6. <http://hcm.trb.org/?qr=1> (odsłona 27-09-2015)
7. <http://www.mzum.katowice.pl/bip/zarząd.html> (odsłona 27-09-2015)
8. http://katowice.stat.gov.pl/vademecum/vademecum_slaskie/port_rety_miast/miasto_katowice.pdf (odsłona 27-09-2016)
9. <http://www.targeo.pl/> (odsłona 28-09-2015)
10. Webster, F.V., Traffic Signal Settings, Road Research Technical Paper No. 39, London, Her Majesty's Stationery Office, 1958: reprinted with minor amendments, 1969
11. http://www.ltrc.lsu.edu/TRB_82/TRB2003-000383.pdf (odsłona 27-09-2015)
12. Hoque S., Imran A. Modification of Webster's delay formula under non-lane based heterogeneous road traffic condition, Journal of Civil Engineering, 35, 2007.

CAPACITY CONTROL OF ROAD NETWORK

Abstract

This paper proposes a modification of the popular Webster formula for calculating the effective length of green signals at intersections with traffic lights. The methods are based on the allocation part in the cycle length relative to the intensity of saturation is not taken into account the supply of roads. In this way, the control of the road network takes place based on traffic of insufficient supply taking into account the characteristics of the road network. The theoretical supply in the road network as shown in the example of the city of Katowice is limited to a minimum. The article concept is an extension of the capacity control used term density of traffic flow. The capacity is equivalent density for a fixed average communications speed, traffic flow and the traffic structure on the known length of the section

of the road network. The proposed concept uses the fact less variability in the communication capacity traffic in dense transport networks (sections of low length of the order of tens and hundreds of meters).

This method allows to take into account the specificity of each supply side of the road network, regardless of variation in their structures movement.

Autor:

Celiński Ireneusz - ireneusz.celinski@polsl.pl; Politechnika Śląska, Wydział Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Polska