

Wiesław PAMUŁA<sup>1</sup>

## **METODY OPTYMALIZACJI WYKORZYSTYWANE PRZEZ MIEJSKIE SYSTEMY STEROWANIA RUCHEM**

*Artykuł przedstawia przegląd zagadnień związanych z opracowywaniem optymalnych strategii sterowania w miejskich systemach sterowania ruchem (UTC systems). Zwraca się uwagę na złożoność zadania optymalizacji i metody jego uproszczenia. Cechy obecnie stosowanych, w wielu sieciach transportowych, adaptacyjnych strategii sterowania są omówione i wskazano metody rozwiązania zadania poszukiwania najlepszego przebiegu sterowania. Wybrane rozwiązania są krótko naszkicowane ze wskazaniem wpływu różnych uproszczeń na zadanie optymalizacji. Podsumowanie artykułu wymienia inne metody znajdowania optymalnych strategii sterowania o obiecujących własnościach implementacyjnych.*

## **METODY OPTYMALIZACJI WYKORZYSTYWANE PRZEZ MIEJSKIE SYSTEMY STEROWANIA RUCHEM**

*The paper presents a review of problems which are encountered in developing optimal control strategies for UTC systems. The complexity of optimising traffic control is emphasised and ways of reducing it are presented. Features of currently applied, in many transport networks, adaptive control strategies are discussed showing ways of solving the task of effective search for the best control scheme. Selected application results, are briefly outlined to illustrate the impact of various assumptions made for simplifying the optimisation task. The paper concludes with a brief discussion of other methods for finding optimal control strategies.*

### **1. WPROWADZENIE**

Obszary miejskie stanowią wyzwanie dla inżynierów ruchu. Gęste sieci ulic, różnorodne trasy przemieszczeń i miejska polityka drogowa stanowią ograniczenia dla opracowania efektywnych systemów sterowania ruchem. Siatka ulic powstała w toku rozwoju miast i znacznych inwestycji tworzy sztywną mozaikę stref o różnej przepustowości poważnie komplikując wysiłki prowadzenia ruchu. Rozmieszczenie biur i zakładów przemysłowych definiuje codzienne trasy przemieszczeń pojazdów a w dni wolne i wakacje miejsca wypoczynku oraz centra handlowe stają się głównymi celami przemieszczeń.

---

<sup>1</sup> Politechnika Śląska Wydział Transportu, 40-019 Katowice, ul.Krasińskiego 8, Tel +48 32 6034336, e-mail wieslaw.pamula @polsl.pl

Miejska polityka drogowa określa najważniejsze kryteria oceny zadań optymalizacji w sterowaniu ruchem drogowym. Celem jest zmniejszenie kosztów przemieszczania się w mieście dla wszystkich biorących udział, redukcja szkód środowiskowych i poprawa gospodarowania infrastrukturą transportową. Ważnym elementem polityki jest promocja transportu zbiorowego. Transport zbiorowy zwiększa znacznie sprawność ruchu w mieście przez wykorzystanie środków do przemieszczania znacznej liczby uczestników po jednoznacznie zdefiniowanych trasach i w określonym czasie.

Przedstawione uwarunkowania dla funkcjonowania systemów UTC mogą być na różny sposób wyrażane w procesie ich opracowania. Sztuczna struktura istniejących układów komunikacyjnych i systemów sterowników ruchu ograniczy pole szukania dróg prowadzenia potoków ruchu co może istotnie zredukować złożoność układów sterowania. Z drugiej strony uwzględnienie rozmiaru obszaru oddziaływania oraz trudno formalizowanych zaleceń związanych z ochroną środowiska i ekonomiką funkcjonowania wyznaczy zbiór kryteriów optymalizacji działania.

Wdrażane systemy UTC w różnym stopniu realizują przedstawione założenia funkcjonalne. Projektanci koncentrują się na wybranych elementach zwykle najmniej kosztownych w implementacji. Takim elementem jest koordynacja działania sterowników.

Opracowanie efektywnie działających systemów UTC wymaga określenia kryteriów oceny strategii sterowania. W rozdziale drugim przedstawiono zwięzłą definicję zadania optymalizacji. W kolejnym rozdziale określono metody wyznaczania rozwiązań i ich własności. W rozdziale czwartym wskazano warianty metod stosowane w uznanych rozwiązaniach UTC. W podsumowującym rozdziale wymieniono cechy obecnych rozwiązań UTC wskazując na możliwość zastosowania innych metod znajdowania optymalnych strategii sterowania o obiecujących własnościach implementacyjnych.

## 2. ZADANIE OPTIMALIZACJI

Zadanie wyznaczenia strategii sterowania potokami ruchu w przestrzeni miejskiej jest zadaniem z dziedziny poszukiwania optymalnego zbioru decyzji sterujących. Decyzje sterujące powinny spełniać kryteria sprawnego funkcjonowania systemu transportowego.

Przestrzeń miejska stanowi sieć ulic z wzajemnie wpływającymi na siebie korytarzami ruchu. Korytarze różnią się liczbą poruszających pojazdów, prędkością ruchu, niektóre są trasami transportu zbiorowego i zawierają miejsca parkingowe. Taka różnorodność potoków ruchu wymaga uważnego rozpatrzenia przy opracowaniu systemu UTC.

Zagadnienie optymalizacji sterowania ruchem może być przedstawione z użyciem różnego aparatu formalnego. Sterowniki ruchu wyliczają decyzje w dyskretnych chwilach czasowych określonych przez wewnętrzne układy czasowe zwykle z rozdzielczością od 0,1 do 1 sekundy [13, 16, 18]. Skoordynowanie wymaga zwykle synchronizacji tych punktów czasowych. Uzasadnionym staje się, zatem wykorzystanie formalizmu eksponującego dyskretną naturę sterowania ruchem.

Sieć sterowanych skrzyżowań wyposażonych w sterowniki można przedstawić z użyciem skierowanego grafu gdzie sterowniki są w węzłach a krawędzie reprezentują potoki ruchu. Rys.1. przedstawia konwersję system transportowego miasta na graf zachowujący korytarze ruchu.

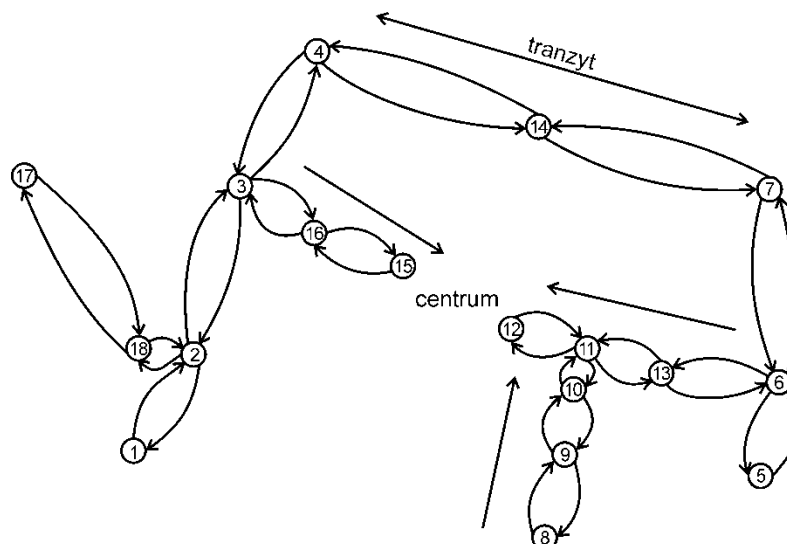


Fig. 1. Skierowany graf sieci ulic

Rozważając pojedyncze sterowane skrzyżowanie  $i$  z fazami sygnałów, jako zmiennymi stanu bieżący stan  $S$  w chwili  $k$  wyznaczony jest przez stan poprzedni w chwili  $k-1$ , i parametry wpływające na zmianę stanu:

$$S^k = f(S^{k-1}, r, p, c) \quad (1)$$

$r$  – parametry potoku ruchu,

$p$  – miara zakłócenia ruchu (wystąpienie pojazdu transport zbiorowego, zdarzenia drogowego),

$c$  – koszt zmiany stanu.

Parametry potoku ruchu są wyeksponowane, ponieważ łatwo mogą zostać pomierzone, miara zakłócenia ruchu musi być mocno zaakcentowana ze względu na wpływ na sprawność systemu. Ważnym parametrem jest koszt zmiany stanu i jest on kluczowy dla procedur optymalizacji.

Stan sieci transportowej  $N$  można przedstawić w postaci zbioru stanów sterowanych skrzyżowań:

$$N^k = (S_1^k, S_2^k, \dots, S_n^k) \quad (2)$$

Znalezienie optymalnego stanu sieci w chwili  $k$  wymaga przeszukania zbioru przejść między stanami i wybrania przejścia o najniższym koszcie. Koszt wyliczany jest dla znaczącego horyzontu czasowego, jako że pojazdy mogą przejechać przez wiele skrzyżowań w sieci w celu dotarcia do celu podróży. Sprawność system transportowego mierzona jest globalnie dla całego obszaru miejskiego. Potoki ruchu w korytarzach, między skrzyżowaniami są podobne tak, więc parametry zmian stanów są zbliżone, co ułatwia wyliczenia.

Sekwencja zmian stanów w zadanym horyzoncie czasowym określa koszt. W zależności od rozdzielczości dyskretyzacji czasu liczba możliwych sekwencji może być ogromna.

Koszt zmian stanu skrzyżowania może być reprezentowany przez takie wielkości jak

- średnie opóźnienie,
- średnia długość kolejek pojazdów,
- liczba zatrzymań,
- zużycie paliwa,
- wartość emisji zanieczyszczeń.

Miary mogą zostać zagregowane z użyciem odpowiednich wag do takich wielkości kosztowych jak strata czasu, wpływ na środowisko.

Koszt przejścia między stanami skrzyżowań  $N$  w horyzoncie czasowym  $H$ , zdefiniowanym, jako zbiór kolejnych chwil  $(t_1, t_2, \dots, t_h)$  wynosi:

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^h c_i^k \quad (3)$$

Celem optymalizacji jest minimalizacja wartości tej podwójnej sumy. Minimum (4) jest szukane dla sekwencji zmian  $T=(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_h)$ , w horyzoncie czasowym, w przestrzeni wszystkich możliwych stanów sieci.

$$C = \min_{T \in N} \left( \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^h c_i^k \right) \quad (4)$$

Gdy wszystkie przybycia na wlotach skrzyżowań, miary zakłóceń i koszty zmian są znane w całym horyzoncie czasowym wtedy problem staje się zwykłym, chociaż trudnym zagadnieniem z zakresu badań operacyjnych [23]. Takie optymalizacje są rdzeniem strategii sterowania opartych na stałoczasowych planach żmudnie opracowywanych na podstawie kosztownych pomiarów ruchu drogowego. W rzeczywistych warunkach ruchowych sytuacja zmienia się i do pewnego stopnia jest niewiadoma. W celu rozwiązania zadania wymagana jest predykcja przebiegu zmian potoków ruchu.

### 3. METODY WYZNACZANIA ROZWIĄZAŃ

Przestrzeń poszukiwania rozwiązań rośnie wykładniczo z rozmiarem horyzontu. Zgrubne oszacowanie daje, dla skrzyżowania z dwoma fazami i horyzontem o długości 50 punktów czasowych przestrzeń rozwiązań o rozmiarze ponad  $1,1 \times 10^{15}$  elementów. W celu redukcji rozmiaru nakładane są dodatkowe ograniczenia na warunki przejść między stanami. Ograniczenia odwzorowują własności techniczne sterowników i wymagania realizacji miejskiej polityki drogowej [5]. Są to minimalne, maksymalne czasy trwania sygnałów faz, liczba faz, sekwencje faz, czasy odpowiedzi detektorów pojazdów, priorytety przejazdów komunikacji zbiorowej itp.

Łączenie stanów wykonywane jest, gdy stany skrzyżowań są równoważne, np. mają ten sam sygnał fazy, identyczne parametry potoku ruchu lub miary zakłóceń. Ograniczenia

czasu trwania sygnałów fazowych redukują liczbę zmian stanów w horyzoncie czasowym [21]. Rozwiązania techniczne sterowników takie jak praca cykliczna, ograniczony zakres wartości splitów, tryb komunikacji wprowadzają stany zabronione, co w konsekwencji pozwala na dalszą redukcję rozmiaru przestrzeni poszukiwań optymalnego rozwiązania.

Znalezienie optymalnego rozwiązania wymaga sprawnego algorytmu przeszukiwania tak rozległej przestrzeni. Metody różnią się sposobami przeprowadzania przeszukiwania. Można wyróżnić wyczerpujące i częściowe przeszukiwania. Pełne przeszukiwanie jest ogromnie kosztowne operacyjnie, lecz wykorzystywane, gdy cechy sterownika znacznie redukują przestrzeń. Częściowe przeszukiwania korzystają z algorytmów opartych na iteracyjnych metodach przeszukiwania lokalnego wykorzystujących "wspinanie" po wartościach funkcji kosztów. Postęp przeszukiwania sterowany jest przez ciągłe obserwacje zmian funkcji kosztu.

Częściowe przeszukiwania mogą utknąć w lokalnych minimach funkcji kosztów uniemożliwiając osiągnięcie globalnego rozwiązania.

Sterowanie ruchem w sieci skrzyżowań można podzielić na podstruktury – korytarze ruchu częściowo nakładające się na siebie. Ta cecha może zostać wykorzystana do przeprowadzenia systematycznego przeszukiwania. Dogodne może być zastosowanie drzewa poszukiwań. Przemieszczanie w dół drzewa zapobiega odwiedzeniu miejsc mających małe znaczenie dla analizowanych sekwencji zmian stanów. Częściowe przeszukiwania mogą umożliwić poprawianie, jakości rozwiązań.

### 3.1 Iteracyjne metody przeszukiwania lokalnego

Iteracyjne algorytmy przeszukiwania lokalnego są pochodnymi gradientowych metod („wchodzenia, cofania”) znajdowania ekstremów funkcji, które startują od kandydata, na rozwiązanie, podanego przez użytkownika lub wybranego losowo. Takie algorytmy wykorzystywane są szczególnie często przez systemy UTC pracujące z cyklami, splitami i offsetami. Występuje znaczne zmniejszenie rozmiaru przestrzeni poszukiwania rozwiązań

Iteracyjny algorytm przeszukiwania startuje od początkowego zbioru stanów i następnie krokowo przechodzi do sąsiednich stanów stosując rozmiar kroku odpowiedni do lokalnych własności przestrzeni [22]. Tworzy się dwa zbiory możliwych przemieszczeń jeden z wzrastającymi wartościami parametrów stanów, drugi z malejącymi. Koszty przemieszczeń są wyliczane dla obu zbiorów. Równanie (1) wskazuje zależność kosztów od parametrów ruchu, które są mierzone lub przewidywane. Procedury predykcji oparte są na modelach ruchu. Kolejny krok przeszukiwania podejmowany jest na podstawie danych o kosztach tylko w bezpośrednim otoczeniu bieżącego stanu sieci.

Zakończenie przeszukiwania następuje po wykonaniu zadanej liczby kroków lub gdy prędkość zmian kosztów osiąga zadaną wielkość np. osiąga plateau lub przekracza zadany próg.

Iteracyjne metody przeszukiwania gwarantują optymalne rozwiązania tylko, gdy funkcja kosztów jest unimodalna. Dla wielomodalnych funkcji zakończenie przeszukiwania może dać, suboptymalne rozwiązanie zależnie od wyboru rozwiązania początkowego – kandydata.

### 3.2 Drzewa przeszukań

Podział przestrzeni przeszukiwań powstaje w naturalny sposób, gdy można w sieci wyróżnić podstruktury np. korytarze ruchu. Wykorzystanie drzew przeszukań stosowane jest w metodach opartych na programowaniu dynamicznym lub algorytmach podziału i ograniczeń [1, 4].

Optymalizacja z wykorzystaniem programowania dynamicznego przeprowadzana jest od ostatniego stanu horyzontu cofając się przez kolejne stany do początku.

Równanie rekurencyjne opisującego optymalną wartość funkcji celu otrzymuje się przez przekształcenie (4):

$$C^j = \min_{T \in N} \left( \sum_{i=1}^n c_i + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{j-1} c_i^k \right) \quad (5)$$

Koszt w stanie  $j$  jest sumą poprzednich kosztów i bieżącego kosztu przejścia do nowego stanu sieci. Znowu koszty związane są parametrami ruchu, które mierzy się lub estymuje. Wyniki są zapamiętywane. Tak, więc gdy optymalizacja kończy się na stanie  $j=1$   $C^j$  jest minimalnym kosztem w całym horyzoncie czasowym. Optymalna sekwencję przejść otrzymuje się przez prześledzenie zapamiętanych wyników pośrednich.

Algorytmy podziału i ograniczeń (B&B) działają iteracyjnie. Iteracja składa się z trzech operacji: wyboru węzła drzewa przeszukań, obliczenia ograniczeń i obciążenia gałęzi drzewa. Podczas iterowania zachowywane są rozwiązania pośrednie.

Początkowo wybrana sekwencja przejść – zwykle poprzednia lub losowa, uznana zostaje za najlepszą. Sekwencja dzielona jest na dwie lub więcej części. Wyliczana jest wartość funkcji ograniczającej i jej wartość porównana zostaje z bieżącą najlepszą, zachowana zostaje lepsza. Następnie wykonuje się kolejny podział. Poddrzewa z mniejszymi wartościami funkcji ograniczającej są wycinane, co eliminuje znaczne obszary przestrzeni rozwiązań.

Przeszukanie zostaje zakończone, gdy przeszukane zostaną wszystkie nieobcięte poddrzewa optymalnym rozwiązaniem staje się najlepsze do ostatniej operacji obcinania.

Kluczowymi elementami algorytmów podziału i ograniczeń są metoda podziału i definicja funkcji ograniczającej.

## 4. MIEJSKIE SYSTEMY STEROWANIA RUCHEM

Efektywna implementacja zadań optymalizacji sterowania ruchem wymaga uważnego wyboru wielkości oddziałujących na potoki ruchu i dostarczających danych o nim. Takie wielkości powinny być równoważnymi lub odpowiadać optymalizowanym parametrom.

Należy podkreślić dwa ważne elementy implementacji algorytmów optymalizacji tj. sposób predykcji przebiegu potoków ruchu w horyzoncie czasowym oraz sposób propagacji decyzji sterowania w sieci ulic.

Predykcja opiera się na pomiarach ruchu i modelowaniu zachowania potoków. Stosowane są modele kolejkowe, dyspersja kolumn pojazdów, profile ruchu i odstępy między pojazdami. Dokładność pomiarów i stopień odwzorowania rzeczywistych warunków ruchu warunkuje poprawną predykcję i w wyniku odpowiednie decyzje sterowania.

Obecnie instalowane sterowniki ruchu drogowego posiadają znaczną moc obliczeniową, która może zostać wykorzystana do przeliczania zadań optymalizacji. Właściwy podział i propagacja decyzji sterowania w sieci determinują globalną efektywność systemów UTC.

Tradycyjnie systemy UTC dzielone są na generacje, pierwsze systemy adaptacyjne zaliczane są zwykle do drugiej generacji i opracowano je w latach 60-tych XX wieku. Systemy SCOOT, SCATS i TUC są najbardziej rozpowszechnionymi systemami tej generacji. Następna generacja przyniosła takie systemy jak OPAC, PROLYN, RHODES, UTOPIA/SPOT, które wykorzystują znacznie zwiększoną moc przetwarzania sterowników i nowe możliwości komunikacyjne. Trzecia generacja ewoluje w kierunku systemów zarządzania ruchem pozwalających realizować złożone miejskie polityki transportowe [7].

#### 4.1 SCOOT

SCOOT (Split Cycle Offset Optimisation Technique) jest często określany, jako adaptacyjna wersja TRANSYT i należy obecnie do najczęściej wdrażanych systemów [20, 25].

Minimalizuje się czas czekania i liczbę zatrzymań w sieci ulic. Optymalizacja przeprowadzana jest z użyciem algorytmu iteracyjnego przeszukiwania lokalnego i wykorzystaniem dyspersyjnego modelu ruchu między skrzyżowaniami. W celu odwzorowania sposobu działania sterowników optymalizacja wykonywana jest z uwzględnieniem takich wielkości jak cykle, splity i offsety. Parametry modelu ruchu wyznaczane są na podstawie pomiarów na dojeździe do skrzyżowań. Profil przybyć porównywany jest z profilem opuszczania skrzyżowania i różnice reprezentują opóźnione i ustawione w kolejce pojazdy. Profile estymowane są dla każdego cyklu pracy sterownika na podstawie złożenia ruchu dojeżdżających pojazdów, czasu opróżnienia kolejki, wpływu zmian splitów i offsetów [12].

Optymalizator cyklu sprawdza poziomy nasycenia wlotów skrzyżowania, co cykl i dokonuje skokowych zmian (o 4, 8 lub 16sekund) w zależności od bieżącej długości trwania cyklu i poziomu nasycenia. Jeżeli skrzyżowanie pracuje poniżej natężenia nasycenia długość cyklu jest zmniejszana. Czas cyklu może być stały dla grupy skrzyżowań, np. w korytarzu ruchu, co ułatwia wyliczanie offsetów.

Optymalizator splitów równoważy przewidywane profile przybycia i opuszczania, co sekundę. Przewidywana strata czasu porównywana jest z wyliczonymi dla zadanego przedziału zmienności czasów. Wyznaczany jest optymalny split wynikający z analizy strat dla tego przedziału.

Optymalizator offsetu działa na sąsiednich parach skrzyżowań i poszukuje wartości offsetu polepszającej przepływ potoków wzdłuż zdefiniowanych korytarzy ruchu. W podobny sposób jak optymalizator splitu offset jest zwiększany lub zmniejszany o kilka sekund i wyznaczane są opóźnienia czasowe. Po optymalizacji offsetu optymalizator splitu może dodatkowo zmienić wartości czasów opierając się na rzeczywistych pomiarach ruchu na lini zatrzymania skrzyżowania.

#### 4.2 SCATS

SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) jest jednym z najstarszych systemów adaptacyjnych [23].

Minimalizowana jest liczba zatrzymań, gdy ruch jest mały lub maksymalizowana przepustowość, gdy ruch zbliża się do nasycenia. Osiągnane to jest przez algorytm równoważenia nasycenia ruchu, który wyznacza wartości długości faz tak, aby osiągnąć zadany stopień nasycenia dla dominującego potoku dowolnej z faz. Wielkościami wejściowymi są: stopień nasycenia DS i równoważny przepływ pojazdów VK.

Wartość DS wpływa na długości cykli i splitów a wartość VK używana jest do wyznaczania offsetów. Dane VK uzyskuje się z użyciem detektorów pojazdów na liniach zatrzymań. Wyznaczenie odstępów czasowych między pojazdami  $g_i$  oraz liczby przerw między pojazdami na dolocie do skrzyżowania pozwala wyznaczyć średnią prędkość i natężenie ruchu.

$$t_{ugreen} = \sum_i^n g_i - n \cdot g_{mflow} \quad (6)$$

$$DS = \frac{t_{green} - t_{ugreen}}{t_{agreen}} \quad (7)$$

Niewykorzystana wartość czasu zielonego  $t_{ugreen}$  (6) wskazuje jak bardzo różni się długość  $n$  zliczonych przerw  $g_i$  między pojazdami od sumy standardowych przerw przy maksymalnym natężeniu ruchu  $g_{mflow}$ , co wskazuje warunki nasycenia. Standardowa przerwa wyznaczana jest okresowo, zwykle codziennie, aby uwzględnić zmieniające się warunki ruchu w sieci.

Stopień nasycenia DS (7) może być większy niż 1, w tym wypadku pojazdy poruszają się bliżej siebie niż podczas maksymalnego przepływu. VK wyliczane jest, jako iloczyn DS,  $t_{green}$  i liczby pojazdów w sekundzie przy maksymalnym przepływie. DS i VK są uśredniane z wagami w ciągu 3 kolejnych cykli. Poprawne wyznaczenie wag determinuje efektywne działanie optymalizacji.

SCATS dostosowuje bieżące plany małymi krokami do nowych wartości. Poprawki wykonywane są raz na cykl. Fazy są niezmiennie.

### 4.3 TUC

TUC korzysta z modelu ruchu pojazdów w postaci dyskretnego w czasie układu liniowego. Zagadnienie sterowania ruchem w sieci skrzyżowań zostaje przeniesione w dziedzinę automatycznej regulacji gdzie kolejne wartości nastaw regulatora wyznaczone są przez minimalizację (9) kwadratowego funkcjonału kosztów [19]. Konwersja zagadnienia opiera się na założeniu, że model ruchu „store and forward” można przekształcić w dyskretny w czasie układ liniowy:

$$\mathbf{r}(k+1) = \mathbf{r}(k) + \mathbf{B}\Delta t_{green}(k) + \mathbf{D}\Delta d(k) \quad (8)$$

gdzie elementami wektora  $\mathbf{r}$  są liczby pojazdów na odcinkach łączących skrzyżowania w chwilach czasu  $k, k+1$ . Czas dzielony jest na odcinki, które nie mogą być mniejsze od długości cyklu w sieci. Macierze  $\mathbf{B}$  i  $\mathbf{D}$  opisują własności sieci. Wektor wejściowy  $\Delta t_{green}$  jest różnicą bieżącego efektywnego czasu zielonego każdej z faz, każdego z skrzyżowań w sieci i nominalnej wartości tego czasu. Nominalne efektywne wartości czasu wyliczane



są zwykle z użyciem TRANSYT'a.  $\Delta d$  jest wartością różnicy wymaganego przepływu i nominalnego.

Celem regulacji jest minimalizacja zagrożenia przekroczenia nasycenia przez odpowiednią zmianę splitów na skrzyżowaniach dla danych wartości cykli i offsetów.

$$C = 1/2 \sum_{k=1}^n (\|r(k)Q\|^2 + \|\Delta t_{green}(k)R\|^2) \quad (9)$$

Uzyskuje się to przez rozwiązanie liniowo-kwadratowego (LQ) problemu sterowania optymalnego.  $Q$  i  $R$  są macierzami wag określającymi współczynniki nasycenia skrzyżowań i możliwości sterowania. Elementy na przekątnej macierzy  $Q$  mają wartość odwrotności maksymalnej dopuszczalnej liczby pojazdów na odcinku łączącym skrzyżowania. Wartości elementów macierzy  $R$  wyznaczone są metodą prób i błędów w celu uzyskania zadowalającego zachowania sterowania.

Długość cyklu jest zmieniana proporcjonalnie do nominalnej wartości cyklu, dla średniego zaobserwowanego maksymalnego obciążenia sieci. Parametry sterowania wyznaczone są dla korytarzy ruchu w sieci. Większe obciążenia zwiększają długość cykli. Długości cykli mają nałożone ograniczenia.

Zmiana offsetów dokonywana jest wzdłuż korytarzy ruchu. Przyrost długości kolejek między sąsiednimi skrzyżowaniami jest zmniejszany przez stopniową zmianę wartości offsetów. Nominalna wartość offsetu wyznaczana jest na podstawie czasu przejazdu odcinka między skrzyżowaniami. Prędkość zmian wartości offsetu zależy od bieżącego obciążenia.

#### 4.4 UTOPIA/SPOT

UTOPIA/SPOT (Urban Traffic Optimization by Integrated Automation/Signal Progression Optimization Technology) jest rozwijana od lat 1980's [14,15,3].

Każde skrzyżowanie wyposażone jest w jednostkę SPOT współdziałającą z sterownikiem. Jednostka dostarcza polecenia do sterownika zmieniając jego bieżące parametry działania. Sąsiadujące jednostki SPOT współpracują wymieniając lokalne dane o ruchu i informacje o decyzjach sterowania. Oprogramowanie jednostek wylicza parametry sterowania minimalizując zbiór kosztów składających się z ważonych wartości opóźnień, zatrzymań, nadwyżki pojemności odcinków między skrzyżowaniami, zatrzymań pojazdów specjalnych lub komunikacji zbiorowej, czasów oczekiwania przechodniów, odchyłeń od planów odniesienia oraz poprzednich wartości sygnalizacji. Minimalizacja wykonywana jest z użyciem algorytmu B&B [24].

Przesuwany horyzont ma 120 sekund długości. Bieżące dane z detektorów wykorzystywane są dla wyliczeń na początku horyzontu (kilka sekund) a dane z modelu ruchu dla reszty horyzontu [17]. Wyliczone decyzje sterujące są ważne przez 3 sekundy następnie horyzont jest przesuwany i optymalizacja się powtarza. Dodatkowo podczas optymalizacji wartości są ograniczane przez wielkości wyliczane na poziomie obszarowym w module programowym UTOPIA.

UTOPIA generuje wartości graniczne uwzględniając stan sieci dla każdego z sterowników na skrzyżowaniach. Oprogramowanie estymuje długość kolejek na odcinkach

łączących skrzyżowania, co 3 sekundy i wylicza wartości natężeń ruchu, procenty skrętów oraz miary zatłoczenia w każdym cyklu. Dodatkowo może przeprowadzić analizę danych ruchowych na wybranych obszarach i określić przewidywane potoki w korytarzach ruchu oraz dokonać optymalizacji czasu przejazdu stosując ograniczenia na średnią prędkość i natężenia nasycenia z wykorzystaniem wbudowanego makroskopowego modelu ruchu.

UTOPIA/SPOT wylicza optymalne strategie sterowania dla podobszarów sieci, każdy podobszar – korytarz ruchu ma własny czas cyklu. System utrzymuje bazę danych historycznych zawierającą zmierzone natężenia ruchu, procenty skrętów i użyte długości cykli.

#### 4.5 OPAC, PROLYN, RHODES

Opracowanie OPAC (Optimized Policies for Adaptive Control) rozpoczęto we wczesnych latach 80-tych [8,9,10].

Całkowite opóźnienie na skrzyżowaniu i liczba zatrzymań stanowią rdzeń funkcji kosztów, która jest minimalizowana. Algorytm używa wartości zmierzonych jak i zamodelowanych parametrów ruchu, aby wyznaczyć długości czasu trwania faz. Długości faz są ograniczane przez wartość minimum i maksimum trwania czasu zielonego, przez długość wirtualnego cyklu oraz offsetów, które są aktualizowane na podstawie zmierzonych danych. OPAC nie zmienia kolejności faz.

Długość wirtualnego cyklu wyliczana jest na bieżąco. Ulega zmianie zgodnie z wartością funkcji kosztów dla skrzyżowań. Typowa zmiana to 1 sekunda na cykl. W ramach takich ograniczeń OPAC wypracowuje lokalnie decyzje sterujące tj. wyznacza offsety i długości faz, wykonując równoważenie potoków na skrzyżowaniach.

OPAC-I zakłada nieskończony horyzont optymalizacji i stosuje programowanie dynamiczne do optymalizacji funkcji kosztów. OPAC-I nie może pracować w czasie rzeczywistym ze względu na wymagany bardzo duży czas dla wyliczenia optymalizacji parametrów sterowania.

OPAC-II redukuje przestrzeń przeszukiwań rozwiązań przez podział horyzontu na zadaną liczbę krótkich przedziałów i bierze pod uwagę tylko zachowanie sieci dla tych chwil czasowych. Przeszukanie kosztów dla wszystkich możliwych wartości długości fazy jest zastosowane do wyznaczenia optymalnego rozwiązania. OPAC-II jest szybszy jednak w dalszym ciągu wymaga danych o ruchu w całym horyzoncie optymalizacji, który ma od 50-100 sekund długości.

Opracowanie PROLYN (Programmation Dynamique) rozpoczęto w późnych latach 80-tych [6,11].

Minimalizowana funkcja kosztów to suma opóźnień w horyzoncie czasowym. Jest optymalizowana z użyciem dynamicznego programowania. Stosowany jest przesuwany horyzont o długości 75 sekund z 5 sekundowym początkiem. Kolejki są określane z użyciem danych z detektorów na dolocie do skrzyżowania oraz modelu dyspersji kolumn pojazdów. Koordynacja działania skrzyżowań jest zapewniona przez wymianę estymowanych danych o kolumnach pojazdów wzdłuż korytarzy ruchu zgodnie z kierunkiem ruchu.

RHODES (Real-Time, Hierarchical, Optimized, Distributed, and Effective System) jest hierarchicznym systemem sterowania, który używa predykcyjnego algorytmu optymalizacji na poziomie skrzyżowań i sieci. RHODES zawiera główny sterownik, symulator dyspersji

kolumn pojazdów, optymalizator obszarowy, symulator ruchu pojedynczego pojazdu oraz lokalny optymalizator COP podobny do SPOT.

RHODES jest całkowicie oparty na programowaniu dynamicznym i wypracowuje decyzje sterujące zmieniające fazy z wykorzystaniem danych o przybywających na skrzyżowanie pojazdach. RHODES dzieli zadanie sterowania ruchem na podzadania związane z hierarchią sieci. Podproblemy obejmują rozłożenie obciążenia sieci, sterowanie ruchem potoków i sterowanie sygnalizacją w obrębie skrzyżowania.

## 5. WNIOSKI

Optymalizacja wymaga pokonania poważnych trudności obliczeniowych ze względu na obszerność przestrzeni rozwiązań. Przedstawione systemy radzą sobie z zadaniem stosując uproszczenia z wykorzystaniem, w większości, heurystyk. Najczęściej stosowane są adaptacyjne algorytmy oparte na przesuwany horyzoncie czasowym.

Hierarchiczna dekompozycja zagadnienia optymalizacji dowodzi znacznej skuteczności. Takie podejście rozszerza horyzont czasowy optymalizacji możliwy do analizy, pozwalając na uwzględnienie sytuacji zatłoczenia, prowadzenia transportu zbiorowego i występowania zdarzeń drogowych.

Występujące zdarzenia drogowe wymagają nadzwyczajnych reakcji, które nie odwzorowywane są przez uproszczone modele sterowania. Systemy oparte na krokowym dopasowaniu parametrów sterowania są szczególnie wrażliwe na takie zakłócenia ruchowe.

Systemy polegają na odpornych sieciach komunikacyjnych, ponieważ jakakolwiek przerwa w przekazywaniu poleceń wymusza przejście sterowników do pracy lokalnej bez uwzględniania wypracowanych ograniczeń sterowania związanych z ruchem w sieci. Błędne dane z detektorów uniemożliwiają poprawną predykcję ruchu i jego modelowanie dla wyznaczania decyzji sterowania, co oznacza zakłócenia w optymalizowaniu ruchu w sieci.

Jak dotąd takie techniki jak sieci neuronowe lub programowanie genetyczne nie zostały zastosowane do optymalizacji decyzji sterujących. Znając wykorzystanie w innych dziedzinach techniki można wnioskować, że powinny być przydatne do wypracowania optymalnych decyzji sterujących ruchem. Oparte na wyuczonych zachowaniach mogą uwzględniać nietypowe sytuacje w ruchu i tym efektywniej sterować nim [2].

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bertsekas D. P.: Dynamic Programming and Optimal Control, volumes 1 and 2 1995, Athena Scientific, Belmont, Massachusetts USA.
- [2] Bielli M., Reverberi P.: New Operations Research and Artificial Intelligence approaches to traffic engineering problems, European Journal of Operational Research, 92 1996 pp.550-572.
- [3] Biora F.: UTC development. Nordisk Trafiksignalkonferens Stockholm 2007.
- [4] Clausen J. : Branch and Bound Algorithms by principles and examples, University of Copenhagen 2003, Denmark.
- [5] Dotoli M., Pia Fanti M., Meloni C.: A signal timing plan formulation for urban traffic control, Control Engineering Practice 14, 2006 pp. 1297–1311.
- [6] Farges J.L., Khoudour I., Lesort J. B. : PROLYN: on site evaluation Third International Conference on Road Traffic Control, May 1990 pp.62 – 66.
- [7] Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu drogowego, WKŁ Warszawa 2008.

- [8] Gartner N. H., Pooran F. J., Andrews C. M.: Implementation of the OPAC adaptive control strategy in a traffic signal network. IEEE ITS Conference Proceedings, 1995.
- [9] Gartner N.H., Stamatidis Ch., Zhou C.S.: Outline of the VFC-OPAC Model. Report prepared for RT-TRACS Project, UMass-Lowell, May 1996.
- [10] Gartner N. H., Pooran F. J., Andrews C. M.: Implementation of the OPAC Adaptive Control Strategy in a Traffic Signal Network 2001 IEEE ITS Conference Proceedings 2001, USA.
- [11] Henry J.J., Farges J. L., Tufal J.: The PRODYN real time traffic algorithm, in Proc. 4th IFAC Symp. Transport. Systems, Baden-Baden, Germany, 1983, pp. 307–312.
- [12] Hunt P.B., Robertson D.I. et al.: The SCOOT on-line traffic signal optimization technique. Traffic Engineering and Control 1982.
- [13] ITC 2 controller, Swarco Ltd 2008.
- [14] Mauro V., Taranto C. Di: UTOPIA. In: J.P. Perrin (ed), IFAC Control, Computers, Communications in Transportation, pp. 575-597, Paris, 1989.
- [15] Mauro V.: UTOPIA Urban Traffic Control Main Concepts. EU-China ITS Workshop Beijing, China, 18-19 April 2002.
- [16] NEMA Standards Publication TS 2-2003 v02.06, National Electrical Manufacturers Association 2003 U.S.A.
- [17] Newell G.F.: The rolling horizon scheme of traffic control. Transportation Research Part A 32, 1998 pp 39–44.
- [18] MSR Road Traffic Controller, MSR-Traffic Ltd. Poznań Poland 2008.
- [19] Papageorgiou M., Diakaki C., Dinopoulou V., Kotsialos A., Y. Wang Review of Road Traffic Control Strategies Proceedings of the IEEE, vol. 91, no. 12, 2003.
- [20] Robertson D.I., Bretherton R.D.: Optimizing networks of traffic signals in real-time: the SCOOT method. IEEE Transactions on Vehicular Technology 40, 1991, pp.11-15.
- [21] R.T. van Katwijk, B. De Schutter, Hellendoorn J.: Traffic adaptive control of a single intersection: A taxonomy of approaches. In Proc. 11th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, pp. 227–232, Delft, The Netherlands, 2006.
- [22] R. T. van Katwijk, B. de Schutter, Hellendoorn J.: Look-ahead traffic-adaptive signal control. Technical Report 07-020, Delft University of Technology 2007.
- [23] Sims A. G., Dobinson K. W.: The Sydney Coordinated Adaptive Traffic (SCAT) System Philosophy and Benefits IEEE Transactions On Vehicular Technology, Vol. Vt-29, No.2, May 1980 pp.130-137.
- [24] Taha H. A.: Operations Research: An Introduction, Prentice Hall; 8th. Edition, 2006.
- [25] Transyt13, A traffic signal co-ordination program for networks and signalled roundabouts TRL software UK 2009.