

Algorytmy sterowania sygnalizacją świetlną w procesie optymalizacji stanu skrzyżowań komunikacyjnych w miastach

DOI 10.34658/9788366741669.3.5

Dominik Malinowski
Politechnika Łódzka

Jolanta Labuch
Politechnika Łódzka

Wstęp

Wiek XXI to czas dynamicznych zmian oraz rozwoju wielu dziedzin życia. Każdy człowiek chce żyć coraz wygodniej, mieć wszystko szybciej, w lepszej jakości. Ciągły rozwój, doskonalenie oraz przyspieszanie gospodarki to filary oraz podstawowe założenia koncepcji przemysłu 4.0, inteligentnych miast czy budynków.

W związku z tym konieczne jest stosowanie w każdej dziedzinie życia różnych metod optymalizacji, automatyzacji oraz komputeryzacji – zarówno jeżeli chodzi o koszty, jak i o wydajność oraz płynność różnych procesów. Paradoxem współczesnego świata jest chęć poruszania się własnymi pojazdami. O ile w terenach pozamiejskich jest to dobra metoda na szybkie i komfortowe przemieszczanie się, o tyle w dużych aglomeracjach miejskich osiągamy efekty przeciwne.

Poprzez zatory drogowe niejednokrotnie tracimy więcej czasu, przemieszczając się własnym pojazdem, niż podróżując komunikacją miejską. Zagadnienia zarządzania, koordynowania oraz optymalizacji przepływu pojazdów przez skrzyżowania z sygnalizacją świetlną są jednymi z największych wyzwań obecnego świata. Problem ten jest o tyle istotny, iż zazwyczaj nie ma funduszy na budowę lub przebudowę istniejącej infrastruktury drogowej. Zatem działania usprawniające sprowadzają się do tworzenia inteligentnych systemów, czujników, detektorów oraz algorytmów sterujących sygnalizacją świetlną.

Optymalizacja w inżynierii ruchu

Zwiększający się z roku na rok ruch oraz natężenie na drogach i ulicach miast skutkuje pogorszeniem się warunków drogowych dla każdego uczestnika ruchu. Związane jest to przede wszystkim z brakiem równowagi pomiędzy popytem na podróż a podażą dróg wyrażaną jako przepustowość. Główne konsekwencje tych

procesów to przede wszystkim: wydłużający się czas przejazdu, zatory drogowe, zwiększona liczba koniecznych zatrzymań pojazdów, intensyfikacja wypadków drogowych oraz zanieczyszczeń środowiska (Aleksandrowicz i Piwowarczyk, 2016). Zadaniem inżynierii ruchu jest stworzenie odpowiednich rozwiązań mających na celu poprawę wydajności dróg w odpowiedzi na zwiększające się potrzeby.

Budowa nowych lub przebudowa istniejących szlaków komunikacyjnych to jedna z metod poprawiających wydajność określonych korytarzy ruchu. Związana jest ona z fizyczną ingerencją w istniejącą infrastrukturę. Poszerzenie istniejącej drogi o dodatkowe pasy ruchu, wydzielenie pasów do skrętu w lewo lub w prawo, budowa skrzyżowań bezkolizyjnych lub rond to tylko kilka metod wykorzystywanych przez zarządzających ruchem, aby zwiększyć przepływ pojazdów (Dąbrowski, Schumann, Woleński, 2015).

Innym rozwiązaniem stosowanym w inżynierii ruchu jest zarządzanie przepływem strumieni pojazdów w oparciu o optymalizację ustawień sygnalizacji świetlnej. W gęstych sieciach skrzyżowań w miastach zazwyczaj na skrzyżowaniach stosowane są sygnalizacje świetlne, które mają za zadanie koordynować ruch, zapewniając bezpieczeństwo.

Każda z faz ruchu może mieć inny czas trwania, natomiast każdy cykl może mieć dowolną kolejność występowania po sobie faz. Optymalizacja wykorzystywana w inżynierii ruchu ma za zadanie pomóc wybrać odpowiedni plan cyklu sygnalizacji świetlnej, który będzie najlepszy z punktu widzenia określonego celu (Gutek, 2009).

Zazwyczaj jest to maksymalizowanie ilościowego przepływu pojazdów przez skrzyżowanie lub minimalizowanie liczby koniecznych zatrzymań pojazdów. Ponadto optymalizacja może zostać zastosowana w sieci skrzyżowań dzięki czemu możliwe będzie wybranie wariantu sterowania sygnalizacją świetlną skoordynowanego ze skrzyżowaniami w sąsiedztwie danego skrzyżowania. Optymalizacja ma za zadanie reagować i z cyklu na cykl dostosowywać plan ustawień sygnalizacji świetlnej w zależności od intensywności i dynamiki ruchu (Horn, Nafpliotis, Goldberg, 1994).

Optymalizacja ruchu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną skupia się zazwyczaj na zaprogramowaniu lokalnego sterownika w taki sposób, aby uzyskać możliwie największą wydajność skrzyżowania. Wydajność tą można rozważać w dwóch kategoriach okresów czasowych (Kamiński, Oskarbski, 2017):

- godziny szczytu komunikacyjnego – optymalizacja ma za zadanie możliwie maksymalnie zwiększyć ilościowy przepływ pojazdów przez skrzyżowania, aby zmniejszyć kolejki pojazdów u wlotów skrzyżowań lub zapewnić płynność, której skutkiem będzie zwiększenie przepływu pojazdów;
- godziny pozaszczytowe – optymalizacja ma zapewnić maksymalną płynność pojazdów na skrzyżowaniu, aby minimalizować liczbę zatrzymań w obrębie danego skrzyżowania.

Inteligentne systemy transportowe

Inteligentne Systemy Transportowe są to rozwiązania, które m.in. sterują, koordynują oraz optymalizują potoki pojazdów, pieszych oraz rowerzystów przez skrzyżowania za pomocą odpowiednich ustawień każdej z faz sygnalizacji świetlnej. Korzystając z danych zbieranych przez szereg czujników i detektorów są w stanie prognozować z dużym poziomem prawdopodobieństwa natężenie ruchu oraz ustawienie sygnalizacji świetlnej stymulując tym samym ruch na skrzyżowaniu oraz czyniąc go zarówno wydajniejszym jak i płynniejszym. Wyróżnia się dwa rodzaje systemów sterowania ruchem: stałoczasowe i zmiennoczasowe, czyli adaptacyjne (Bertsekas, 1995).

Obecnie programowane sygnalizacje stałoczasowe są całkowicie niewydajne, dlatego w systemach ITS stosuje się adaptacyjne metody sterowania. W niniejszej pracy również uwaga skupiona będzie na sterowaniu oraz systemach adaptacyjnych, które jako jedyne są w stanie być odpowiedzią na zwiększający z roku na rok ruch na ulicach miast oraz powstające w wyniku tego zatory drogowe.

Adaptacyjne systemy sterowania ruchem dostosowują fazy i długości faz sygnalizacji świetlnej w zależności od zmieniającego się natężenia ruchu. Uwzględniają zarówno porę dnia, sytuacje nietypowe oraz przede wszystkim bieżące natężenie ruchu. Pozwala to w optymalny sposób dostosować program sygnalizacji świetlnej do danej sytuacji. Powoduje zwiększenie przepływu strumienia pojazdu przez skrzyżowanie mierzonego ilościowo oraz pozwala na zwiększenie płynności przemieszczania się pojazdów, co obecnie jest kluczowym parametrem w opisie wydajności miejskich sieci. Pozwala dodatkowo na skoordynowanie wzajemnie kolizyjnych przemieszczeń potoków uczestników ruchu, zapewniając większe bezpieczeństwo w określonych segmentach skrzyżowań.

Stan skrzyżowania i parametry optymalizacji

Problem optymalizacyjny w zarządzaniu potokiem pojazdów, pieszych oraz rowerzystów stanowi główne zadanie i wyzwanie współczesnych systemów sterowania ruchem. Pogodzenie wzajemnych kolizji tras, zapewnienie bezpieczeństwa rozwiązań optymalnych to kluczowe czynniki charakteryzujące potrzebę implementacji takich systemów. Decyzje, w wyniku których następuje ustawienie parametrów sterujących sygnalizacją świetlną, muszą być optymalne z punktu widzenia wielu złożonych oraz rozgałęzionych parametrów z nadrzędnym celem sprawności funkcjonowania tegoż systemu.

Według Profesora Wiesława Pamuły (2011, s. 2158) „przestrzeń miejska stanowi sieć ulic z wzajemnie wpływającymi na siebie korytarzami ruchu”. Należy zatem

bezwzględnie przy projektowaniu systemu sterowania ruchem wziąć pod uwagę kluczowe czynniki determinujące – liczbę pojazdów, geometrię skrzyżowania, oddziaływanie skrzyżowania, dozwoloną prędkość, obecność komunikacji zbiorowej, charakter i sieć przejść dla pieszych oraz inne czynniki.

Pomijając powyższe aspekty, nie da się zbudować systemu, który będzie spełniać prawidłowo zadanie optymalizacyjne w danej sieci miejskiej. Bardzo często rozwiązania, które sprawdzają się w innych miastach, niekoniecznie mogą sprawdzić się w miejscu, w których chcielibyśmy je skopiować i zaimplementować. Może być to związane chociażby z kulturą jazdy kierowców, odsetkiem pojazdów ciężarowych, a nawet pojazdów elektrycznych, które przy wysokim momencie obrotowym powodują, iż funkcja kosztów w algorytmie optymalizującym powinna być skorygowana w zależności od tego odsetka.

Systemy sterowania stanem skrzyżowania

Przez ostatnie kilka dekad systemy sterowania ruchem ewoluowały, rozwijały się i były dostosowywane zarówno do określonych miejsc, jak i zmieniających się dynamicznie warunków. Nie ma jednej określonej recepty na rozwiązanie zatorów drogowych, tak jak i nie ma jednego systemu dopasowanego do warunków każdej sieci miejskiej (Dotoli, Pia Fanti, Meloni, 2006).

Uwarunkowania techniczne, ekonomiczne oraz społeczne determinują wybór odpowiedniego systemu sterowania ruchem na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną lub wpływają na system sterowania całą logistyką transportu w mieście. Obecnie mamy do czynienia z przełomem IV i V generacji systemów sterowania ruchem. Do najczęściej wykorzystywanych obecnie systemów należą (Cegielski, 2017):

- SCOOT – *Split, Cycle and Offset Optimization Technique*;
- SCATS – *Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*;
- DYPIC – *Dynamic Programmed Intersection Control*;
- OPAC – *Optimized Policies for Adaptive Control*;
- UTOPIA – *Urban Traffic Optimisation by Integrated Automation*;
- BALANCE – *Balancing Adaptive Network Control Method*.

Metodę SCOOT opracował P.B. Hunt i jest ona zaliczana do metod sterowania IV generacji. System powstał jako odpowiedź na niewydajne rozwiązania oparte na programowaniu sterowników sygnalizacji świetlnej w sposób stałoczasowy. Rozwiązanie to działa w trybie online. System ten pozwala na zarządzanie ruchem nie tylko na jednym skrzyżowaniu, ale również na całym obszarze, który podzielony jest na podobszary. System SCOOT dokonuje częstych zmian parametrów sterowania sygnału i dopasowuje je do wybranego modelu sterowania ruchem.

Kolejnym z systemów, jakie można dostrzec w największych aglomeracjach miejskich, jest adaptacyjny system SCATS. Został on opracowany w Australii. Jest podobny do systemu SCOOT, lecz przypisany do III generacji inteligentnych systemów sterowania ruchem. Podstawową różnicą między systemem SCOOT a opisanym wcześniej SCATS jest to, iż nie posiada on modelu ruchu ani żadnych optymalizatorów planów ruchu. Wybiera on najlepszy czas trwania danej fazy z kilku posiadanych, gotowych w zależności od bieżącej sytuacji rozwiązań na skrzyżowaniu (Galińska, Labuch, Malinowski, 2019).

Metodę sterowania ruchem DYPIC opracowali D. Robertson oraz R. Bretheron, a jej główne założenia opierają się na optymalizacji za pomocą programowania dynamicznego odosobnionego prostego skrzyżowania z dwoma wzajemnie kolizyjnymi potokami pojazdów.

Autorzy tej metody opierali się na założeniach, iż natężenie ruchu jest znane lub możliwe do przewidzenia w najbliższych horyzontach czasowych. Rozwiązanie to nie przewiduje sytuacji nietypowych oraz dynamicznych zmian potoku pojazdów. Stąd rozwiązanie to może być stosowane jedynie w teoretycznym rozważaniu sterowania ruchem na odosobnionym skrzyżowaniu w sytuacji dużej stabilności ruchu lub jako porównanie wyników z innymi systemami (Jastrzębski, 2014).

Kolejnym, ważnym systemem sterowania ruchem jest OPAC, który powstał już w latach osiemdziesiątych dwudziestego wieku. Istotą działania tego systemu stanowi suma całkowitego opóźnienia oraz wyrażona liczbowo liczba zatrzymań. System korzysta z danych dostarczonych przez szereg czujników i detektorów oraz z danych zamodelowanych do wyznaczania odpowiedniego czasu trwania każdej z faz ruchu (Gartner, 1983).

Długość każdej z faz podlega również ograniczeniu ze względu na minimalną i maksymalną długość fazy światła zielonego oraz długość wirtualnego cyklu opracowanego na podstawie pozyskanych danych. Wirtualny cykl wyrażony w długości czasu trwania wyliczany jest na bieżąco na podstawie zmian funkcji kosztów skrzyżowania (opóźnienie, liczba zatrzymań lub inne parametry kluczowe oraz typowe dla danego skrzyżowania). Zmiany z cyklu na cykl oscylują w granicach zaledwie 1 sekundy. Dzięki temu system wypracowuje lokalne decyzje dotyczące sterowania sygnalizacją świetlną. Poprawiając i nie zaburzając funkcjonowania całej sieci, dokonują swego rodzaju równoważenia stanów skrzyżowań.

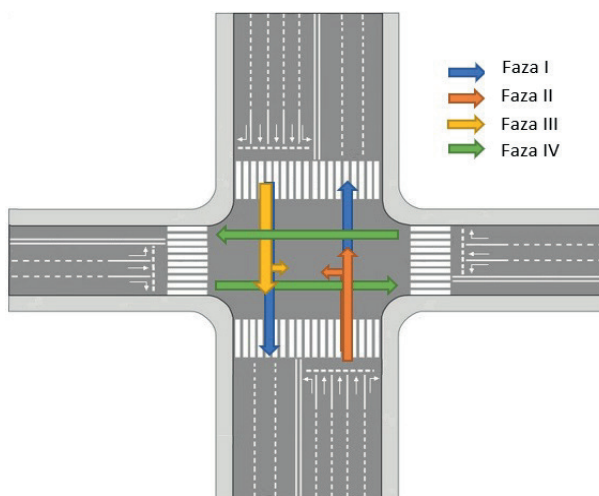
Być może najczęściej wykorzystywanym systemem do sterowania ruchem na skrzyżowaniach w sieci miejskiej z wykorzystaniem sygnalizacji świetlnej jest UTOPIA. Jest to adaptacyjna metoda sterowania ruchem opracowana przez włoskich inżynierów. Jest to system opracowany głównie z myślą o optymalizacji miejskiej sieci skrzyżowań z nadrzędnym założeniem priorytetu dla komunikacji w danym mieście (Gaca, Suchorzewski, 2008).

System UTOPIA optymalizuje ustawienia SPOT każdego skrzyżowania jako wieloetapowy i złożony proces decyzyjny. System ten doskonale sprawdza się w funkcjonowaniu obszarowym ponieważ do ustaleniu planu sterowania sygnalizacją świetlną wykorzystuje się dane z całego systemu poprzez optymalizowane, wybrane dane na poziomie centralnym dla każdego skrzyżowania w sieci.

W tej metodzie bardzo często wykorzystuje się do optymalizacji drzewa podziałów jako technikę służącą zmniejszeniu obszaru poszukiwań rozwiązania optymalnego (Gryga, Wojtaszek, Firlejczyk, 2013). Ponadto UTOPIA czerpie również z programowania dynamicznego, ponieważ rozwiązanie optymalne określone dla poziomu lokalnego będzie równocześnie rozwiązaniem optymalnym dla całego systemu sterowania na poziomie obszaru sterowania włączonego do tego systemu. Ten adaptacyjny, zdecentralizowany system o rozproszonej inteligencji często nazywany jest systemem UTOPIA/SPOT z uwagi na dwa poziomy dokonywania optymalizacji funkcji kosztów oraz ustawień sygnalizacji świetlnej – poziom centralny UTOPIA oraz poziom lokalny SPOT (Katwijk, Schutter, Hellendoorn, 2006).

Badanie stanu wybranego skrzyżowania

Podstawą badań była analiza obszarowego systemu sterowania ruchem w Łodzi. W niniejszej pracy przedstawione zostały efekty szczegółowej analizy skrzyżowania Al. Włókniarzy (część Drogi Krajowej nr. 91) z ul. Wielkopolską oraz ul. Lutomierską.



Rys. 1. Skrzyżowanie Al. Włókniarzy z ul. Wielkopolską/ul. Lutomierską w Łodzi z uwzględnieniem faz sygnalizacji świetlnej

Źródło: opracowanie własne.

Zauważono, że w trakcie każdego cyklu sygnalizacji świetlnej w godzinach szczytu komunikacyjnego obserwuje się pewną część czasu każdej fazy, podczas których na skrzyżowaniu nie znajduje się żaden pojazd. Ponadto zaobserwowano, iż przez większość czasu faz międzyzielonych na skrzyżowaniu również nie znajduje się żaden pojazd. Aby potwierdzić obserwowane zjawisko postanowiono zbadać czas, podczas którego na skrzyżowaniu rzeczywiście nie znajduje się żaden pojazd w każdej fazie cyklu.

Dla przedstawionych na powyższym rysunku faz sygnalizacji świetlnej otrzymano wyniki badań przedstawione w tabeli poniżej:

Tabela 1. Czas fazy, przez który na skrzyżowaniu nie znajduje się żaden pojazd

L.p.	Skrzyżowanie Alei Włókniarzy z Ulicą Wielkopolską/Lutomierską, Łódź							
	Faza 1		Faza 2		Faza 3		Faza 4	
	w trakcie	między zielona	w trakcie	między zielona	w trakcie	między zielona	w trakcie	między zielona
1	2,7	15,3	4,3	2,4	0,0	2,7	1,2	1,2
2	3,9	15,6	3,5	3,5	1,2	3,1	1,1	5,5
3	0,0	14,5	3,7	1,3	3,0	2,1	0,0	3,2
4	3,4	16,5	1,2	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	13,1	0,9	2,0	2,7	4,2	1,4	2,1
6	2,8	14,0	3,2	3,2	1,6	3,9	0,0	2,4
7	1,6	11,3	1,2	3,8	2,4	2,6	0,0	3,2
8	1,9	17,2	2,3	2,3	1,1	2,1	1,2	4,2
9	0,0	12,1	0,5	2,1	3,2	5,3	2,1	2,5
10	1,0	9,2	2,4	1,8	2,1	4,7	1,2	4,6
11	0,3	12,0	1,6	2,2	2,0	2,1	1,9	3,2
12	0,0	6,7	7,1	2,4	2,8	3,7	2,4	4,0
13	1,0	19,1	2,1	3,1	2,5	0,0	0,0	2,9
14	2,1	12,5	1,6	1,8	1,9	2,4	2,1	1,8
15	1,8	13,1	2,7	2,2	2,6	6,2	2,6	1,9
16	2,5	9,0	2,1	2,6	2,7	2,9	1,6	2,3
17	4,7	12,1	1,2	2,1	2,3	2,4	2,1	1,9
18	2,3	9,8	3,2	2,0	1,9	3,1	0,0	0,0
19	4,2	3,2	2,3	1,5	2,8	2,2	2,3	2,4

20	1,0	6,7	2,7	2,9	0,0	1,9	1,6	2,7
21	2,3	5,0	3,1	3,1	2,1	4,2	3,2	2,3
22	0,7	9,3	1,9	2,3	2,4	3,4	0,0	3,1
23	3,2	6,5	2,3	2,6	3,2	2,2	0,0	2,9
24	2,0	13,1	2,1	1,6	2,9	2,8	2,1	2,8
25	2,4	9,4	1,9	2,1	0,0	0,0	1,3	3,4
26	2,1	11,4	2,6	2,6	1,8	3,4	3,1	0,0
27	3,9	2,4	2,1	1,9	2,4	2,1	0,0	2,0
śred- nia	2,0	11,1	2,4	2,4	2,0	2,8	1,3	2,5
suma	26,4							

Źródło: opracowanie własne.

Czas w tabeli 1 wyrażony został w sekundach. Numer fazy odpowiada fazie sygnalizacji świetlnej zobrazowanej zgodnie z rysunkiem nr 1. Kolumna „w trakcie” oznacza najdłuższy moment danej fazy, kiedy przez skrzyżowanie nie przejeżdża żaden pojazd.

Kolumna „międzyzielona” oznacza długość fazy międzyzielonej pomiędzy następującymi po sobie fazami, kiedy to na skrzyżowaniu nie pojawia się żaden pojazd. Każdy wynik w tabeli został pomniejszony o 1 sekundę w celu uniknięcia błędu pomiarowego (czas reakcji badacza obserwującego skrzyżowanie). Wiersz „średnia” oznacza średni czas w każdej z kolumn, nie biorąc pod uwagę wartości mniejszych niż 1 sekunda.

Wartości te zostały wyeliminowane z wyliczania średniej z powodu tego, iż czas ten jest określany jako czas reakcji kierowcy, zatem wartości poniżej sekundy nie są w tym wypadku miarodajne. Pozycja „suma” to średni czas faz w cyklu sygnalizacji świetlnej, podczas którego na skrzyżowaniu nie znajduje się żaden pojazd.

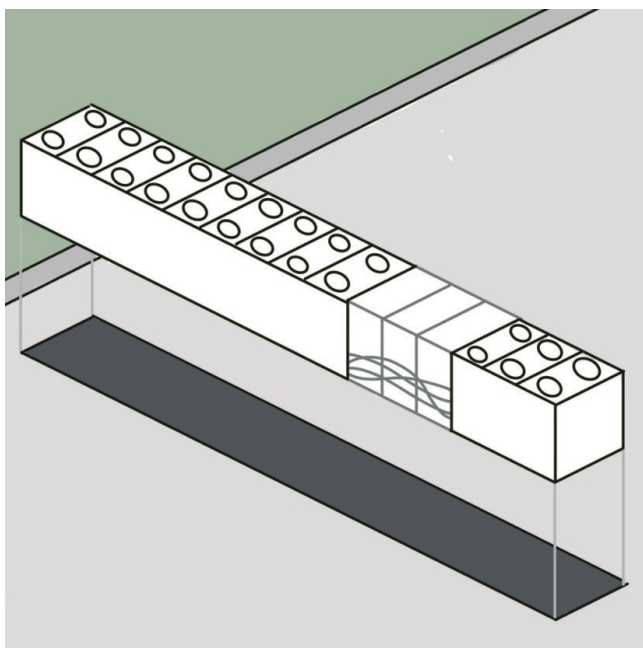
Z przeprowadzonych badań wynika, iż na badanym skrzyżowaniu występują luki czasowe w każdej z faz oraz między fazami, podczas których na skrzyżowaniu nie znajduje się żaden pojazd. W trakcie I fazy najdłuższe momenty, w których na skrzyżowaniu nie było żadnego pojazdu wynosiły średnio 2 sekundy, w trakcie II fazy średnio 2,4 sekundy, w trakcie III fazy średnio 2 sekundy, natomiast w trakcie fazy IV średnio 1,3 sekundy.

Pomiędzy fazą I a fazą II średnio żadne auto na skrzyżowaniu nie pojawiało się przez 11,1 sekundy, pomiędzy fazami II a III średnio 2,4 sekundy, pomiędzy

fazą III a IV średnio 2,8 sekundy oraz pomiędzy fazami IV a I średnio 2,5 sekundy. Łącznie na skrzyżowaniu średnio w całym cyklu trwającym około 2 minuty i 21 sekund pojazdy na skrzyżowaniu są nieobecne przez ponad 26 sekund. Zatem średni odsetek czasu niewykorzystanego do długości całego cyklu wynosi ponad 13,5%.

Propozycja optymalizacji

Aby system sterowania ruchem precyzyjnie był w stanie określać, ile i jakich pojazdów wjechało i wyjechało ze skrzyżowania, proponuje się wprowadzenie nowego rodzaju czujnika. Czujnik belkowy jest to rozwiązanie czerpiące z detektorów zastosowanych w wagach preselekcyjnych. Schemat proponowanego czujnika został przedstawiony na rysunku poniżej.



Rys. 2. Schemat budowy czujnika belkowego

Źródło: opracowanie własne.

Przedstawiona powyżej belka jest propozycją czujnika, który składa się z szeregu mniejszych czujników rezystancyjnych. Umieszczenie czujników na wlotach oraz wylotach pozwoli na jednoznaczną identyfikację bazy danych wejściowych oraz bazy danych wyjściowych, porównanie danych, a w przypadku stwierdzenia pewności, iż wszystkie pojazdy opuściły skrzyżowanie skrócenia fazy międzyzielonej.

Samochód wjeżdżający na skrzyżowanie przejeżdża przez pierwszą linię czujników i zarejestrowane zostają kluczowe parametry. Następnie za pomocą terminala zostają one przesłane do chmury obliczeniowej. W momencie przejazdu tego pojazdu przez linię czujników belkowych na wylocie skrzyżowania zostają zarejestrowane te same parametry. Następnie po przesłaniu do chmury obliczeniowej zostają porównane z danymi wejściowymi. Jeżeli dane te są identyczne, system jest w stanie jednoznacznie stwierdzić, że wszystkie pojazdy, które wjechały na skrzyżowaniu opuściły je. Informacja ta pozwala na skrócenie wybranej fazy cyklu ruchu działając na podstawie stanu skrzyżowania w formule online, a nie opierając się jedynie na określonej predykcji.

Podsumowanie

Dynamiczny rozwój miast oraz stale zwiększająca się cyrkulacja pojazdów na ulicach wymusza na inżynierach ruchu tworzenie coraz to bardziej zaawansowanych systemów sterowania ruchem. Obecnie nie wystarcza już optymalizowanie ruchu na pojedynczym węźle – kluczowe staje się zarządzanie całą siecią skrzyżowań oraz koordynacja ich chociażby z pojazdami komunikacji miejskiej.

Za optymalizację ustawień oraz programów sygnalizacji świetlnej odpowiadają zaawansowane systemy. Czerpią one dane z wielu detektorów oraz czujników i na tej podstawie ustalają optymalne ramowe programy ustawień sygnalizacji na najbliższe cykle. Jest to metoda pozwalająca optymalizować ruch oraz koordynować go w sposób zwiększający przepustowość miejskich szlaków komunikacyjnych.

Jednakże nawet najbardziej zaawansowane systemy i algorytmy nie są obecnie w stanie w czasie rzeczywistym reagować na zmieniające się na drogach dynamicznie sytuacje. Obecnie większość systemów dokonuje optymalizacji na podstawie danych historycznych, na podstawie predykcji na najbliższe cykle.

W związku z tym określony plan sygnalizacji świetlnej jedynie z mniejszym lub większym prawdopodobieństwem będzie pasował do warunków, które w przyszłym cyklu wystąpią w korytarzu ruchu. Z przeprowadzonych badań wynika, iż w nawet tak zaawansowanym systemie jaki funkcjonuje w Łodzi, nawet 20% czasu całego cyklu jest marnowana w fazach, w których wszystkie pojazdy opuściły już skrzyżowanie.

Literatura

- Aleksandrowicz J., Piwowarczyk M., 2016, *Sposoby detekcji pojazdów transportu zbiorowego, Transport miejski i regionalny*, Kraków.
- Bertsekas D.P., 1995, *Dynamic Programming and Optimal Control*, Athena Scientific, Belmont.
- Cegielski A., 2017, *Podstawy optymalizacji*, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra.
- Dąbrowski A., Schumann A., Woleński J., 2015, *Podejmowanie decyzji: pojęcia, teorie, kontrowersje*, Copernicus Center Press, Kraków.
- Dotoli M., Pia Fanti M., Meloni C., 2006, *A signal timing plan formulation for urban traffic control*, Control Engineering Practice, nr 14, Bari, s. 1297-1311.
- Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., 2008, *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*, W.K.Ł. Warszawa.
- Galińska B., Malinowski D., Labuch J., 2019, *Improving the capacity of crossroads with traffic lights. Using Smart Traffic Control Systems Supported By Innovative Beam Sensors*, Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, Katowice.
- Gartner N.H., 1983, *OPAC: A Demand-Responsive Strategy For Traffic Signal Control*, Journal of The Transportation Research Council, nr 909, s. 75-81.
- Gryga Ł., Wojtaszek M., Firlejczyk G., 2013, *Obszarowy system sterowania ruchem i nadawanie priorytetu dla transportu zbiorowego w Krakowie*, Transport Miejski i regionalny, Zarząd Infrastruktury Komunalnej i Transportu w Krakowie, Kraków, s. 4-12.
- Gutek Z., *Olsztyńskie centrum sterowania ruchem*, online: <https://edroga.pl/inzynieria-ruchu/olsztynskie-centrum-sterowania-ruchem-2105158> [dostęp: 21.03.2020].
- Horn J., Nafpliotis N., Goldberg D.E., 1994, *A niche Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization*, Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence, Orlando.
- Jastrzębski W., 2014, *Dylematy i błędy z modelach i prognozach ruchu, Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Oddział w Krakowie, Kraków, s. 137-165.
- Kamiński T., Oskarbski J., 2017, *Wdrażanie Systemów ITS na Przykładzie Miasta Łodzi i Bydgoszczy*, Transport Samochodowy, Politechnika Gdańska, Gdańsk.
- Katwijk R T., Schutter B., Hellendoorn J., 2006, *Traffic adaptive control of a single intersection: A taxonomy of approaches*, 11th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, Delft, The Netherlands.
- Pamuła W., 2011, *Metody optymalizacji wykorzystywane przez miejskie systemy sterowania ruchem*, Logistyka nr 3, s. 2157-2168.

Summary

Traffic light control algorithms – the optimization of an intersection

This article presents the current state of knowledge on the optimisation of traffic light control systems. It describes the most important and commonly used traffic light control systems and the approaches for determining their optimal solutions. This article also presents the authors' empirical research on a chosen intersection with particular a focus on time losses in given phase of the cycle. The authors also propose a device which allows for collecting and analysing the parameters of intersections in order to optimise the real-time parameters and to use the phases of this cycle.

Keywords: optimization, intersection status, intelligent transportation system, traffic light control system.