

Odporny system sterowania ruchem drogowym bazujący na optymalizacji wielokryterialnej

Dobrosław Cieśliewicz

Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313, Szczecin

Streszczenie: Model matematyczny jest uproszczonym odwzorowaniem pewnych zjawisk, które uwzględnia jedynie cechy istotne. W dzisiejszych czasach coraz większym problemem stają się przeciążone infrastruktury drogowe, szczególnie w większych ośrodkach miejskich. Problem ten można w pewnym stopniu zredukować, stosując zaawansowane algorytmy sterowania. W niniejszym artykule podjęto próbę sterowania przepływem ruchu drogowego w skali makroskopowej. W tym celu użyto adaptacji dyskretnego, nieliniowego modelu matematycznego. Przy wykorzystaniu środowiska programistycznego MATLAB opracowano i zoptymalizowano układ sterowania niewielką siecią komunikacyjną. Następnie, zakładając przykładowy scenariusz, przeprowadzono dla tej sieci badania symulacyjne.

Słowa kluczowe: model matematyczny, ruch drogowy, sterowanie dyskretne, optymalizacja wielokryterialna, symulacja

1. Wprowadzenie

Ciągły rozwój motoryzacji i transportu, jaki obserwuje się w ostatnich dekadach, w znaczący sposób stymuluje potrzeby społeczeństw w zakresie logistyki. Nieustannie zwiększająca się liczba pojazdów oraz rosnące potrzeby komunikacyjne generują szereg problematycznych zagadnień, jak np. wzrost emisji, występujących w spalinach, szkodliwych związków chemicznych do atmosfery oraz znaczny wzrost poziomu natężenia hałasu. Z punktu widzenia gospodarki, kluczowym problemem jest przeciążenie infrastruktury drogowej. Jest ono wyjątkowo widoczne w dużych ośrodkach urbanistycznych w tzw. godzinach szczytu, gdy tworzą się zatory drogowe.

Można wyróżnić przynajmniej parę metod, które pozwalają na rozwiązanie problemu przeciążonej infrastruktury. Niewątpliwie podstawową i powszechnie stosowaną, jest metoda rozbudowy tejże infrastruktury o nowe ciągi komunikacyjne, a także modyfikacja już istniejących. Jest to niestety rozwiązanie bardzo kosztowne, które w przypadku ośrodków miejskich o dużym zagęszczeniu urbanistycznym jest właściwie rozwiązaniem nie-realnym, gdyż wymuszałoby ono gruntowną przebudowę już istniejącej infrastruktury. Innym podejściem, bardziej restrykcyjnym w swych założeniach, jest ograniczenie lub nawet całkowita likwidację możliwości korzystania z prywatnych środków transportu na terenie większych ośrodków miejskich poprzez wprowadzenie odpowiednich regulacji prawnych. Rozwiązanie

to jest z pewnością znacznie tańsze niż poprzednie, jednakże w zasadniczy sposób wpływa na funkcjonowanie społeczeństwa w mieście, wymuszając korzystanie z publicznych środków transportu. Podstawową wadą tej metody jest oczywiście obniżenie komfortu życia mieszkańców, a co za tym również idzie – możliwość wzrost niezadowolenia społecznego.

Algorytmy sterowania ruchem drogowym są stosunkowo niedrogą alternatywą w stosunku do pierwszego z przedstawionych rozwiązań, a także nie zakładają drastycznych ograniczeń w obecnym ruchu drogowym. Stosowane są do efektywnego zarządzania sygnalizacją świetlną, dzięki czemu ograniczają powstawanie zatorów komunikacyjnych i zwiększają bezpieczeństwo na drodze. Umożliwiają wdrożenie tzw. akomodacyjnego systemu sterowanie ruchem drogowym, który współdziała z czujnikami mierzącymi natężenie ruchu oraz inteligentnymi systemami zarządzającymi [1–3]. W tym miejscu warto wspomnieć, że inteligentne systemy transportowe (ITS), które opierają się na syntezie elektroniki pojazdowej z technologiami telekomunikacyjnymi i informatycznymi, posiadają systemy modelowania ruchu drogowego, pozwalające na dokładne testowanie opracowanych rozwiązań przed ich implementacją do rzeczywistego systemu sygnalizacji świetlnej [4]. Przyczynia się to w sposób znaczący do zwiększenia stopnia niezawodności (a pośrednio także rentowności) systemów akomodacyjnych.

Problem odpornego sterowania ruchem drogowym jest zagadnieniem wciąż aktualnym w literaturze. Powstawanie coraz większych ośrodków miejskich niesie ze sobą nowe wyzwania w zakresie sprawnego sterowania przepływem pojazdów w ruchu ulicznym. Niewątpliwie jednym z rozwiązań dla dużych sieci ruchu miejskiego może być wprowadzenie dwupoziomowego systemu kontroli ruchu [12]. Na poziomie koncepcyjnym, poprawę przepustowości ruchu na skrzyżowaniach może zapewnić m.in. uwzględnienie w algorytmach sterujących wpływu niepewności [13]. Na poziomie infrastrukturalnym przyczynić się do tego może chociażby zastosowanie pasów wyjazdowych przy skręcaniu w lewo (ang. *exit lanes for left-turning*), pod warunkiem właściwego zoptymalizowania pracy sygnalizacji świetlnej [14]. Interesu-

Autor korespondujący:

Dobrosław Cieśliewicz, dcieslewicz396@wp.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 15.10.2020 r., przyjęty do druku 10.11.2020 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

jące jest również podejście podziału dnia pracy na kilka okresów kontrolnych i dostosowania strategii kontroli ruchu do aktualnie panującego okresu [15]. Problematyka sterowania nierozzerwalnie związana jest z kwestią pomiaru odpowiednich parametrów w układzie. W pracy [17] zaproponowano liczne rozwiązania na poziomie konstrukcyjnym i algorytmicznym, umożliwiające opracowanie efektywnych systemów pomiarowych w ruchu drogowym.

Celem niniejszej pracy jest opracowanie odpornego systemu sterowania ruchem drogowym dla nieskomplikowanej sieci komunikacyjnej, który w zależności od przypadku umożliwi skuteczne unikanie (a przynajmniej ograniczanie) zatorów. Ponadto opis struktury wspomnianego systemu sterowania, a także przedstawienie i omówienie wyników badań symulacyjnych wykonanych przy jego użyciu.

Zasadniczym zagadnieniem związanym z modelowaniem ruchu ulicznego jest oczywiście zastosowany model przepływu. W ostatnim czasie widoczne są, także w tym obszarze, tendencje do tworzenia hybrydowych układów dynamicznych, łączących w sobie cechy zarówno układów ciągłych, jak i dyskretnych [16]. W niniejszej pracy wykorzystano model, stanowiący modyfikację [5] makroskopowego modelu METANET [6]. Został on przedstawiony w punkcie drugim. Punkt trzeci poświęcony jest opracowanemu układowi sterowania, zaś punkt czwarty porusza zagadnienie optymalizacji tego układu. Piąty punkt prezentuje wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych. Motywacją autora do podjęcia się pracy nad tym tematem była chęć zrozumienia i przetestowania makroskopowego modelu ruchu ulicznego na konkretnym przypadku, a także jego osobiste zainteresowanie problematyką współczesnego transportu.

2. Model matematyczny

W niniejszej pracy nie jest prezentowany rozbudowany opis makroskopowego modelu ruchu ulicznego od strony analitycznej. Nieliniowe, dyskretnie równania stanu, na których bazuje wykorzystywany model zostały szczegółowo omówione w [5]. W tej części pracy zostaną jedynie pobieżnie przedstawione założenia, na których wspomniany model bazuje wraz z objaśnieniem poszczególnych zmiennych.

Wykorzystywany w pracy model matematyczny jest dyskretny i deterministyczny, o parametrach rozłożonych. Opiera się na dwóch podstawowych prawach fizyki, tj. na prawie zachowania masy (zachowania pojazdu) oraz na prawie zachowania pędu. Ponieważ nie jest to układ o parametrach skupionych, nie można go opisać równaniami stanu ani też macierzą transmitancji.

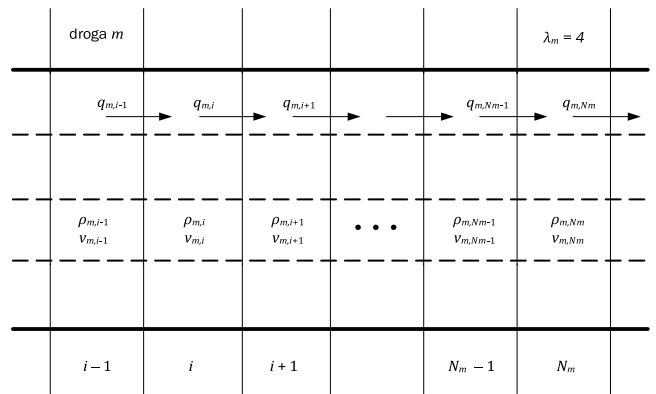
Poniżej podano parę podstawowych założeń, na których ów model bazuje:

- 1) Sieć komunikacyjna złożona jest z M dróg.
- 2) Każda droga m dzieli się na N_m odcinków o długości L_m .
- 3) Każda droga ma konkretną liczbę pasów ruchu. Liczba ta jest określona przez wartość λ_m .

Rysunek 1 przedstawia schemat drogi zgodny z wcześniejszymi założeniami. Droga m , złożona z czterech pasów ruchu, została podzielona na N_m segmentów. Każdy segment opisany jest trzema wielkościami: ρ , v , q .

W rozpatrywanym modelu dany i -ty odcinek (segment) drogi m w pewnej chwili k jest opisany dwoma zmiennymi stanu. Są nimi: gęstość $\rho_{m,i}(k)$ [poj./km/pas] i prędkość $v_{m,i}(k)$ [km/h]. Dodatkową zmienną jest natężenie ruchu pojazdów $q_{m,i}(k)$, które jest iloczynem gęstości, prędkości i liczby pasów ruchu.

Wartość pierwszej zmiennej stanu, gęstości, dla chwili przyszedłej $k + 1$ jest obliczana w oparciu o gęstość w chwili obecnej k oraz różnicę natężeń przepływu na dwóch sąsiednich odcinkach drogi. Przy jest obliczaniu uwzględnia się również tzw. nadwyżkę w bilansie przepływu $\hat{q}_{m,i+1}(k)$, która występuje, jeżeli zostanie



Rys. 1. Schemat zdyskretyzowanej drogi
Fig. 1. Schematic diagram of discretized road

osiągnięta maksymalna gęstość pojazdów $\bar{\rho}_{m,i+1}$ na kolejnym ($i + 1$) segmencie drogi m . Wyliczona zgodnie z zasadą przepływu pomocnicza wartość gęstości $\hat{\rho}_{m,i}(k + 1)$ jest następnie ograniczana, dzięki czemu wyznaczona finalnie gęstość pojazdów $\rho_{m,i}(k + 1)$ nie przyjmuje wartości ujemnych oraz nie przekracza ustalonej wartości maksymalnej.

Ogólna zasada wyliczania średniej prędkości grupowej pojazdów (druga zmienna stanu) dla chwili $k + 1$ jest taka sama, jak w przypadku gęstości, tzn. najpierw oblicza się pomocniczą, nieograniczoną wartość prędkości $\hat{v}_{m,i}(k + 1)$ a następnie stosuje się odpowiednie ograniczenia, mające na celu urealnić uzyskaną wielkość. Wspomnianą wartość pomocniczą oblicza się, dodając do prędkości z chwili k trzy człony składowe

- 1) człon korygujący wyliczany na podstawie różnicy gęstości na segmentach $i + 1$ oraz i ,
- 2) człon aktualizujący obliczany na podstawie różnicy prędkości na odcinkach i oraz $i - 1$,
- 3) człon korygujący wyliczany na podstawie różnicy prędkości rzeczywistej i teoretycznej.

Wzór na prędkość teoretyczną opiera się na trzech parametrach drogi - $v_{free,m}$, $\rho_{crit,m}$ oraz a_m . Prędkość $v_{free,m}$ to średnia prędkość wolnego przepływu drogi m . Gęstość krytyczna $\rho_{crit,m}$ jest to gęstość, przy której uzyskiwany przepływ jest możliwie największy. Parametr wykresu fundamentalnego a_m określa wpływ gęstości pojazdów na natężenie ruchu na danej drodze.

Parametrami modelu są: okres dyskretyzacji T , stała czasowa τ , stała antycypacji γ , stała κ . Parametr τ wpływa na przyspieszenia uzyskiwane przez pojazdy. Parametry γ oraz κ wpływają na wielkość przeregulowań uzyskiwanych na wykresie prędkości grupowej. Źle dobrane, powodują występowanie pików na wykresach natężenia przepływu i prędkości grupowej pojazdów. Dobrany okres dyskretyzacji T musi być na tyle mały, aby iloczyn $v_{free,m}T$ był mniejszy od długości pojedynczego odcinka drogi L_m . Pozwala to uniknąć sytuacji, w której pojazd poruszający się prędkością typową dla wolnego przepływu drogi, może przebyć cały odcinek drogi w czasie mniejszym niż przyjęty okres dyskretyzacji.

Tak zdefiniowany model pozwala na tworzenie dosyć rozległych sieci komunikacyjnych, jednocześnie unikając problemów bazowego modelu METANET [6].

3. Układ sterowania

W dalszej części artykułu przedstawione zostaną dwa autorskie algorytmy sterujące. Nim jednak zostaną one szczegółowo omówione, należy wyjaśnić kilka ważnych kwestii. Odporność w kontekście prezentowanego układu sterowania należy rozumieć jako zdolność układu do poprawnego sterowania ruchem

drogowym przy dynamicznie zmieniającej się liczbie, gęstościach oraz prędkościach grupowych pojazdów. Wyznaczane sterowanie jest odporne, a więc nie prowadzi do uzyskania nierzeczywistych wyników np. ujemnych czasów pracy poszczególnych sygnalizatorów. Oznaczenia m i n są stosowane do określenia dwóch różnych numerów dróg. Przez określenie „sygnalizator pierwszy” powinno się rozumieć „sygnalizator przy drodze m ”, natomiast przez określenie „sygnalizator drugi” należy rozumieć „sygnalizator przy drodze n ”. Symbol $\Theta_{1 \times j}$ stosowany będzie do oznaczenia wektora poziomego o wymiarze j , składającego się z samych zer. Symbol $\mathbf{1}_{1 \times j}$ stosowany będzie do oznaczenia wektora poziomego o wymiarze j , składającego się z samych jedynek. Objasnienia wymaga również, stosowane przy opisie wektorowych sygnałów sterujących $\mathbf{u}(c)$, oznaczenie c . Jest to pewien okres czasu, składający się z określonej liczby chwil k , przy czym dla różnych c , liczba chwil k może ulec zmianie. Na przykład, dla $c = 1$ oraz $c = 2$, można zdefiniować sygnały sterujące $\mathbf{u}(c)$:

$$\mathbf{u}(c) = \mathbf{u}(1) = [0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0]$$

$$\mathbf{u}(c) = \mathbf{u}(2) = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0]$$

W pierwszym przypadku, liczba chwil wyniosła $k = 8$, zaś w drugim $k = 13$.

Regulator czterostawny bazuje na prostej koncepcji porównywania dwóch wartości zmiennej gęstości dla ostatnich segmentów dróg z pewną wartością stałą, zwaną wartością graniczną. W zależności od wyników tychże porównań, algorytm generuje odpowiednie sygnały sterujące. Zasadę działania można przedstawić za pomocą wzoru:

$$\{\mathbf{u}_1(c+1), \mathbf{u}_2(c+1)\} = \begin{cases} \{\mathbf{u}_{1a}, \mathbf{u}_{2a}\} & \text{dla } \rho_{m, N_m}(k) \leq \rho_{gr} \wedge \rho_{n, N_n}(k) \leq \rho_{gr} \\ \{\mathbf{u}_{1b}, \mathbf{u}_{2b}\} & \text{dla } \rho_{m, N_m}(k) > \rho_{gr} \wedge \rho_{n, N_n}(k) \leq \rho_{gr} \\ \{\mathbf{u}_{1c}, \mathbf{u}_{2c}\} & \text{dla } \rho_{m, N_m}(k) > \rho_{gr} \wedge \rho_{n, N_n}(k) > \rho_{gr} \\ \{\mathbf{u}_{1d}, \mathbf{u}_{2d}\} & \text{dla } \rho_{m, N_m}(k) \leq \rho_{gr} \wedge \rho_{n, N_n}(k) > \rho_{gr} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

$\rho_{m, N_m}(k)$ – gęstość pojazdów dla ostatniego segmentu drogi m ,
 $\rho_{n, N_n}(k)$ – gęstość pojazdów dla ostatniego segmentu drogi n ,
 ρ_{gr} – wartość graniczna gęstości pojazdów,
 $\mathbf{u}_1(c+1)$ – sygnał sterujący dla sygnalizatora pierwszego,
 $\mathbf{u}_2(c+1)$ – sygnał sterujący dla sygnalizatora drugiego,
 $\mathbf{u}_{1a}, \mathbf{u}_{2a}, \mathbf{u}_{1b}, \mathbf{u}_{2b}, \mathbf{u}_{1c}, \mathbf{u}_{2c}, \mathbf{u}_{1d}, \mathbf{u}_{2d}$ – pomocnicze sygnały dla poszczególnych przypadków, definiowane następująco:

dla przypadku pierwszego (a):

$$\mathbf{u}_{1a} = [\mathbf{1}_{1 \times t_{kr}}, \Theta_{1 \times 1}, \Theta_{1 \times t_{kr}}, \Theta_{1 \times 1}] \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_{2a} = [\Theta_{1 \times t_{dl}}, \Theta_{1 \times 1}, \mathbf{1}_{1 \times t_{kr}}, \Theta_{1 \times 1}] \quad (3)$$

dla przypadku drugiego (b):

$$\mathbf{u}_{1b} = [\mathbf{1}_{1 \times t_{dl}}, \Theta_{1 \times 1}, \Theta_{1 \times t_{kr}}, \Theta_{1 \times 1}] \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_{2b} = [\Theta_{1 \times t_{dl}}, \Theta_{1 \times 1}, \mathbf{1}_{1 \times t_{kr}}, \Theta_{1 \times 1}] \quad (5)$$

dla przypadku trzeciego (c):

$$\mathbf{u}_{1c} = [\mathbf{1}_{1 \times t_{dl}}, \Theta_{1 \times 1}, \Theta_{1 \times t_{dl}}, \Theta_{1 \times 1}] \quad (6)$$

$$\mathbf{u}_{2c} = [\Theta_{1 \times t_{dl}}, \Theta_{1 \times 1}, \mathbf{1}_{1 \times t_{dl}}, \Theta_{1 \times 1}] \quad (7)$$

dla przypadku czwartego (d):

$$\mathbf{u}_{1d} = [\Theta_{1 \times t_{dl}}, \Theta_{1 \times 1}, \mathbf{1}_{1 \times t_{kr}}, \Theta_{1 \times 1}] \quad (8)$$

$$\mathbf{u}_{2d} = [\mathbf{1}_{1 \times t_{dl}}, \Theta_{1 \times 1}, \Theta_{1 \times t_{kr}}, \Theta_{1 \times 1}] \quad (9)$$

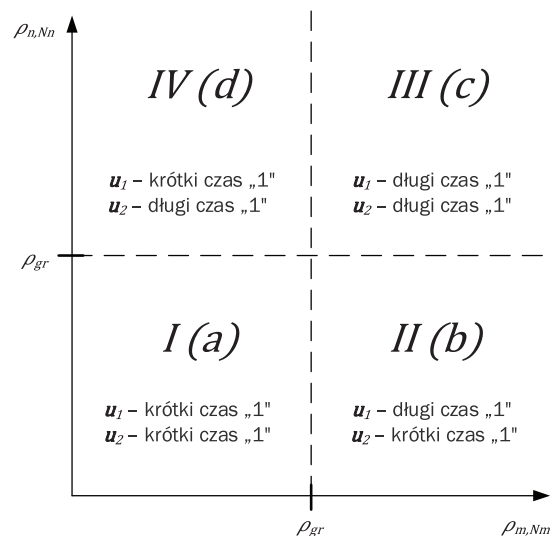
gdzie:

t_{dl} – dłuższy okres czasu, wyrażony w chwilach k ,

t_{kr} – krótszy okres czasu, wyrażony w chwilach k .

Ze wzoru (1) jednoznacznie wynika, że sygnały sterujące $\mathbf{u}_1(c+1)$ oraz $\mathbf{u}_2(c+1)$ wyznaczane są na podstawie porównania wartości $\rho_{m, N_m}(k)$ oraz $\rho_{n+1, N_{m+1}}(k)$ z wartością graniczną gęstości ρ_{gr} . Wyniki porównań określają, jaki przypadek będzie realizował algorytm. W zależności od przypadku (jest ich w sumie 4), regulator będzie przydzielał krótsze lub dłuższe czasy przejazdów na poszczególnych drogach.

Parametrami regulatora są stałe: $\rho_{gr}, t_{dl}, t_{kr}$. W celu lepszego przedstawienia zasady działania rozpatrywanego regulatora czteropozostawowego, zamieszczono Rysunek 2. Zastosowany zwrot czas „1” oznacza czas wyświetlania zielonego światła na danym sygnalizatorze, a więc czas przejazdu pojazdów na danej drodze.



Rys. 2. Schemat zasady działania regulatora czteropozostawowego
 Fig. 2. Schematic diagram of the principle of operation of the 4 step controller

Drugi z zaprezentowanych regulatorów jest regulatorem liniowym. Podobnie jak w poprzednim przypadku, również ten regulator steruje obiektem na podstawie gęstości. Jednakże, bierze on pod uwagę większą liczbę zmiennych – wartości gęstości z pięciu ostatnich segmentów dróg m i n . Na ich podstawie wyliczany jest tzw. współczynnik podziału czasu. Współczynnik ten określa, ile czasu na światło zielone należy przydzielić pierwszemu i drugiemu sygnalizatorowi. Algorytm opisują następujące równania:

$$\mathbf{u}_1(c+1) = [\mathbf{1}_{1 \times t_1}, \Theta_{1 \times 1}, \Theta_{1 \times (t_c - t_1)}, \Theta_{1 \times 1}] \quad (10)$$

$$\mathbf{u}_2(c+1) = [\Theta_{1 \times t_1}, \Theta_{1 \times 1}, \mathbf{1}_{1 \times (t_c - t_1)}, \Theta_{1 \times 1}] \quad (11)$$

gdzie:

$\mathbf{u}_1(c+1)$ – sygnał sterujący dla sygnalizatora pierwszego,

$\mathbf{u}_2(c+1)$ – sygnał sterujący dla sygnalizatora drugiego,

t_1 – czas trwania „1” w sygnale sterującym \mathbf{u}_1 (w chwilach k),

t_c – całkowity (sumaryczny) czas trwania „1” w sygnałach sterujących \mathbf{u}_1 i \mathbf{u}_2 (w chwilach k).

Czas t_c oblicza się z poniższej zależności:

$$t_c = t_{max} + t_{min} \quad (12)$$

gdzie: t_{max} i t_{min} – maksymalny i minimalny dopuszczalny czas trwania „1” na sygnalizatorze, wyrażony w chwilach k .

Natomiast czas t_k jest całkowitym zaokrągleniem zmiennej pomocniczej czasu \hat{t}_1 , z uwzględnieniem ograniczeń. Zależność ta wyraża się wzorem:

$$t_1 = \begin{cases} \hat{t}_1 & \text{dla } \hat{t}_1 \leq t_{max} \wedge \hat{t}_1 \geq t_{min} \\ t_{max} & \text{dla } \hat{t}_1 > t_{max} \\ t_{min} & \text{dla } \hat{t}_1 < t_{min} \end{cases}, \quad t_1 \in Z \quad (13)$$

gdzie: \hat{t}_1 – zmienna pomocnicza czasu, przyjmująca postać:

$$\hat{t}_1 = (1 + a)w_{pt}t_c + b \quad (14)$$

gdzie:

w_{pt} – współczynnik podziału czasu,
 a, b – multiplikatywna oraz addytywna stała korekcyjna.

Współczynnik podziału czasu wyliczany jest w następujący sposób:

$$w_{pt} = \frac{\sum_{i=N_m-4}^{N_m} \rho_{m,i}(k)}{\sum_{i=N_m-4}^{N_m} \rho_{m,i}(k) + \sum_{i=N_n-4}^{N_n} \rho_{n,i}(k)} \quad (15)$$

Wzory (10) i (11) definiują postać wektorowych sygnałów sterujących $\mathbf{u}_1(c+1)$ oraz $\mathbf{u}_2(c+1)$. Czasy trwania „1” dla poszczególnych sygnalizatorów zależą od wartości t_1 i t_c . Czas całkowity t_c wyliczany jest z prostego równania (12). Równanie to zapewnia niezerowy czas trwania „1” w sygnale sterującym \mathbf{u}_2 , w przypadku, gdy t_1 osiągnie wartość maksymalną t_{max} . Zmienna t_1 obliczana jest przy wykorzystaniu zmiennej pomocniczej \hat{t}_1 ze wzoru (13). We wzorze tym uwzględniono ograniczenia czasowe. Wspomniana zmienna pomocnicza uzyskiwana jest z równania (14) i zależy w głównej mierze od czasu całkowitego t_c oraz współczynnika podziału czasu w_{pt} .

Omawiany regulator ma w sumie cztery parametry: t_{max} , t_{min} , a, b . Dwa pierwsze są stałymi czasowymi, natomiast dwa kolejne pełnią rolę stałych korekcyjnych.

4. Optymalizacja układu

Ważną klasę algorytmów optymalizacyjnych stanowią algorytmy metaheurystyczne. Zaliczyć do nich należy m.in. algorytm genetyczny oraz tzw. algorytmy stadne, które łatwo adaptują się do przestrzeni rozwiązań [7, 8, 11]. Jednakże niezbędnym warunkiem skutecznej optymalizacji przy ich wykorzystaniu jest posiadanie odpowiednich funkcji kosztu. Na potrzeby analizowanego problemu zdefiniowano dwie funkcje kosztu. Pierwsza z nich bierze pod uwagę wartości zmiennej stanu gęstości na wszystkich odcinkach wchodzących w skład dróg m i n , dochodzących do skrzyżowania. Zasadę wyliczania wskaźnika jakości J^I można przedstawić w sposób analityczny:

$$J^I = J_m + J_n \quad (16)$$

gdzie:

J_m – wskaźnik jakości dla drogi m ,
 J_n – wskaźnik jakości dla drogi n .

Wskaźniki jakości dla poszczególnych dróg wylicza się, korzystając ze wzoru:

$$J_m = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{1}{N_m} \sum_{k=0} \hat{J}_m(k+1) \quad (17)$$

gdzie: $\hat{J}_m(k+1)$ – pomocnicza wartość wskaźnika jakości w chwili $k+1$, obliczana za pomocą schematu:

$$\hat{J}_m(k+1) = \begin{cases} w_{kr}(k)\rho_{m,i}(k+1) & \text{dla } \rho_{m,i}(k+1) > 50 \\ 0 & \text{dla } \rho_{m,i}(k+1) \leq 50 \end{cases} \quad (18)$$

gdzie: $w_{kr}(k)$ – współczynnik kary, wyznaczany ze wzoru:

$$w_{kr}(k) = \begin{cases} 1 & \text{dla } k = 0 \vee \rho_{m,i}(k) \leq 50 \\ w_{kr}(k-1) + 1 & \text{dla } \rho_{m,i}(k) > 50 \end{cases} \quad (19)$$

W sposób analogiczny wylicza się wskaźnik jakości J_n . Zastosowanie funkcji kosztu z tak zdefiniowanym wskaźnikiem jakości powoduje, iż algorytmy optymalizacyjne próbują dobrać wartości parametrów w poszczególnych regulatorach w taki sposób, aby ograniczyć zjawisko długotrwałego zatłoczenia na poszczególnych segmentach dróg.

Druga z utworzonych funkcji kosztu uwzględnia wartości zmiennej stanu prędkości na każdym odcinku dróg przed skrzyżowaniem (drogi m i n). Poniżej zamieszczono opis analityczny, służący klarownemu wyjaśnieniu, jak wyliczany jest wskaźnik kosztu J^II . W pierwszej kolejności należy poczynić zastrzeżenie, iż dla tego wskaźnika również mają zastosowanie dwa pierwsze równania, który były stosowane przy poprzedniej funkcji kosztu, patrz wzory (16) i (17). Inaczej natomiast oblicza się pomocniczą wartość $\hat{J}_m(k+1)$:

$$\hat{J}_m(k+1) = \begin{cases} w_{kr}(k)(30 - v_{m,i}(k+1)) & \text{dla } v_{m,i}(k+1) < 30 \\ 0 & \text{dla } v_{m,i}(k+1) \geq 30 \end{cases} \quad (20)$$

gdzie: $w_{kr}(k)$ – współczynnik kary, wyznaczany ze wzoru:

$$w_{kr}(k) = \begin{cases} 1 & \text{dla } k = 0 \vee v_{m,i}(k) \geq 30 \\ w_{kr}(k-1) + 1 & \text{dla } v_{m,i}(k) < 30 \end{cases} \quad (21)$$

Analogicznie obliczany jest wskaźnik jakości J_n . Użycie funkcji kosztu z tym wskaźnikiem jakości sprawi, że algorytmy optymalizacji będą starały się dobrać wartości parametrów w poszczególnych regulatorach tak, aby unikać zjawiska długotrwałego utrzymywania się niskich prędkości na poszczególnych segmentach dróg.

Dla regulatora czteropolożeniowego zapis zadania optymalizacji przedstawia wzór:

$$\min_{\rho_{gr}, t_{dl}, t_{kr}} (J^I, J^II) \quad (22)$$

Natomiast dla regulatora liniowego:

$$\min_{t_{max}, t_{min}, a, b} (J^I, J^I) \quad (23)$$

Dla regulatora czteropolożeniowego zdefiniowane zostały cztery ograniczenia nierównościowe, które wyrażone są zależnością:

$$\begin{cases} t_{dl} \geq t_{kr} + 1 \\ 2 \leq t_{dl} \leq 200 \\ 1 \leq t_{kr} \leq 199 \\ 0 \leq \rho_{gr} \leq 80 \end{cases} \quad t_{dl} \in Z, \quad t_{kr} \in Z \quad (24)$$

Stała czasowa t_{dl} musi być większa od t_{kr} , obydwie stałe powinny być liczbami dodatnimi i całkowitymi (dyskretny czas). Dwie środkowe nierówności eliminują takie rozwiązania, w których czas zmiany świateł na sygnalizatorach wynosi ponad 720 s (12 min). Ostatnia nierówność ze wzoru (24) zapewnia, że gęstość graniczna będzie wartością rzeczywistą, tj. nieujemną i nieprzekraczającą wartości gęstości maksymalnej $\bar{\rho}$.

Dla regulatora liniowego zdefiniowano pięć ograniczeń:

$$\begin{cases} t_{\max} \geq t_{\min} + 1 \\ 2 \leq t_{\max} \leq 200 \\ 1 \leq t_{\min} \leq 199 \\ -0,5 \leq a \leq 0,5 \\ -5 \leq b \leq 5 \end{cases} \quad t_{\max} \in Z, \quad t_{\min} \in Z \quad (25)$$

Cel wprowadzenia pierwszych trzech nierówności dotyczących stałych czasowych jest właściwie taki sam jak przy regulatorze czterostawnym (24). Natomiast kolejne dwie nierówności mają na celu zapobiec nadmiernemu wpływowi zmiennych a oraz b na uzyskiwane wartości czasu t_i , patrz wzór (14), a więc sprzyjają zachowaniu ich pierwotnie założonej, korygującej roli.

5. Badania symulacyjne i analiza wyników

Na potrzeby wykonywanych symulacji numerycznych przyjęto następujące wartości parametrów modelu: okres dyskretyzacji $T = 0,001$, stała czasowa $\tau = 0,002$, stała antycypacji $\gamma = 17$, stała $\kappa = 50$. Przyjęto również dla wszystkich segmentów każdej z dróg jednolite wartości 4 parametrów: parametr wykresu fundamentalnego $a_m = 9$, gęstość krytyczna $\rho_{crit,m} = 50$, gęstość maksymalna $\bar{\rho}_{m,i} = 50$, prędkość wolnego przepływu $v_{free,m} = 70$.

Na rysunku 3 przedstawiono poglądowy schemat połączeń zaimplementowanej sieci komunikacyjnej. Sieć składa się z jednego skrzyżowania typu X. Oprócz występującej na skrzyżowaniu sygnalizacji ze zmiennymi czasami pracy (C), sieć ma dwie sygnalizacje pracujące ze stałymi czasami (A, B). Cała sieć złożona jest z sześciu dróg, które wchodzą w skład dwóch głównych tras. Na schemacie zostały zaznaczone drogi wlotowe (zaczynające się od pogrubionej zielonej linii) oraz drogi wylotowe (kończące się pogrubioną czerwoną linią).

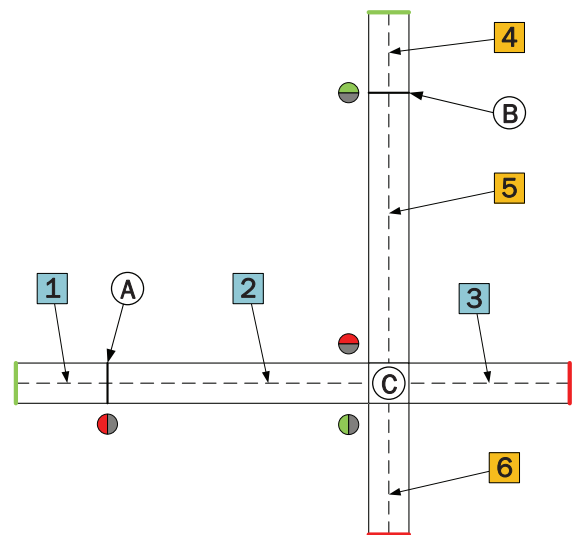
Sygnalizatory, pracujące na stałych czasach, zostały dodane w celu urealnienia przepływu pojazdów na drogach przed skrzyżowaniem. Uwzględnienie ich w rozpatrywanej sieci pozwala na sprawdzenie, jak poszczególne algorytmy sterujące sygnalizacją na skrzyżowaniu poradzą sobie ze zmiennym przepływem, zależnym od sygnalizacji klasycznej.

Jak już wspomniano, na badaną sieć komunikacyjną składa się łącznie 6 dróg. Tworzą one 2 trasy o łącznej długości 31,5 km. Na potrzeby symulacji, każda z dróg została podzielona na pewną ilość segmentów, zaś długość każdego segmentu wynosi 0,5 km. Wszystkie analizowane drogi są drogami jednokierunkowymi, o dwóch pasach ruchu. W skład trasy pierwszej (niebieskiej) wchodzi: droga nr 1 (wlotowa, 7 odcinków), droga nr 2 (wewnętrzna, 12 segmentów), droga nr 3 (wylotowa, 9 odcinków). Natomiast trasę drugą (pomarańczową) tworzą: droga nr 4 (wlotowa, 8 segmentów), droga nr 5 (wewnętrzna, 17 odcinków), droga nr 6 (wylotowa, 10 segmentów). W punkcie przecięcia się obydwu tras znajduje się skrzyżowanie, na którym ruch pojazdów jest sterowany przy pomocy inteligentnej sygnaliza-

Tabela 1. Zestawienie wyników optymalizacji wielokryterialnej
Table 1. Summary of multiobjective optimization results

Nr	Wskaźniki		Nastawy regulatora czteropolozeniowego		
	J^I	J^{II}	ρ_{gr}	t_{dl}	t_{kr}
1.	697,5	11,55k	37,96	10	5
2.	808,1	11,08k	44,48	10	5
3.	898,1	10,08k	40,90	8	4
4.	966,0	9960	42,97	8	4
5.	1071	9910	44,19	8	4
6.	1908	9641	48,67	8	4
7.	4365	9632	51,01	8	4

Nr	Wskaźniki		Nastawy regulatora liniowego			
	J^I	J^{II}	t_{\max}	t_{\min}	a	b
1.	318,8	11,69k	10	4	0,06866	0,1391
2.	331,7	11,67k	10	4	0,1740	1,964
3.	646,6	10,19k	8	3	0,1867	0,877
4.	671,4	10,19k	9	2	0,04583	0,07787
5.	1279	9688	7	3	0,06862	0,7787
6.	1279	9681	7	3	0,1889	1,519
7.	1294	9680	9	1	0,2517	1,848



Rys. 3. Sieć komunikacyjna składająca się z dwóch tras połączonych ze sobą skrzyżowaniem typu X

Fig. 3. A communication network consisting of two routes connected by an intersection of type X

cji świetlnej. Za prawidłową obsługę świateł na skrzyżowaniu odpowiada wybrany regulator, jeden z dwóch rozpatrywanych.

Scenariusze symulacyjne pozwalają na weryfikację efektywności opracowanego układu sterowania dla założonych warunków drogowych. Przedstawiony w dalszej części pracy scenariusz definiuje następujące cechy układu:

- a) stan całego układu w początkowym kroku czasowym $k = 1$ (wartości zmiennych stanu dla wszystkich odcinków każdej z dróg tworzących sieć komunikacyjną),
- b) wartości zmiennych stanu gęstości i prędkości na pierwszych segmentach ($i = 1$) wszystkich dróg wlotowych dla kolejnych chwil k przez cały okres symulacji,
- c) wartości stałych czasów pracy sygnalizatorów A i B,

Dla rozpatrywanego scenariusza przyjęto czas symulacji wynoszący jedną godzinę (1000 pojedynczych kroków czasowych). Ustawiono wartości gęstości na 40 poj./km/pas dla pierwszych odcinków dróg wlotowych (droga nr 1 oraz droga nr 4) oraz wartości prędkości dla tych odcinków na 40 km/h. Dla wszystkich pozostałych segmentów, wchodzących w skład rozpatrywanej sieci komunikacyjnej, ustawiono wartości pierwszej zmiennej stanu na 5 poj./km/pas, zaś drugiej na 30 km/h. Ponadto przyjęto stałe czasy pracy dla sygnalizatorów A i B. Dla sygnalizatora A naprzemiennie 80 k (288 s) światła zielonego i 20 k (72 s) światła czerwonego, natomiast dla sygnalizatora B naprzemiennie 30 k (108 s) światła czerwonego oraz 30 k (108 s) światła zielonego. Poprzez określenie „sygnalizator pierwszy” rozumieć należy sygnalizator przy drodze nr 2, natomiast przez określenie „sygnalizator drugi” – sygnalizator przy drodze nr 5.

Optymalizację wielokryterialną przeprowadzono, stosując podejście Pareto przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego dostępnego w przyborniku *Global Optimization Toolbox* [9]. Metoda ta jest dość dobrze opisana w literaturze [10] w kontekście problemów optymalizacyjnych bazujących na wielu kryteriach. Do jej niewątpliwych zalet zaliczyć należy możliwość podjęcia przez decydenta decyzji *a posteriori* spośród elementów zbioru rozwiązań niezdominowanych. Uzyskane w ten sposób rozwiązania niezdominowane zebrano w tabeli 1, a następnie naniesiono na wykres w przestrzeni funkcji celu, celem utworzenia frontów Pareto.

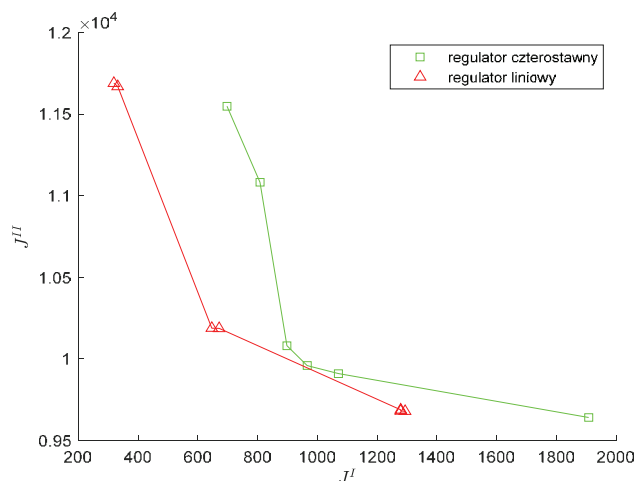
Na rysunku 4 przedstawiono fronty Pareto otrzymane dla obydwu regulatorów. W przypadku regulatora czterostawnego na wykresie nie zaznaczono siódmego (7.) rozwiązania, z uwagi na jego dużą odległość od pozostałych rozwiązań.

Analizując obydwa fronty Pareto, łatwo dostrzec, iż linia frontu dla regulatora liniowego biegnie bliżej osi rzędnych. Oznacza to, iż algorytm ten lepiej radzi sobie w zadaniu minimalizacji pierwszego wskaźnika jakości J^I , związanego z gęstościami pojazdów (zatłoczeniem) na poszczególnych segmentach. Natomiast poszczególne punkty frontu regulatora czterostawnego znajdują się nieznacznie niżej względem ich odpowiedników dla liniowego regulatora. Algorytm czteropolożeniowy umożliwia więc znajdowanie rozwiązań, które w niewielkim stopniu lepiej minimalizują wskaźnik J^II .

Do badań symulacyjnych wybrano następujące dwa rozwiązania niezdominowane:

- 1) rozwiązanie 7. uzyskane dla regulatora czterostawnego,
- 2) rozwiązanie 1. otrzymane dla regulatora liniowego.

Pierwsze z wybranych rozwiązań główny nacisk kładzie na minimalizację wskaźnika jakości J^II . Oznacza to, że w procesie poszukiwań algorytm genetyczny starał się ograniczyć do minimum spadki prędkości poniżej 30 km/h, co umożliwiłoby stosunkowo płynną jazdę.



Rys. 4. Fronty Pareto dla poszczególnych regulatorów
Fig. 4. Pareto fronts for different controllers

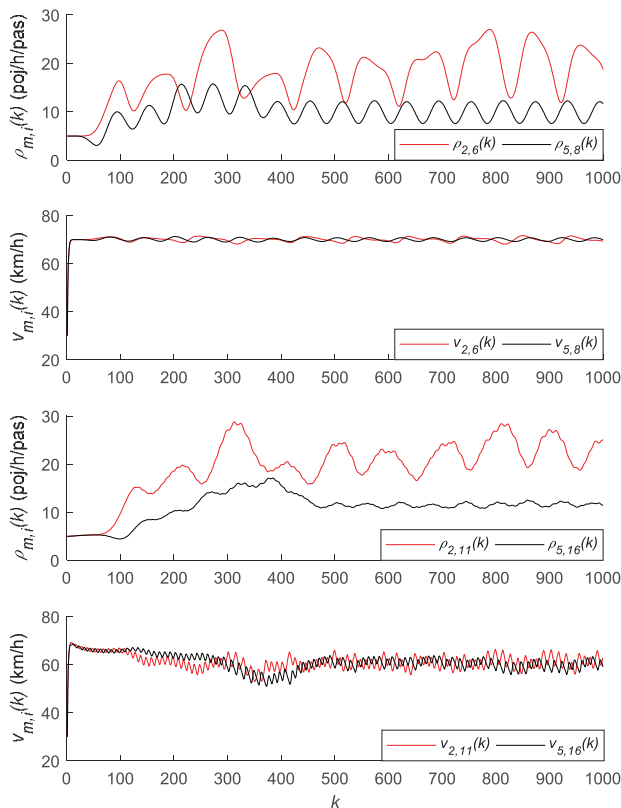
W drugim rozwiązaniu, parametry liniowego regulatora dobrano, mając na uwadze przede wszystkim minimalizację wskaźnika J^I . Wskaźnik ten „wymuszał” na algorytmie optymalizacji wyszukiwanie takich rozwiązań, w których gęstość poszczególnych segmentów nie przekraczałyby 50 poj./km/pas, a więc ustalonej w modelu wartości gęstości krytycznej ρ_{crit} . Dzięki temu na drodze nie pojawiałyby się spadki prędkości związane ze zbyt dużym zatłoczeniem.

Dla uprzednio określonego scenariusza zostaną zaprezentowane wykresy uzyskane z symulacji dwóch wariantów. Wariant pierwszy to zastosowanie w układzie sterowania regulatora czteropolożeniowego z nastawami, których wartości ustawiono według pierwszego z wybranych rozwiązań niezdominowanych. W wariacie drugim zastosowany jest regulator liniowy, bazujący na gęstości, z nastawami dobranymi zgodnie z wybranym drugim rozwiązaniem. Pominięte zostały wykresy dla dróg nr 1 i 4, które są zależne od pracy sygnalizatorów A i B, jako mniej istotne przy analizie działania algorytmu sterowania sygnalizacją świetlną (C) na skrzyżowaniu. Zrezygnowano również z wykresów dla dróg nr 3 i 6 z uwagi na fakt, iż są to drogi wylotowe, a więc poszczególne wielkości będą się na nich kształtować jak w sytuacji swobodnego przepływu.

Rysunek 5 zawiera w sumie 4 wykresy. Na każdym z nich porównano przebiegi danej zmiennej stanu na dwóch segmentach (po jednym segmencie dla dróg nr 2 i 5). Pierwszy wykres ilustruje gęstości uzyskiwane w konkretnych, środkowych segmentach. Można tutaj zaobserwować ciągle oscylacje – dla odcinka szóstego drogi drugiej wokół wartości 20 poj./km/pas, zaś dla odcinka ósmego drogi piątej wokół wartości 10 poj./km/pas.

Drugi wykres pokazuje prędkości osiągane na tych segmentach – dla $k \geq 5$ są one bliskie prędkości wolnego przepływu v_{free} . Na trzecim wykresie zaprezentowano, osiągane w kolejnych chwilach k , wykresy gęstości dla przedostatnich segmentów obydwu dróg. Występują tu podobne oscylacje jak na odcinkach środkowych. Jednakże oscylacje te posiadają zauważalnie mniejszą amplitudę. Czwarty z kolei wykres przedstawia przebiegi prędkości dla przedostatnich odcinków. Niewielki spadek prędkości na segmencie drogi drugiej powoduje niewielki wzrost prędkości na analogicznym segmencie drogi piątej (i odwrotnie). Prędkości oscylują na poziomie ok. 60 km/h.

Rysunek 6 zawiera, podobnie jak rysunek 5, cztery wykresy. Rozpatrywane są również te same segmenty. Wykresy gęstości (pierwszy i trzeci wykres) ilustrują oscylacje, jakie pojawiają się dla kroku czasowego $k > 80$ i utrzymują się do samego końca czasu symulacji. Niewątpliwie, przebiegi te są dość podobne do



Rys. 5. Gęstości i prędkości grupowe pojazdów na wybranych segmentach dróg nr 2 i 5 uzyskane przy użyciu regulatora czteropółżeniowego

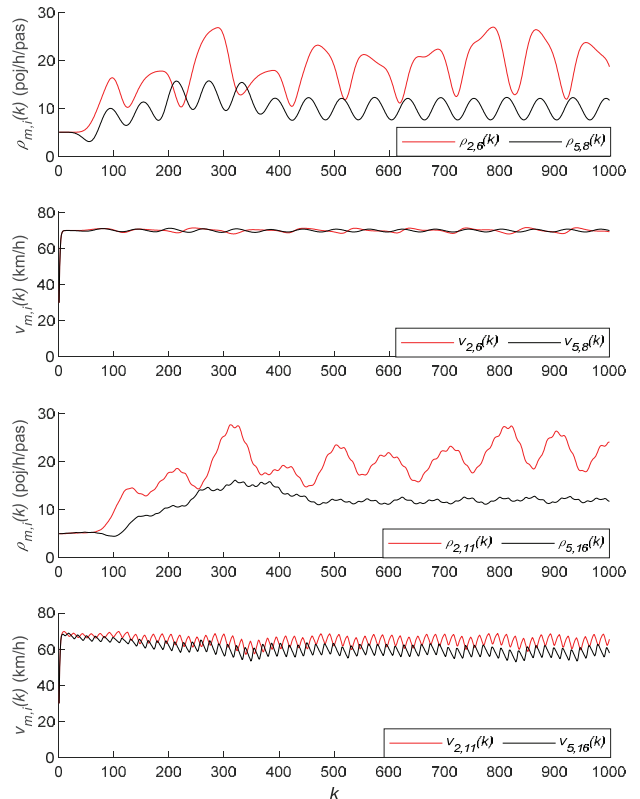
Fig. 5. Densities and speeds of the vehicle group on selected road segments No. 2 and 5 obtained with the use of the 4-step controller

ich odpowiedników z rysunku 5. Wykres prędkości dla odcinków środkowych pokazuje, iż właściwie przez cały czas symulacji (z wyłączeniem okresu początkowego) pojazdy utrzymują prędkość bliską 70 km/h. Natomiast na wykresie czwartym, obserwuje się niewielkie oscylacje osiąganych prędkości wokół wartości 65 km/h i 60 km/h odpowiednio dla przedostatnich odcinków dróg nr 2 i 5.

6. Podsumowanie

W niniejszej pracy podjęto próbę zaprojektowania i zoptymalizowania układu sterowania dla niewielkiej sieci komunikacyjnej. Wyniki uzyskane w części badawczej pokazują, iż opracowany dla sieci dróg układ sterowania działa w sposób prawidłowy, zapewniając poprawny przepływ pojazdów w poszczególnych ciągach komunikacyjnych, które wchodzą w skład tej sieci. Jednakże zaproponowane rozwiązanie nie jest bynajmniej rozwiązaniem doskonałym i wymaga jeszcze wielu modyfikacji, które przyczyniłyby do zwiększenia jego efektywności w radzeniu sobie z problemem przeciążonej infrastruktury drogowej.

Dalszy rozwój prac nad tym zagadnieniem możliwy jest na dwóch płaszczyznach. Przede wszystkim obecny, zaprezentowany w niniejszej pracy, makroskopowy model ruchu ulicznego można rozbudować o nowe ciągi dróg i skrzyżowań, dzięki czemu możliwa stanie się analiza sieci komunikacyjnych o wyższej złożoności. Drugim obszarem, o nie mniejszym znaczeniu, jest oczywiście rozwój algorytmów sterowania infrastrukturą drogową. Elementów, które warto byłoby tutaj dodać bądź uwzględnić, jest z pewnością wiele – do najważniejszych należy zaliczyć modyfikację pracy regulatorów w oparciu nie tylko o dane uzyskiwane na drogach dochodzących do skrzyżowania, ale również



Rys. 6. Gęstości i prędkości grupowe pojazdów na wybranych segmentach dróg nr 2 i 5 uzyskane przy użyciu regulatora liniowego

Fig. 6. Densities and speeds of the vehicle group on selected road segments No. 2 and 5 obtained with the use of the linear controller

przy wykorzystaniu informacji o stanie, jaki panuje na drogach odchodzących. Zagadnieniem, wymagającym osobnej analizy, jest właściwy dobór parametrów modelu, który pozwoli w większym stopniu odwzorować cechy dróg, wchodzących w skład modelowanej sieci komunikacyjnej.

Bibliografia

1. Krawiec S., Celiński I., *Alternatywny rozwój systemów obszarowego sterowania ruchem drogowym*. „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport”, Z. 73, 2010, 45–60.
2. Marczak M., Kozłowski R., *Budowa inteligentnych systemów transportowych jako szansa dla zrównoważonego rozwoju regionów*. „Ekonomia i Zarządzanie”, Nr 2, 2014, 34–42, DOI: 10.12846/j.em.2014.02.03.
3. Oskarbski J., Kuprewicz G., *Priorytety dla transportu zbiorowego z wykorzystaniem systemu sterowania ruchem*. „Logistyka”, Nr 3, 2014, 4878–4887.
4. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa 2011.
5. Abrahamowicz E., Orłowski P., Model matematyczny przepływu ruchu ulicznego w skali makroskopowej, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 21, Nr 3/2017, 5–10, DOI: 10.14313/PAR_225/5.
6. Kotsialos A., Papageorgiou M., Diakaki C., Pavlis Y., Middelham F., *Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool METANET*. „IEEE Transactions on intelligent transportation systems”, Vol. 3, No. 4, 2002, 282–292, DOI: 10.1109/TITS.2002.806804.

7. Filipowicz B., Kwiecień J., *Algorytmy stadne w problemach optymalizacji*. „Pomiary Automatyka i Robotyka”, R. 15, Nr 12, 2011, 152–157.
8. Topolska K., Topolski M., Błachut B., Haber M., Piekarz A., *Zastosowanie fuzji klasyfikatorów rozmytych i genetycznych w zadaniu sterowania sygnalizacją świetlną*. „Biuletyn Naukowy Wrocławskiej Wyższej Szkoły Informatyki Stosowanej. Informatyka”, Vol. 2, 2012, 30–33.
9. Mathworks: *Genetic Algorithm. Global Optimization Toolbox*, 2020, [www.mathworks.com/help/gads/ga.html].
10. Horn J., Nafpliotis N., Goldberg D. E., *A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization*. „Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence”, Orlando, FL, Vol. 1, 1994, 82–87, DOI: 10.1109/ICEC.1994.350037.
11. Hao W., Ma C., Moghimi B., Fan Y., Gao Z., *Robust Optimization of Signal Control Parameters for Unsaturated Intersection Based on Tabu Search-Artificial Bee Colony Algorithm*. „IEEE Access”, Vol. 6, 2018, 32015–32022, DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2845673.
12. Zhou Z., De Schutter B., Lin S., Xi Y., *Two-Level Hierarchical Model-Based Predictive Control for Large-Scale Urban Traffic Networks*. „IEEE Transactions on Control Systems Technology”, Vol. 25, No. 2, 2017, 496–508, DOI: 10.1109/TCST.2016.2572169.
13. Tettamanti T., Luspay T., Kulcsár B., Péni T., Varga I., *Robust Control for Urban Road Traffic Networks*. „IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems”, Vol. 15, No. 1, 2014, 385–398, DOI: 10.1109/TITS.2013.2281666.
14. Chen K., Zhao J., Knoop V.L., Gao X., *Robust Signal Control of Exit Lanes for Left-Turn Intersections With the Consideration of Traffic Fluctuation*. „IEEE Access”, Vol. 8, 2020, 42071–42081, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2977134.
15. Kang K., Chang G., *A robust model for optimal time-of-day speed control at highway work zones*. „IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems”, Vol. 7, No. 1, 2006, 115–123, DOI: 10.1109/TITS.2006.869605.
16. Orłowski P., *Hybrid, discrete-time distributed parameter mathematical model for road traffic with control*. [in:] 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). IEEE, 2020.
17. Gajda J., Sroka R., Stencel M., Żegleń T., *Pomiary parametrów ruchu drogowego*. „Pomiary Automatyka Kontrola”, Vol. 48, Nr 5–6/2002, 5–9.

Fault Tolerant Traffic Control System Based on Multiobjective Optimization

Abstract: The mathematical model is a simplified representation of certain phenomena, which takes into account only the essential features. Nowadays, congested road infrastructures are becoming a growing problem, especially in larger urban centres. This problem can be somewhat reduced by using advanced control algorithms. This article attempts to control the traffic flow on a macroscopic scale. For this purpose, a discrete, nonlinear mathematical model was adopted. Using the MATLAB programming environment, a control system for a small communication network was developed and optimised. Then, assuming a sample scenario, simulation studies were conducted for this network.

Keywords: mathematical model, traffic flow, discrete control, multiobjective optimisation, simulation

inż. Dobrosław Cieślęwicz

dcieslewicz396@wp.pl
ORCID: 0000-0002-6399-6816



Student studiów magisterskich na kierunku automatyka i robotyka na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Prezes Studentckiego Koła Naukowego SARIS, działającego na Wydziale Elektrycznym. Zainteresowania naukowe skupiają się na problematyce syntezy i optymalizacji układów sterowania.