

Maciej Kruszyna

**Metoda oceny
elementów infrastruktury drogowej
z uwzględnieniem potrzeb i specyfiki
różnych grup użytkowników**



Recenzenci

Stanisław KRAWIEC

Tomasz NOWAKOWSKI

Projekt okładki

Przemysław WOŁCZUK

Rysunek na okładce

Szymon KRUSZYNA

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013

OFICYNA WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>

e-mail: oficwyd@pwr.wroc.pl

zamawianie.książek@pwr.wroc.pl

ISSN 0324-9727

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 964/2013.

*infrastruktura drogowa, grupy użytkowników,
metoda oceny, grupowanie rozmyte,
algorytmy genetyczne, priorytety,
funkcje satysfakcji i akceptacji*

Maciej KRUSZYNA*

METODA OCENY ELEMENTÓW INFRASTRUKTURY DROGOWEJ Z UWZGLĘDNIENIEM POTRZEB I SPECYFIKI RÓŻNYCH GRUP UŻYTKOWNIKÓW

W monografii pod pojęciem infrastruktury drogowej autor rozważa obiekty budowlane, po których odbywa się transport osób i towarów w zakresie gałęzi transportu drogowego. Wprowadzono i zdefiniowano kluczowe dla prowadzonych rozważań pojęcia, takie jak: element infrastruktury drogowej, jego rodzaje (węzeł i odcinek międzywęzłowy) oraz części, grupa użytkowników, trasa, środek lokomocji, opis i ocena warunków ruchu. Dokonano zestawienia stanu wiedzy z zakresu poruszanych zagadnień w rozbiciu na: przegląd zagadnień z zakresu opisu elementu infrastruktury, znaczenie sygnalizacji drogowej w ocenie warunków ruchu i tendencje wykorzystania metod heurystycznych w ocenie elementów infrastruktury drogowej. Na bazie tego podsumowania określono autorski wkład w dziedzinę projektowania i oceny elementów infrastruktury drogowej. Sformułowano trzy tezy oraz sprecyzowano cel i zakres monografii.

Podstawowym osiągnięciem monografii jest skonstruowanie uniwersalnej metody opisu elementów infrastruktury drogowej. Oprócz ujęcia tradycyjnych wielkości charakteryzujących geometrię drogi oraz ruch jej użytkowników uwzględniono rolę wymagań poszczególnych grup użytkowników. Analizy różnych grup użytkowników, w tym podróżujących w pojazdach transportu zbiorowego, pieszych i rowerzystów, wymagały stworzenia zestawu zunifikowanych wielkości i związanych z nimi jednostek.

Skonstruowano metodę oceny elementu infrastruktury drogowej bazującą na autorskim modelu obejmującym opis elementu infrastruktury oraz poszczególne grupy użytkowników. W metodzie oceny wykorzystano oryginalny zestaw funkcji oraz uwarunkowań dopasowany do charakteru rozwiązywanych zadań. Metoda nadaje się do korygowania sposobów obliczania przepustowości i warunków oceny ruchu drogowego z rozwinięciem ich na wszystkie grupy użytkowników. Kompleksowy opis wszystkich części elementu infrastruktury pozwala także na ocenę wariantów realizacji, bądź zagospodarowania.

* Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

Istotnym osiągnięciem pracy jest wykorzystanie metod grupowania rozmytego do kalibracji parametrów funkcji oceny oraz algorytmów genetycznych, jako nowoczesnych i efektywnych narzędzi rozwiązywania zadań oceny elementów infrastruktury. Na przykładach pokazano użyteczność skonstruowanego modelu oraz efektywność autorskiej metody oceny, także na tle dotychczas stosowanych metod i włączywszy w to zbudowane narzędzia komputerowe. Dodatkowo pokazano, że modyfikując konkretne elementy metody, takie jak: wagi, parametry funkcji oceny i jej postać, uwzględnia się różne stopnie priorytetów dla określonych grup użytkowników stosownie do formułowanych przez nich preferencji oraz oczekiwań decydentów.

Stosowane oznaczenia

- a – parametr cząstkowej funkcji oceny,
- b – parametr cząstkowej funkcji oceny,
- B – oznaczenie użytkowników elementu infrastruktury poruszających się rowerem,
- c – parametr cząstkowej funkcji oceny,
- C – przepustowość [u/h],
- ΔCT – rezerwa przepustowości elementu infrastruktury [u/h],
- d – parametr cząstkowej funkcji oceny,
- D – strata czasu [s],
- e – parametr cząstkowej funkcji oceny,
- E – ekwiwalent oceny (jakości) elementu infrastruktury,
- El – zbiór wartości funkcji satysfakcji i akceptacji dla każdej z grup użytkowników,
- f – parametr cząstkowej funkcji oceny,
- f_i – współczynnik modyfikujący przepustowość,
- F – funkcja (np. oceny, celu),
- g – wydłużenie sygnału zielonego [s],
- G – długość sygnału zielonego [s],
- h – numer grupy użytkowników,
- H – liczba grup użytkowników,
- i – numer klastra w grupowaniu rozmytym,
- i – pochylenie (np. poprzeczne ogniwa),
- I – liczba klastrów w grupowaniu rozmytym,
- j – numer próbki w metodzie FCM,
- J – liczba próbek w metodzie FCM,
- k – gęstość ruchu [u/m²],
- l – długość, odległość [m],
- l_h – numer ogniwa trasy h ,
- L_h – liczba ogniw na trasie h ,
- m – parametr określający stopień rozmycia w metodzie FCM,
- M – punkt na trasie,
- n – krok obliczeń (iteracji) w metodzie FCM,
- N – liczba (np. użytkowników),
- o – ocena,
- P – oznaczenie użytkowników elementu infrastruktury poruszających się pieszo,
- P_h – macierz przebiegu dla trasy h ,
- Q – natężenie ruchu [u/h],
- r – udział (proporcja, stosunek),
- R – długość sygnału czerwonego [s],

-
- s – szerokość (np. ogniwa) [m],
 S – natężenie nasycenia [u/h],
 t – czas [s],
 T – oznaczenie użytkowników elementu infrastruktury poruszających się w pojazdach transportu zbiorowego,
 $T_{h,l}$ – typ ogniwa l na trasie h ,
 u_h – udział grupy użytkowników jako składnik metody oceny elementu infrastruktury,
 U_h – typ użytkowników (np. według środka lokomocji) trasy h ,
 v – prędkość [km/h], [m/s],
 V – oznaczenie użytkowników elementu infrastruktury poruszających się w pojazdach ruchu ogólnego,
 w – ogólne oznaczenie zmiennej,
 x – współrzędna w opisie geometrii elementu infrastruktury,
 XT – stopień wykorzystania przepustowości elementu infrastruktury,
 y – współrzędna w opisie geometrii elementu infrastruktury,
 z – współrzędna w opisie geometrii elementu infrastruktury,
 γ – przelicznik do ekwiwalentu oceny,
 Δ – skrócenie lub wydłużenie fazy [s],
 ε – parametr określający warunki zatrzymania analiz w metodzie FCM,
 η – parametr do kalibracji szerokości pasa ruchu,
 κ – numer zmiennej w metodzie FCM,
 λ – udział długości sygnału zielonego w długości cyklu,
 K – liczba zmiennych w metodzie FCM,
 μ – przynależność do zbioru rozmytego,
 ν – środek klastra w metodzie FCM,
 ρ – waga dla wielkości stosowanych w ekwiwalentach oceny,
 $\Phi_{h,l}$ – krzywizna ogniwa l na trasie h [m⁻¹],
 χ – liczba możliwych rozwiązań problemu oceny elementu infrastruktury,
 Ψ – liczba wartości zmiennej w algorytmie genetycznym,
 ω – waga jako składnik metody oceny elementu infrastruktury.

1. Wprowadzenie

Steenbrink [271] wydziela trzy składniki infrastruktury transportu: obiekty stałe (m.in. drogi), pojazdy korzystające z infrastruktury stałej (tabor) oraz system organizacyjny niezbędny do zapewnienia prawidłowego użytkowania pojazdów i infrastruktury stałej. Koresponduje to z wydzieleniem podsystemów w systemie transportowym opisanym na przykład w [141]: technicznego (obejmującego m.in. drogi i tabor), organizacyjnego i ekonomiczno-prawnego. Infrastruktura obejmująca zatem tylko obiekty stałe oraz tabor może być utożsamiana z podsystemem technicznym systemu transportu. Koncentrując się na obiektach budownictwa lądowego, jako infrastrukturę transportu można rozpatrywać jedynie obiekty stałe z wyłączeniem taboru. Nawiązuje to do badań prowadzonych w ramach dziedziny budownictwa, a ściślej inżynierii lądowej. W niniejszej monografii pod pojęciem **infrastruktury drogowej** autor rozważa obiekty budowlane (stałe) po których odbywa się transport osób i towarów w zakresie gałęzi transportu drogowego. W budownictwie drogowym rozróżnia się pojęcia: droga i ulica, to drugie rezerwując dla infrastruktury w obszarach zabudowanych. W niniejszej monografii używane jest określenie droga także w rozumieniu ulicy.

Infrastruktura drogowa ma postać sieci, składającej się w zapisie symbolicznym z łuków oraz wierzchołków. Liniowe lub punktowe części sieci nazywane są tutaj **elementami infrastruktury**. W monografii, wyróżnia się dwa rodzaje elementów infrastruktury drogowej nazywając je: odcinkami międzywęzłowymi i węzłami. Jako **węzły** uważane są zarówno węzły drogowe (przecięcia się dróg, najczęściej wysokich klas technicznych, w kilku poziomach), jak i skrzyżowania we wszystkich możliwych postaciach (przecięcia dróg jednopoziomowe). **Odcinki międzywęzłowe** to drogi łączące węzły z wyłączeniem ich części leżących w bliskim sąsiedztwie węzła (w tak zwanym obszarze oddziaływania węzła).

Najbardziej podstawowy opis elementu infrastruktury polega na określeniu charakterystyk geometrycznych poszczególnych jego **części**. Wykorzystany zostanie kartezjański układ współrzędnych w przestrzeni dwuwymiarowej lub, rzadziej, trójwymiarowej (dla elementów wielopoziomowych, takich jak: wiadukty, estakady, kładki, tunele, przejścia podziemne). Dokładniejszy opis elementu infrastruktury drogowej wymaga przypisania poszczególnych jego części do określonych grup użytkowników.

Grupa to użytkownicy poruszający się takim samym środkiem lokomocji oraz po identycznej trasie.

Trasa to zbiór punktów w elemencie infrastruktury określający przemieszczanie się użytkowników. Podstawowym **użytkownikiem** jest pojedynczy człowiek poruszający się pieszo lub w pojeździe. Sposób wykonywania przemieszczenia, pieszo lub w pojeździe nazywany jest **środkiem lokomocji** (za [248]). Każdy użytkownik przemieszcza się w elemencie infrastruktury począwszy od wejścia do wyjścia po określonej trasie oraz wykorzystując jeden lub kilka środków lokomocji.

Podstawowym wyróżnikiem grupy użytkowników (sposobem ich grupowania) jest używany środek lokomocji. Jako istotne grupy użytkowników wyróżnia się w niniejszej monografii: pieszych, rowerzystów, podróżujących w pojazdach jako kierowca lub pasażer (z wyłączeniem pasażerów transportu publicznego), podróżujących jako pasażerowie w pojazdach transportu publicznego (zbiorowo). Jako dodatkowy wyróżnik grupy użytkowników wykorzystywana jest także trasa przemieszczania się w elemencie infrastruktury. Jako różne traktowane są grupy użytkowników poruszających się takimi samymi środkami lokomocji, ale innymi trasami.

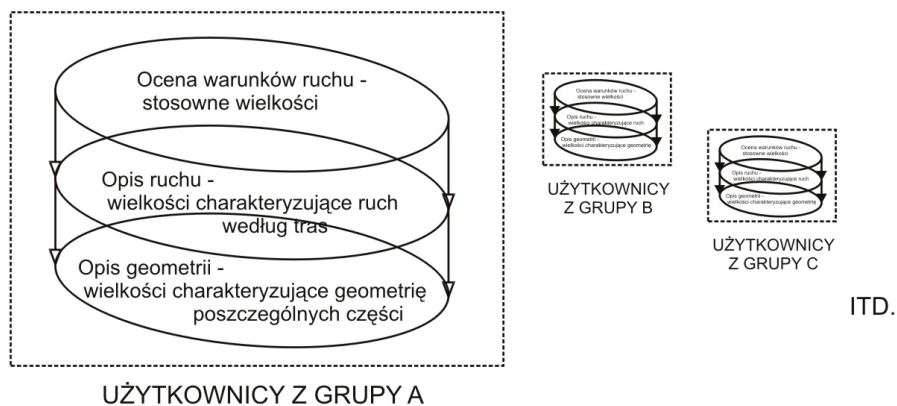
Opis ruchu użytkowników po trasach jest kolejną charakterystyką elementu infrastruktury. Warunki przemieszczania się mają znaczenie dla oceny elementu infrastruktury. Wielkości opisujące ruch to: prędkość oraz jej zmiany, czas przemieszczania się (przebywania) w ramach elementu infrastruktury. Czas zależy od długości oraz prędkości, ale wyróżnić można także straty czasu jako momenty z zerową prędkością – jest to istotne dla dalszych analiz. Opis parametrów ruchu poprzez czas jest dokładniejszy niż podawanie długości i prędkości.

Nakierowanie analiz na percepcję człowieka wymaga wprowadzenia specyficznych wielkości oraz jednostek z zakresu **oceny warunków ruchu** (opisu jakości). Pojazdy i piesi poruszają się w elementach infrastruktury drogowej po specyficznych ich częściach, przeznaczonych czasami dla wybranych użytkowników (np. chodnik, wydzielone torowisko tramwajowe), a czasami współdzielonych przez użytkowników poruszających się różnymi środkami lokomocji (ciąg pieszo – rowerowy, przejście przez jezdnię dla pieszych w jednym poziomie).

Metoda autora polega na wskazaniu najlepszego ukształtowania geometrii elementu infrastruktury w powiązaniu ze sterowaniem ruchem użytkowników wobec ocen (oczekiwań) użytkowników. Wymaga to zdefiniowania specyficznych wielkości, określenia istotnych parametrów i ich kalibracji dla konkretnych zadań. Wielostopniową hierarchię charakterystyk elementu infrastruktury przedstawia schemat (rys. 1.1) pokazujący dodatkowo poszczególne poziomy opisu. Na każdym poziomie znajduje się stosowny zestaw wielkości. Z punktu widzenia dalszych rozważań konieczna jest unifikacja wielkości używanych do opisu geometrii elementu infrastruktury, ruchu użytkowników oraz oceny warunków ruchu.

W inżynierii lądowej obecny jest postulat nakierowania analiz na specyfikę ludzkiej percepcji oraz uwzględnienie jej w procesie modelowania, projektowania i wyko-

nawstwa. Przełożenie tego postulatu na konkretne metody, czy ich elementy nie jest zadaniem łatwym. Tradycyjnie, nauki techniczne opierają się na wielkościach, metodach i modelach definiowanych w sposób nie uwzględniający braku precyzji ludzkiego postrzegania i oceny, błędów decyzyjnych, niepełnej informacji, różnic w ocenach pomiędzy poszczególnymi osobami, czy ich grupami itp.



Rys. 1.1. Komponenty opisu elementu infrastruktury drogowej

W ostatnich dekadach wyprowadzono i wprowadzono w użycie wiele metod oraz modeli uwzględniających wyżej określoną specyfikę. Dotyczy to narzędzi matematycznych, nowo definiowanych wielkości, czy jednostek miary. W budownictwie drogowym dotyczącym infrastruktury transportu uwzględnienie czynnika ludzkiego wydaje się być bardzo zasadne z uwagi na potrzebę upodmiotowienia człowieka jako podstawowej jednostki poruszającej się po sieci drogowej. Człowiek, jako uczestnik ruchu, ma duży wpływ na parametry opisujące ruch, takie jak: prędkość, czas reakcji, sposób wykonywania manewrów. Z kolei ruch i opisujące go wielkości oddziałują na podróżujących poprzez swoje sprężenie zwrotne. Projektowanie i ocena infrastruktury drogowej powinny uwzględniać wyżej wymienione elementy. Konieczna jest modyfikacja dotychczas stosowanych pojęć i definicji. Stanowiąc to będzie podstawę do zbudowania modelu z wielkościami i jednostkami miary właściwymi dla usytuowania człowieka jako podstawy analiz. Autor niniejszej monografii wprowadza **specyficzny i zintegrowany zestaw pojęć i definicji**. Niektóre określenia i elementy opisu mogą mieć zatem nieco odmienne znaczenie od dotychczas spotykanych w literaturze, także z uwagi na wielodyscyplinarne podejście do poruszanych zagadnień.

Skoncentrowanie się na człowieku oraz jego percepcji wymusza także specyficzne podejście do oceny. Elementy infrastruktury drogowej można kształtować oceniając wybrane wielkości geometryczne (jak na przykład liczba pasów ruchu, ich szerokość lub długość). Ocena w takim środowisku oznacza wybór typu węzła, wariantów jego rozplanowania, przeznaczenia części elementu infrastruktury dla poszczególnych grup

użytkowników. Trudno się jednak oprzeć w takiej sytuacji na jednoznacznym zestawie wielkości podlegających ocenie. Oceniając element infrastruktury w oparciu o wielkości związane z ruchem należy uwzględnić zasady sterowania ruchem począwszy od zasad ogólnych, poprzez przepisy prawa, po wielkości związane ze sterowaniem za pomocą sygnalizacji. Kompleksowa ocena elementu infrastruktury powinna uwzględnić opis geometrii oraz warunków ruchu. Oznacza to także porównywanie wielkości o charakterze fizycznym, na przykład szerokość pasa ruchu, długość sygnału zielonego z opisowymi (nieliczbowymi), takimi jak: typ przystanku, rodzaj sygnalizacji.

Ocena nakierowana na użytkowników powinna zatem opierać się nie tylko na wielkościach ściśle technicznych dotyczących opisu geometrii elementu infrastruktury drogowej, ruchu użytkowników, czy oceny warunków ruchu, lecz uwzględniać także odczucia użytkowników, czyli kompleksową ocenę funkcjonowania danego elementu infrastruktury. Konieczne jest w tej sytuacji skonstruowanie metody oceny elementów infrastruktury z punktu widzenia użytkowników z różnych grup. Wskazane zostaną specyficzne wielkości bazujące na dotychczas stosowanych, ale dostosowane do specyfiki ocen użytkowników. **Oceny** te nie będą precyzyjne, a rozmyte. Słowo **rozmyte** zostało użyte celowo, bowiem za pomocą pojęć związanych z logiką rozmytą opisze się sposób oceny elementów infrastruktury drogowej zunifikowany względem różnych grup użytkowników oraz oddający specyfikę postrzegania konkretnych rozwiązań poprzez człowieka.

Ujęcie wszystkich tych aspektów w metodzie oceny pozwala nakierować analizy na człowieka i dostosować infrastrukturę do specyfiki postrzegania, ocen, odbioru. W konsekwencji można infrastrukturę uczynić bardziej przyjazną człowiekowi i dopasowaną do indywidualnych i zbiorowych odczuć jej użytkowników.

2. Stan badań nad zagadnieniami oceny elementów infrastruktury oraz charakterystyka monografii

2.1. Przegląd zagadnień z zakresu opisu elementu infrastruktury

Opis elementów infrastruktury dotyczy zagadnień związanych z: geometrią drogi, charakterystykami ruchu, czy cechami poszczególnych użytkowników. Zagadnienia te występują w przepisach, podręcznikach, wytycznych: [106], [107], [136], [137], [190]–[192], [218], [230], [246], [248], [251], [302]–[304]. Opis prowadzi się różniąc podróżujących stosownie do środka lokomocji lub analizując wszystkich użytkowników (a ściślej pojazdy) w tak zwanym ruchu ogólnym. Na rysunku 2.1 przedstawiono schemat wyróżniania użytkowników w opisie elementu infrastruktury z uwzględnieniem kompleksowości w sposobie podejścia. Wyróżniono cztery sposoby podejścia: od prostego opisu parametrów geometrycznych, poprzez uwzględnienie

Sposób podejścia do opisu elementu infrastruktury (kompleksowość):

1. Opis parametrów geometrycznych	⊗				
2. Przebieg tras			⊗	⊗	⊗
3. Opis jakości elementu		⊗	⊗	⊗	⊗
4. Percepcja człowieka (użytkownika)	⊗		⊗		⊗
Użytkownicy →	Bez rozróżnienia (ruch ogólny)	Piesi	Rowerzyści	Podróżujący w środkach transportu zbiorowego	Podróżujący w samochodach prywatnych

Rys. 2.1. Sposoby i specyfika opisu elementu infrastruktury spotykane w literaturze

przebiegu tras oraz opisu jakości elementu wyrażający między innymi bezpieczeństwo ruchu po odbiór elementu od strony percepcji człowieka (użytkownika).

Pierwszą próbą modelowania geometrii drogi w zastosowaniach symulacyjnych były modele dwuwymiarowe łączenia odcinków prostych z krzywymi [205]. Celem tych badań było stworzenie automatycznej procedury dokładnego modelowania ukształtowania drogi. W dalszych krokach ustalano prawidłowe ukształtowanie poziome drogi, które odpowiadałoby wymaganiom użytkowników. Wykryto punkty na drodze krytyczne dla przebiegu drogi odbieranego przez użytkownika [174], [240]. Wyróżniono problemy związane z opisem sieci drogowej oraz identyfikacją jej elementów [33], [49], [88], [127], [168], [189], [228]. Szczegółnej uwadze poddawana jest geometria drogi [118], [124] również w powiązaniu z istniejącym na niej ruchem [48], [209], a także w odniesieniu do tras dla transportu zbiorowego [38], [151] lub tranzytowego [44].

Kockelmann i Cerero [133] zebrali ponad dwadzieścia szczegółowych wielkości dotyczących opisu ukształtowania ulic i ich otoczenia (między innymi odległość pomiędzy sygnalizacjami na ulicach, udział ulic z pasami drzew). Kitamura i inni [131] prowadzili obserwacje polowe z uwzględnieniem zróżnicowania pięciu obszarów, Friends of Oregon [77] uwzględnili topografię, stan chodników, łatwość przekraczania jezdni w skali ocen od 1 do 3, Replogle [241] użył skali zero jedynkowej do oceny chodników, użycia terenu, przystanków transportu zbiorowego oraz infrastruktury rowerowej, Pikora i inni [227] skonstruowali audyt o nazwie SPACES do oceny jakości infrastruktury dla pieszych. McNally i Kulkarni [186] wykorzystali do oceny infrastruktury dla pieszych zarówno typ skrzyżowania, jak i ich gęstość. W zakresie opisu geometrii elementów infrastruktury dostępne są różne podejścia, niektóre dosyć drobiazgowo wyróżniające charakterystyczne wielkości i parametry. Wskazuje się na potrzebę rozróżnienia opisu w zależności od typu terenu (obszaru) lub grupy użytkowników.

Coraz większego znaczenia nabierają badania związane z innymi niż pojazdy (podróżujący w pojazdach) użytkownikami elementów infrastruktury drogowej [3], [26], [35], [93], [179], [291], [294]. Studia dotyczące lokalizacji infrastruktury rowerowej przeprowadzono m.in. w [277]. Prace [61] i [206] pokazały, że zachodzi pozytywna korelacja pomiędzy gęstością infrastruktury a procentowym udziałem podróży rowerowych w łącznej liczbie podróży. Stwierdzono [28], że czas podróży jest najważniejszym czynnikiem przy wyborze trasy, a drugi w kolejności jest stan nawierzchni. Praca [102] badała zapotrzebowanie na infrastrukturę rowerową z użyciem oceny preferencji. Shafizadeh i Niemeier stwierdzili [259], że większość ludzi jest skłonna wydłużyć swoją podróż, tak by skorzystać z trasy rowerowej o wysokim standardzie. Aultman i inni w pracy [15] wykorzystali narzędzia GIS do badań tras rowerowych w Guelph (Kanada). Podobne studia Taylora i Mahmassaniego [274] dotyczyły oceny systemu Bike and Ride. Z dystansów czasowych obliczono indeksy dostępności i wydłużenia (okrężności) [109]. Zrozumienie nieciągłości pasów dla rowerów prowadzonych na jezdni w środowisku miejskim analizowano w pracy [144].

W odniesieniu do ruchu pieszych: scharakteryzowano sąsiedzkie środowisko pieszego z wykorzystaniem drugorzędnych danych [224], opisano topologiczne kształtowanie sieci transportowej pieszych [199], analizowano spiętrzenia (korki) w dwuwymiarowym ruchu pieszych [202], przedstawiono podejście przestrzenne do planowania aktywności pieszych [258], dokonano oceny wpływu jakości infrastruktury dla pieszych na zrównoważenie rozwoju obszarów podmiejskich [239], analizowano procesy ruchu pieszych [82], [148], [159], [162]. Badano także wielkości charakteryzujące ruch pieszych: przepustowości i straty czasu na rondzie [220], straty czasu przy sygnalizacji [162], [173]. Studia [307] dotyczą zachowań pieszych na przejściach przez jezdnie według ich własnych raportów w relacji do przekonań odnośnie konsekwencji zachowań, modelu przekonań zdrowotnych, bodźców instrumentalnych i normatywnych z uwzględnieniem zasad bezpieczeństwa i czynników sytuacyjnych. W [179] skonstruowano model sieci neuronowej dla zwiększenia efektywności osygnalizowanego przejścia dla pieszych z wyspą środkową. W pracy [224] podano przykładowe wartości indeksu jakości (*performance index* – PFI) infrastruktury dla pieszych i rowerzystów.

Użytkownicy podróżujący pieszo lub na rowerach wymagają infrastruktury projektowanej według podobnych zasad jak infrastruktura dla pozostałych pojazdów. Ten aspekt nie jest jeszcze powszechnie spotykany w praktyce inżynierskiej. Badania obecne w literaturze pokazują, że w ruchu pieszych i rowerzystów występują takie same zjawiska jak w ruchu ogólnym (na przykład korki). Interesujący, dla dalszych badań, jest fakt, iż w grupie użytkowników pieszych i rowerzystów wyraźny jest wpływ wielkości opisujących infrastrukturę (w tym jej jakość) na zachowania użytkowników, w tym również wybór trasy, czy środka lokomocji. Z uwagi na specyfikę wyżej omawianych grup (zajęcie przestrzeni, prędkości), wpływ ten jest wyraźniejszy niż w innych grupach (środkach lokomocji).

Dla zagadnień rozważanych w niniejszej monografii istotne są badania nakierowane na człowieka i jego percepcję. Narażenie się na ryzyko wypadku pieszego na skrzyżowaniach osygnalizowanych przedstawiono w artykule [280]. W artykule [138] przedstawiono podejście do analizy kosztów/korzyści dla sytuacji dodania fazy dla rowerów na istniejącym skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną. W publikacji [67] oceniano pod kątem rozumienia przez kierowców różnych rodzajów sygnalizatorów dla wydzielonej i nadzorowanej fazy lewoskrętów. Pozycja [229] przedstawia zachowania polegające na przejeżdżaniu w trakcie sygnału czerwonego. W artykule [39] przedstawiono charakterystykę zachowań kierowców bazującą na obserwacjach polowych dotyczących ruchu w lewo z pasa nie wydzielonego na skrzyżowaniach. Wskazano, że istotne są odczucia użytkowników (odbiór jakości elementu infrastruktury) względem prostszego opisu geometrii elementu oraz odbywającego się w nim ruchu. Opis zachowań użytkowników bazuje często na oryginalnych wielkościach.

Uwidacznia się potrzeba zindywidualizowania sposobu opisu elementu infrastruktury w zależności od charakteru użytkownika. Najnowsze podejścia bazują na

specyficznych wielkościach odpowiadających gabarytom, charakterze ruchu, czy wreszcie percepcji uzależnionej od środka lokomocji. Ten ostatni aspekt jest istotnym przejściem od analiz od strony drogi (infrastruktury) i pojazdu (w tym dotyczących bezpieczeństwa ruchu), do podejścia od strony człowieka. Aspekt ten był od dawna podnoszony w zagadnieniach ruchu drogowego, jednak praktyka badawcza koncentrowała się na ruchu ogólnym (pojazdach). Czynniki związane z percepcją użytkowników infrastruktury są rozwijającym się elementem badań.

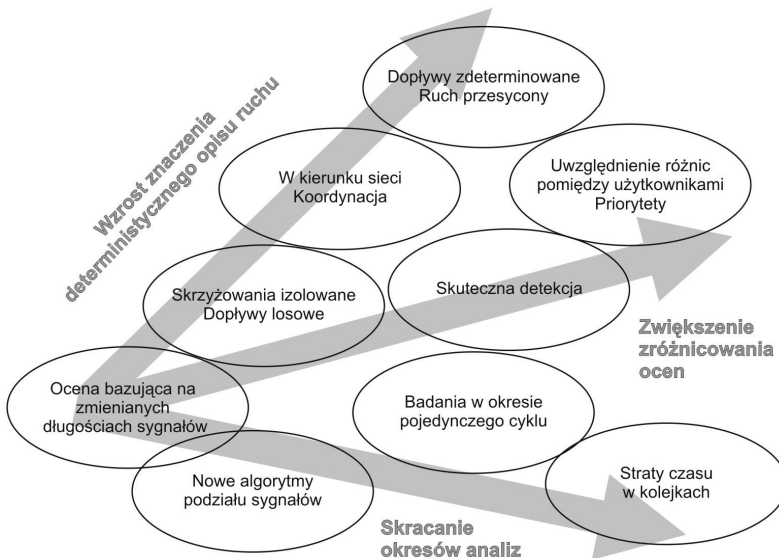
2.2. Znaczenie sygnalizacji drogowej w ocenie warunków ruchu

Zarządzanie ruchem definiuje się za [80] jako: „zespół działań mających na celu możliwe najlepsze wykorzystanie infrastruktury transportowej (...) dla zapewnienia bezpiecznego i efektywnego ruchu osób i towarów”. Jednym z narzędzi zarządzania jest sterowanie ruchem, w tym z wykorzystaniem sygnalizacji. Efekty sterowania mają wpływ na wielkości będące podstawą oceny warunków ruchu. Zatem metody sterowania ruchem, ich kompleksowość i efektywność będą mieć wpływ na sposób i wynik oceny elementu infrastruktury. Z punktu widzenia dalszych rozważań istotnym narzędziem sterowania ruchem wpływającym na ocenę elementu infrastruktury są sygnalizacje drogowe. Aspekty modeli projektowania sygnalizacji i jej dostosowywania do zmieniających się warunków ruchu konieczne są do uwzględnienia w metodzie oceny elementu infrastruktury.

Do oceny warunków ruchu w elementach infrastruktury drogowej używa się pojęcia Poziom Swobody Ruchu (w skrócie PSR). Skonstruowano wiele metod wyznaczania PSR, także w ruchu pieszych, rowerzystów i pojazdów transportu zbiorowego. Najpełniejszy i aktualny przegląd tych metod zawierają instrukcje HCM [100]. W niniejszej monografii oparto się na wersji tej instrukcji z roku 2000 z uwagi na jej dobrą dostępność oraz brak istotnych zmian (z punktu widzenia prowadzonych tu rozważań) w nowszych edycjach. W Polsce przyjęto niektóre z rozwiązań wprowadzonych w HCM, czego owocem są wytyczne: [55], [106], [107], [190]–[192], przy czym ostatnia z wymienionych pozycji dotyczy skrzyżowań wyposażonych w sygnalizacje. W celu kwalifikacji warunków ruchu do konkretnego PSR wykorzystuje się charakterystyczne wielkości dostosowane do specyfiki ocenianego elementu infrastruktury. W wyżej scharakteryzowanych metodach granice poszczególnych PSR wyznaczone są w sposób zdeterminowany. Podejmuje się jednak próby rozmytego definiowania zakresu poszczególnych poziomów [73].

Na rysunku 2.2 przedstawiono schematycznie aktualne aspekty uwzględniane przy ocenach warunków ruchu oraz kierunki i trendy zmian. Wychodząc od prostych sytuacji oceny bazujących na zmienianych długościach sygnałów, wyznaczono trzy głów-

ne kierunki rozwoju, w stronę: wzrostu znaczenia deterministycznego opisu ruchu na przykład w stanach przesyconych, zwiększenia zróżnicowania ocen na przykład w poszczególnych grupach użytkowników, skracania okresów analiz do przedziałów krótszych niż 1 godzina.



Rys. 2.2. Aspekty uwzględniane przy ocenach warunków ruchu

Jako jedni z pierwszych Allsop i Charlesworth [10] znaleźli w roku 1977 wzajemnie spójne rozwiązanie dla problemu przydziału sygnałów zielonych oraz rozdziału ruchu dla sieci transportowej o średniej wielkości. Od wprowadzenia sterowania ruchem za pomocą sygnalizacji w roku 1913 (Cleveland, USA) rozwój technologii i algorytmów zmierzał do zwiększenia bezpieczeństwa, efektywności i ograniczenia wpływu na środowisko [20]. Modyfikacje programów i algorytmów sterowania prowadzone były poprzez zmianę długości sygnałów zielonych oraz cyklu. Skonstruowano szereg metod wyznaczenia najwyższej ocenianej długości cyklu oraz minimalizacji strat czasu na skrzyżowaniach. W trakcie sterowania sygnalizacją określone grupy użytkowników konkurują o ten sam czas i przestrzeń. Dla wybranych grup przydziela się priorytety różnego stopnia. Dodatkowo, wprowadza się szereg symultanicznych kryteriów, takich jak: średnie i maksymalne straty czasu pieszych lub pojazdów, maksymalna długość kolejki lub procent zatrzymanych pojazdów. Pojawia się problem wyważenia priorytetów i kryteriów. Istnieje wiele metod porównywania. Jedną z nich są często stosowane sposoby analizy wielokryterialnej (np. Saaty'ego). Szeroki przegląd metod porównywania kryteriów w odniesieniu do ruchu drogowego zawarto między innymi w [248].

Prosty sposób sterowania dwufazowego dyskutowany był przez Nittymaakiego i Pursulę [215]. We wczesnych badaniach związanych z programowaniem sygnalizacji najczęściej literatury poświęcono sytuacji izolowanych skrzyżowań, dla których dopływy pojazdów miały rozkład Poissona. Wyprowadzono dwa podejścia do obliczania podziału sygnału zielonego: metody bazujące na fazach ruchu (Webster [293]; Allsop [5]–[7], [9], [11]; Tully [285]; Burrow [31]) oraz metody sterowania grupami (Improta i Cantarella [105]; Heydecker i Dudgeon [98]; Heydecker [99]; Silcock [264]; Sang i Silcock [253]). Metody sterowania grupami rozwinęto ostatecznie do połączonych (koordynowanych) sygnałów (Wong [295]–[297]; Wong i inni [299]) i kombinacji sterowania sygnalizacją z rozdziałem ruchu na trasy (Wong i Yang [298]; Wong i inni [300], [301]). Podejmowano próby integrowania podejść do łączenia przydziału pasów ruchu z obliczeniami długości sygnałów (Lam i inni [166]). Podobnie, w [294] rozważa się metody zintegrowanego przeznaczania pasów ruchu z działaniem sygnalizacji. Sterowanie ruchem za pomocą sygnalizacji jest bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na ocenę elementu infrastruktury. Wielkości dotyczące tego zagadnienia nie zawsze są integrowane z opisem geometrii. Tymczasem ocena użytkowników wymaga zintegrowanego podejścia i uwzględnienia interakcji pomiędzy rozplanowaniem geometrii a sterowaniem ruchem (w tym za pomocą sygnalizacji).

Wzrost znaczenia deterministycznego opisu ruchu widoczny jest przy wielopoziomowych strategiach sterowania ruchem za pomocą sygnalizacji (Gartner i inni [81]). W ostatnich dekadach studiowano wiele teorii sygnalizacji wliczywszy Webstera [293], Maya [185] i Allsopa [8]. Ani systemy sterowania, ani najczęściej używane oprogramowanie, takie jak SOAP [268] lub TRANSYT [282], nie były adekwatne do ruchu przesyconego. Osiągnięcia tych konwencjonalnych systemów sterowania pogarszały się w trudnych warunkach ruchu (Tarno i Parsonson [273], Cronje [52], Elahi i inni [71]). W latach 80. ubiegłego wieku Cronje [52] skonstruował model skrzyżowania z sygnalizacją zmiennoczasową stosowany w warunkach ruchu przesyconego. W podobnych badaniach, Elahi i inni [71] skonstruowali system bazodanowy SCII. W warunkach bliskich nasyceniu oraz przy ruchu przesyconym system SCII stosuje deterministyczny model proponowany przez Newella [210], w którym efekt zmian losowych jest pomijany, ponieważ przybywające i stojące w kolejce pojazdy stanowią regularne źródło na wejściu.

Podobnie: Gazis [83], Gazis i Potts [84], Green [89], Burhardt [30], Kaltenbach i Koivo [122], Dans i Gazis [54] oraz Michalopoulos i Stephanopoulos [193], [194] skonstruowali modele dla sterowania przesyconego. Gazis [83] zaproponował, że w trakcie okresu przesylenia, kolejki na wszystkich wlotach powinny dopuszczać kompletne i symultaniczne rozproszenie, aby minimalizować łączne straty czasu [89]. Metoda ta koncentruje się na fackie zapewnienia braku straconych sygnałów zielonych w każdym cyklu okresu przesylenia. Opisane wyżej podejścia koncentrują się na minimalizacji łącznej straty czasu na skrzyżowaniu podczas całego okresu przesylenia ruchu, a nie w pojedynczym cyklu. Michalopoulos i Stephanopoulos [193], [194] za-

proponowali efektywną i dwuetapową metodę podziału sygnału zielonego nazywaną sterowaniem bang-bang. Warto podkreślić kompleksowość ciągłego modelu strat czasu stworzonego przez Michalopoulou i Stephanopolou [193], [194] i zademonstrowanie, że czysty model strat czasu jest nieefektywny w poszukiwaniu optymalnej długości cyklu.

Powyższy opis sugeruje wykorzystanie w autorskiej metodzie oceny elementu infrastruktury strat czasu jako wielkości występującej w algorytmach sterowania ruchem za pomocą sygnalizacji oraz wielkości wykorzystywanej w ocenie warunków ruchu (na przykład w HCM).

Konstruowane są nowe algorytmy podziału sygnału zielonego: bazujący na kolumnach pojazdów i redukujący średnie straty czasu na skrzyżowaniach z pierwszeństwem przejazdu [116], dla skrzyżowań przesyconych [40], [254] z wykorzystaniem indeksu osiągnięć systemu zdefiniowanego jako suma ważonych kombinacji liniowych strat czasu i liczby zatrzymań w jednostce czasu dla wszystkich strumieni ruchu [36], z minimalizacją strat czasu [250], z uwzględnieniem wpływu lekkich pojazdów ciężarowych [134]. Konstruowane modele stosowane są zarówno do pojedynczych skrzyżowań, jak i dla prostych sieci składających się z kilku skrzyżowań [313]. Uwzględniane są nowe metody obliczania czasów międzyzielonych [165], [178], [242]. Zadania związane z sygnalizacjami dostosowywanymi na bieżąco programy pracy do zmian struktury ruchu (aktualizowanymi) dotyczyły ostatnio: sygnalizacji wielofazowych [203], skrzyżowań izolowanych [263], uwzględniania priorytetów [64], otoczenia węzłów drogowych [74]. Modele strumieni ruchu opisywano między innymi w [139], [151], [177], [198], [245], [269], [290], [308]. Analizowano granice i straty czasu w kolejkach pojazdów [29], [169]. Bardziej zaawansowane modele dotyczyły już całych sieci drogowych [2], [42], [63], [270].

Najnowsze podejścia uwzględniają aspekty istotne z punktu widzenia prezentowanej tu metody, takie jak: różnice w algorytmach dla użytkowników poruszających się innymi środkami lokomocji, czy wprowadzanie priorytetów. Metody proponowane dla kilku skrzyżowań lub całych sieci są adaptowalne dla pojedynczych elementów infrastruktury (w rozumieniu definicji niniejszej pracy) dzięki zastosowaniu w nich uniwersalnych wielkości takich jak długości kolejek, czy straty czasu w kolejkach.

Sterowanie sygnalizacją w czasie rzeczywistym opisali: Mirchandani i Head w [197] (algorytmy i analizy systemu sterowania) oraz Srinivasan i inni w [270] (z wykorzystaniem sieci neuronowej). W publikacjach dotyczących sygnalizacji aktualizowanych porusza się także zagadnienia podstawowych wielkości związanych z oceną warunków ruchu takich jak: straty czasu [65], czy odległość widoczności [309] oraz ich wpływ na efekty sterowania ruchem. Warunkiem skutecznej pracy sygnalizacji aktualizowanych jest niezawodna detekcja użytkowników drogi. Najnowsze badania koncentrują się na doskonaleniu nie tylko detekcji pojazdów: [13], [50], [51], [288], ale i także pieszych: [12], [123], [153], [154], [196], [305]. O efektywności aktualizowanego sterowania ruchem decyduje również percepcja użytkowników dro-

gi. Parametry takie jak czas reakcji ([32], [184], [238], [255], [310]), czy nawet rozumienie sygnałów przez uczestników ruchu [23], [140] są istotnymi elementami poruszonymi ostatnio w literaturze fachowej. W ramach aktualizowanego sterowania ruchem występuje także zadanie koordynacji [149], [281].

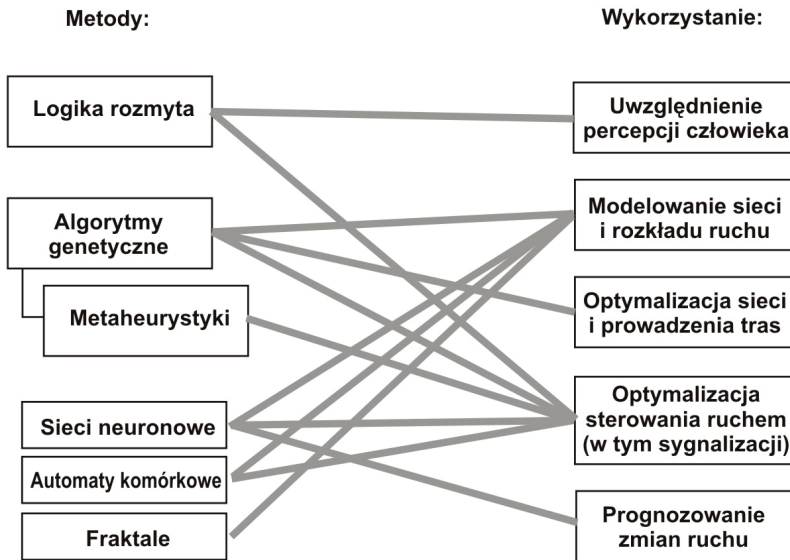
Do efektywnej pracy algorytmów sterowania niezbędne jest zawężenie okresu analiz do przedziałów wyraźnie krótszych niż 1 godzina. Najnowsze podejście koncentruje się na okresie równym długości cyklu. Dotyczy to także predykcji warunków ruchu i wielkości go opisujących. Wielkości charakteryzujące ruch powinny rozróżniać okres analiz nawet na poziomie nazewnictwa poszczególnych wielkości, a przede wszystkim na poziomie stosowanych jednostek miary. Ten aspekt jest rozwinięty w metodzie autora monografii.

2.3. Tendencje wykorzystania metod heurystycznych w ocenie elementów infrastruktury drogowej

Podstawowym i najprostszym podejściem do oceny elementów infrastruktury jest analiza geometrii drogi. Ocena ukształtowania drogi dotyczy najczęściej znalezienia najlepszej alternatywy pomiędzy parami punktów ([114], [115], [119], [118], [128]). Proces oceny powinien uwzględniać wiele czynników, takich jak: struktura, topografia, socjoekonomia, ekologia, geologia, typ gleby, wzorce wykorzystania terenu, środowisko i ogólnie społeczeństwo [129]. Stosownie do tych czynników zbudowano modele: [79], [219], [262]. Gdy przedmiotem oceny jest ukształtowanie poziome drogi, stosuje się następujące narzędzia: obliczanie zmiennych (przeгляд rozwiązań) – Wan [292], Howard i inni [103], Thomson i Sykes [275], Shaw i Howard [261], [262]; optymalizacja sieciowa – OECD [219], Turner i Miles [286], Athanassoulis i Calogero [14], Parker [223], Trietsch [283], [284]; programowanie dynamiczne Nicholson i inni [211]; algorytmy genetyczne – Jong [117]. Gdy analizy dotyczą ukształtowania pionowego drogi, stosowanymi narzędziami są: przeliczanie (enumeracja) – Easa [70]; programowanie dynamiczne – Puy Huarte [234], Murchland [204], Goh i inni [86], Fwa [79]; programowanie liniowe – ReVelle i inni [243], Chapra i Canale [41]; przeszukiwanie numeryczne – Hayman [95], Goh i inni [86], Robinson [244], Fwa [79], OECD [219]; algorytmy genetyczne – Jong [117]. W sytuacji zintegrowanej oceny ukształtowania poziomego i pionowego, jako narzędzia stosuje się: programowanie dynamiczne – Nicholson i inni [211]; przeszukiwanie numeryczne – Chew i inni [43]; optymalizację dwustadiową – Parker [223], Trietsch [283]; algorytmy genetyczne – Jong [117], Jha [112], Kim [126].

Steenbrink [271] zauważa, że jest istotną rzeczą, aby wszystkie zmienne o charakterze ilościowym stosowane w ocenie były wyrażone w tych samych jednostkach. Tinbergen [279] już w roku 1957 rozważał wpływ budowy drogi na niektóre zmienne

ekonomiczne. Ben Shahr i inni [21] przedstawili w roku 1969 problem planowania miejskiego jako zadanie programowania liniowego. W ocenie przyjęto prostą kombinację zmiennych ekonomicznych i społecznych. Mannheim i Hall [182] zaproponowali stworzenie listy czynników istotnych w ocenie. Lindblom [175] zauważył, że dopuszczalny jest wybór takich samych wielkości dla oceny różnych elementów infrastruktury. Pojęcie korzyści konsumenta w planowaniu transportu wykorzystywali jako pierwsi między innymi: Mohring i Harwitz [200], Quarmby [236], Neuburger [207], [208], Bergendahl [22] i Smith [267]. Smith [267] i Neuburger [208] wykorzystali tę teorię do obliczania różnych schematów wykorzystania terenu.



Rys. 2.3. Wykorzystanie metod heurystycznych w ocenie i optymalizacji elementów infrastruktury drogowej

Złożoność zjawisk współczesnych nauk inżynierskich oraz chęć poszukiwania coraz doskonalszych i bliższych percepcji człowieka rozwiązań spowodowały w ostatnich latach żywiołowy rozwój nowych technik obliczeniowych. Od lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku obserwuje się wyraźny przyrost i coraz większą złożoność metod heurystycznych (po angielsku *heuristics*). Rozwój ten wyrażony chociażby znaczną liczbą nowych czasopism fachowych i prac doktorskich dość ściśle związany jest z unowocześnianiem komputerów, zwiększaniem ich mocy obliczeniowych i opracowywaniem nowych algorytmów. Także w Polsce powstało w ostatnich latach wiele prac przybliżających i wykorzystujących metody heurystyczne: [17], [24], [25], [110], [142], [145], [161], [164], [170], [212], [225], [249], [257], [287], [316]. Rozwija się te metody oraz doprowadza do zastosowań w coraz to nowych dziedzinach

techniki. Na rysunku 2.3 przedstawiono omawiane niżej możliwości wykorzystania nowoczesnych metod w zagadnieniach istotnych dla tematyki niniejszej monografii.

Wnioskowanie rozmyte, które nie zakłada konkretnych wartości określonych wielkości, a przyjmuje rozmyty i niepewny ich charakter, zaczyna być coraz bardziej popularne w zagadnieniach transportowych (na przykład: [171], [195], [213], [214]). Jest to wynikiem uwzględnienia postrzegania człowieka i nastawiania analiz na ludzką percepcję. Z punktu widzenia użytkownika nie mają na przykład znaczenia konkretne (nierozmyte) wartości prędkości ruchu, a raczej jej zakres – różny w zależności od indywidualnych cech użytkownika, a więc rozmyty [139]. Oprócz wspomnianej prędkości [1] uwzględnia się inne wielkości, takie jak: straty czasu, czy czas podróży [94]. Ponadto opis rozmyty może dotyczyć wzorców zachowań ruchowych [312] i poziomów swobody ruchu [73]. W ostatnich latach także w Polsce powstało kilka prac doktorskich i habilitacyjnych z zakresu budownictwa oraz z nauk pokrewnych i z wykorzystaniem zależności rozmytych [96], [135], [181], [231], [256], [265], [272], [306].

Systemy rozmyte są bardzo popularne w zagadnieniach sterowania ruchem drogowym za pomocą sygnalizacji [215], [222]. Takie podejście pozwala uwzględnić różne aspekty w procesie sterowania, takie jak: płynność ruchu, ekonomika rozwiązania, wpływ na środowisko, czy bezpieczeństwo ruchu [130]. Uwzględnia się także: różnicowanie długości sygnałów międzyzielonych [121], [165], czy koordynację sygnalizacji z uwzględnieniem strat czasu [250] względem odczuć użytkowników drogi. Wnioskowanie rozmyte użyteczne jest także do rozwiązywania zagadnień: wyboru tras przejazdu [249], podziału na środki transportu [172], czy przydziału pojazdów i kierowców do tras [201]. W artykule [235] zaproponowano i modelowano system estymacji strat czasu dla skrzyżowania bazujący na logice rozmytej. Publikacja [47] wprowadza nowatorskie analizy wrażliwości sterowania sygnalizacją w sytuacji występowania kolejek pojazdów. Wyprowadzono zbiór wielkości pochodnych od strat czasu podróży z uwzględnieniem elementów sterowania ruchem za pomocą sygnalizacji. Badania [174] dotyczą stworzenia ogólnego algorytmu modelowania ukształtowania drogi dla symulacji obrazu ruchu. Do aproksymacji środków pasa ruchu używana jest technika klastryzacji [189]. Trajektorie ruchu są modelowane z użyciem zmiennych w postaci wielomianów niskiego stopnia (rzędu) [189]. Nowe standardy amerykańskiej administracji drogowej (*Federal Highway Administration – FHA*) zmierzają do wprowadzenia ilościowych norm projektowania bazujących na kryteriach bezpieczeństwa oraz serii powiązanych ze sobą cech drogi [66].

Algorytmy bazujące na ewolucji lub zachowaniach populacji organizmów żywych określane są wspólnie jako algorytmy ewolucyjne (ang. *Evolutionary Algorithms*, w skrócie EAs). Wyróżnia się, za [72], pięć podstawowych rodzajów EA (podano nazwy w języku angielskim): *Genetic Algorithms* (GA), *Memetic Algorithms* (MA), *Particle Swarm* (PS), *Ant Colony* (AC) i *Shuffled Frog Leaping* (SFL). Jako heurystyki pokrewne EA, bazujące na podobnym podejściu do rozwiązania problemu uważa

się także metody [16]: *Simulated Annealing* (SA) i *Tabu Search* (TS). Powstało wiele metod hybrydowych modyfikujących oryginalne podejścia i wykorzystujących elementy różnych algorytmów (nazywa się je metaheurystykami). Z porównania funkcjonalności różnych metod EA [72] wynika, że najmniej efektywną jest klasyczny i niemodyfikowany algorytm genetyczny.

Pierwsze zastosowanie algorytmów genetycznych do poszukiwania najbardziej efektywnych algorytmów sygnalizacji drogowych przedstawił Foy i inni [76] w odniesieniu do metody Dicksona [60]. Podejście z algorytmem genetycznym do rozwiązania zadania sterowania ruchem z użyciem sygnalizacji oraz rozdziału ruchu zostało przedstawione także w pracach [36] i [250]. Jednym z nowszych jest podejście Jonga i Schonfelda [119]. Zalety algorytmów genetycznych względem tradycyjnych metod dla przedmiotowych zadań opisano szeroko w [117]. Model integrujący system informacji geograficznej (GIS) z algorytmem genetycznym skonstruowano w [113] i [115]. Stało się to próbą wkomponowania w proces oceny obiektów, takich jak: skrzyżowania, tunele i mosty w celu zwiększenia użyteczności modelu [128].

Artykuł [270] adoptuje podejście z systemem wieloagentowym do stworzenia modelu sterowania sygnalizacją. W zagadnieniach związanych z przestrzenną lokalizacją drogi często wykorzystuje się algorytmy genetyczne do: prowadzenia (tyczenia) dróg [129], planowania i kształtowania tras tranzytowych ruchu ogólnego [44] lub transportu zbiorowego [38], uwzględnienia elementów polityki zrównoważonego rozwoju [33], ukształtowania drogi z uszanowaniem rzeczywistych uwarunkowań takich jak: krzywizna i odległości widoczności [174]. Wykorzystuje się także zbliżone techniki indeksacji i wyszukiwania anomalii w trajektoriach ruchu [189]. W pracy [315] opisano detekcję pieszych z wykorzystaniem sieci neuronowych. W strefie wdrożeń metod heurystycznych znajdują się więc nie tylko pojazdy, ale także inni użytkownicy dróg. W zdalnej nawigacji i lokalizacji pojazdów (określanych jako mobilne roboty) dochodzą do głosu zagadnienia niepewności modelowane w sposób rozmyty [56].

W zakresie sterowania ruchem za pomocą sygnalizacji świetlnych wykorzystuje się zróżnicowane narzędzia: podejście niezawodnościowe [178], nieciągłą metodę elementów skończonych Galerkina [176], modele adaptacyjne bazujące na stacjonarnych i dyskretnych w czasie procesach decyzyjnych Markowa [313], programowanie logiczne systemu Leibniza [75]. Zwiększenie efektywności sterowania formułuje się w celu maksymalizacji przepustowości i minimalizacji długości cyklu [294]. W pracy [40] zbudowano modele podziału sygnału zielonego dla stanu przesylenia ruchu.

W celu poprawy efektywności pracy sygnalizacji badano w [2] przepływ o najkrótszym czasie i najmniejszym koszcie. Sánchez, Galán i Rubio przedstawili w [252] zastosowanie techniki ewolucyjnej. Cantarella i inni opisali w [34] heurystyki wykorzystywane w kształtowaniu miejskich sieci drogowych. Przydziały sygnałów i topologia sieci (w szczególności przydział pasów ruchu) są głównymi elementami modelu kształtowania sieci. Ceylan skonstruował kombinowany model obszarowego sterowania ruchem wykorzystujący algorytm genetyczny i metodę wspinaczkową (*Hill*

Climbing) [37]. System opisany w [197] dopuszcza zróżnicowane moduły w rozwiązywaniu zhierarchizowanych podproblemów. Nowe podejście [64] o nazwie SPPORT (*Signal Priority Procedure for Optimization in Real-Time*) pozwala uwzględnić wpływ pojazdów z priorytetem, w tym przypadku transportu zbiorowego.

Do modelowania sieci drogowych wykorzystuje się fraktale [130], a do rozdziału ruchu na trasy i środki transportu algorytmy genetyczne [121] oraz modelowanie rozmyte, co pozwala oddać niepewność co do wyboru trasy [97] lub zachowań użytkowników systemu transportu [108]. Modele ruchu w sieciach drogowych wykorzystują sieci neuronowe [59]. Narzędzia te służą również do prognozowania ruchu [260]. Innym, choć nie heurystycznym, ale nowym podejściem do modelowania ruchu pojazdów jest wykorzystywanie teorii automatów komórkowych (w pracach zagranicznych nazywanych: *cellular automata*) [19]. Pozwala to zauważyć, że ruch drogowy mimo znacznej nieprzewidywalności i niepewności posiada również w niektórych przypadkach charakter zdeterminowany.

Zaawansowane systemy sterowania ruchem z wykorzystaniem sygnalizacji aktualizowanych często bazują na metodologii automatów komórkowych [139], [177], [245], [269], [308]. Z metodologią sterowania automatycznego łączy modelowanie matematyczne strategia TUC [63]. Wykorzystywane są także inne narzędzia: metody programowania dynamicznego [74], krzyżowe analizy rekurencyjne kombinowane z siecią Bayesowską [290], modele kolejkowe [198], modele oparte na logice rozmytej [203], podejścia stochastyczne [263], modele probabilistyczne [276], paradygmat z teorii gier [42], sieci neuronowe [270].

Schemat na rysunku 2.3 oraz powyższe zestawienie, wskazują że różne rodzaje metod heurystycznych nadają się do wykorzystania na wielu etapach opisu, analiz, czy oceny odmiennych elementów infrastruktury. Wskazuje to na uniwersalność zastosowań nowoczesnych podejść. Dodatkowym atutem metod heurystycznych jest ich efektywność i adaptowalność do zmiennych warunków ruchu czy zróżnicowanej oceny użytkowników infrastruktury.

2.4. Podsumowanie stanu wiedzy i ukierunkowanie badań autora monografii

Konstruowane dotąd metody oceny elementów infrastruktury drogowej są wycinkowe. Koncentrują się na wielkościach z zakresu geometrii drogi albo dotyczą głównie wielkości związanych z ruchem. W istniejących modelach rzadko rozróżnia się poszczególnych użytkowników. Rzadko akcentuje się fakt, że osoby podróżujące różnymi środkami lokomocji poruszają się we wspólnej przestrzeni elementu infrastruktury. Prace dotyczące transportu zbiorowego, pieszych lub rowerzystów traktują te grupy użytkowników w izolacji od siebie i od ruchu wszystkich pojazdów.

Większość dotychczasowych analiz koncentruje się na ruchu pojazdów (ruch ogólny): [48], [66], [87], [118], [124], [129], [167], [168], [174], [189], [209], [228], [289], choć podejmowano także rozważania nad podróżami w ogóle, nie precyzując grupy użytkowników: [38], [49], [109], [120]. Niektóre prace związane z poruszaniem tu zagadnieniem dedykowano pozostałym użytkownikom: pojazdom transportu zbiorowego: [44], [46], [69], [146], [147], [149]–[152], [156], rowerzystom [57], [157] i pieszym: [199], [202], [239], [258]. W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania problematyką innych grup użytkowników drogi niż pojazdy ruchu ogólnego: [88], [144], [160], [224], [277]. Specyficzny dział tworzą studia dotyczące pojazdów w ruchu automatycznym (*Automated Guided Vehicle* – AGV) [168], [289]. Z uwagi na specyfikę są to jednak w dużej mierze studia teoretyczne.

Jako elementy infrastruktury, których przestrzeń jest analizowana, występują zarówno odcinki międzywęzłowe: [48], [87], [118], [124], [129], [167], [174], [189], [209], jak i całe sieci: [38], [44], [49], [66], [88], [109], [120], [144], [151], [199], [202], [224], [228], [239], [258], [277], [289]. Dla odcinków międzywęzłowych rozważane są między innymi: problemy klasyfikacji poszczególnych pasów ruchu [189], [209], tyczenie osi trasy z uwzględnieniem zróżnicowanych obiektów [129], geometria przekroju poprzecznego [124], czy zagadnienia wąskich gardel [48]. W zagadnieniach sieciowych analizuje się ostatnio niektóre elementy istotne z punktu widzenia rozważań niniejszej pracy: wykorzystanie technik wideo [228], wpływ jakości infrastruktury na ruch [66], [144], [239], ocena indywidualnych preferencji użytkowników [224], [277].

Dla dalszych rozważań istotne jest także poruszanie w literaturze następujących zagadnień: integracja opisu geometrii drogi z ruchem: [44], [48], [49], [66], [104], [124], [132], [199], [209], [224], [232], [237], [277], [289], uwzględnienie losowości i niepewności [33], [49], [202] oraz opis elementów infrastruktury za pomocą wielkości jakościowych: [44], [68], [87], [109], [124], [127], [143], [144], [167], [174], [199], [224], [239], [277]. Często i wskazywanym jako najbardziej efektywne narzędziem oceny są algorytmy genetyczne: [38], [44], [111], [118], [129], [164], [174].

Opisane wyżej podejścia do opisu elementu infrastruktury nie nadają się zbyt dobrze do procesu oceny. Kompletny zestaw zmiennych zawiera wielkości o różnym charakterze (czas, liczba użytkowników, wymiary jezdni). Wielkości te trudno ze sobą porównywać. Konstruowanie wielkości zagregowanych, także jak dotąd, nie daje zadowalających rezultatów. Przydatne jest przejście do wielkości opisujących jakość sterowania ruchem i ogólniej ocenę elementów infrastruktury z punktu widzenia poszczególnych użytkowników. Cenne jest to także z uwagi na skoncentrowanie się na specyfice percepcji człowieka i to w zależności od używanego środka lokomocji, a nie na opisie czysto technicznym, sparametryzowanym przez określone wielkości o konkretnych wartościach.

2.5. Sformułowanie celu i tezy monografii

Elementy infrastruktury drogowej jako obiekty budowlane, po których przemieszczają się ludzie w różnych środkach lokomocji, powinny być kształtowane z uwzględnieniem specyfiki użytkowników, to znaczy z uwzględnieniem indywidualnych wymagań oraz percepcji determinowanej środkiem lokomocji i innymi uwarunkowaniami, takimi jak specyfika lokalna.

Powyższe stwierdzenie wskazuje na potrzebę przeformułowania dotychczasowych sposobów opisu elementów infrastruktury. Zamiast odrębnych podejść, w zależności od środka lokomocji, polegających na stosowaniu różnych metod, formuł, wielkości i jednostek, konieczna jest ich unifikacja. Zunifikowany opis elementu infrastruktury powinien uwzględniać: wielkości geometryczne, wielkości charakteryzujące ruch użytkowników, parametry sterowania ruchem itp. Ponadto, unifikacja powinna uwzględniać opis od strony człowieka, niezależnie czy porusza się on pieszo, rowerem, w pojeździe jako pasażer, czy jako kierowca.

Istotnym celem niniejszej monografii jest stworzenie modelu oceny elementu infrastruktury drogowej umożliwiającego opis dowolnego obiektu (węzeł, odcinek międzywęzłowy) niezależnie od lokalizacji, w sposób zunifikowany oraz zintegrowany, czyli tożsamy dla użytkowników z dowolnej grupy. W tym celu określone są specyficzne poziomy opisu elementu infrastruktury oraz wyprowadzone nowe wielkości bazujące na dotychczas stosowanych. Nowe wielkości ujmują specyfikę percepcji człowieka. **Pierwszą tezę monografii jest stwierdzenie, że możliwy jest zintegrowany opis elementu infrastruktury drogowej w postaci węzła lub odcinka międzywęzłowego uwzględniający specyfikę użytkowników z różnych grup.**

Projektowanie elementów infrastruktury wymaga oceny różnych wariantów rozwiązania, a także poszukiwania rozwiązania o najwyższej ocenie. Istotna jest w tym momencie metoda oceny elementu infrastruktury, która ujmuje uwarunkowania użytkowników z różnych grup, wpływ ich liczebności, możliwość wprowadzenia preferencji przez decydentów zarządzających systemem transportu. Na bazie skonstruowanego zintegrowanego modelu elementu infrastruktury i zastosowanych w nim wielkości, autor monografii wyprowadza metodę oceny uwzględniającą powyższe uwarunkowania. **Druga teza monografii brzmi: możliwa jest ocena elementów infrastruktury z uwzględnieniem potrzeb i specyfiki użytkowników różnych grup z uwzględnieniem wpływu liczebności grup i innych aspektów.**

Dla modelowania indywidualnych i grupowych preferencji w ocenie elementu infrastruktury przydatne jest podejście heurystyczne w kalibracji parametrów autorskich wielkości oceny. Podobnie, nowoczesne metody wykorzystane zostają do zwiększenia efektywności poszukiwania rozwiązania o najwyższej ocenie. W tym celu wprowadza się metody grupowania rozmytego do kalibracji parametrów funkcji oceny elementu infrastruktury oraz algorytmy genetyczne do przeglądu ocen poszczególnych rozwią-

zań oraz do efektywnego znalezienia rozwiązania o najwyższej ocenie. Kolejnym celem monografii jest wykorzystanie dotychczas stosowanych heurystyk i skonstruowanie narzędzi dostosowanych do specyfiki zagadnień niniejszej monografii. **Trzecia teza** monografii zakłada, że **możliwa jest konstrukcja efektywnych narzędzi heurystycznych: grupowania rozmytego i algorytmów genetycznych do oceny elementów infrastruktury drogowej według metody formułowanej przez autora monografii**, a w szczególności do kalibracji parametrów funkcji oceny oraz w poszukiwaniu wariantu elementu infrastruktury o najwyższej ocenie.

2.6. Omówienie zakresu monografii

Monografię podzielono na osiem rozdziałów. Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem w poruszaną tematykę i zawiera omówienie stosowanych przez autora specyficznych pojęć i terminów czasami odmiennych od dotychczas spotykanych. Wprowadzono i zdefiniowano kluczowe dla dalszych rozważań pojęcia, takie jak: element infrastruktury drogowej, jego rodzaje (węzeł i odcinek międzywęzłowy) oraz części, grupa użytkowników, trasa, środek lokomocji, opis i ocena warunków ruchu. Określono wstępnie metodologię oceny definiując komponenty (poziomy) opisu elementu infrastruktury drogowej. Wskazano na rozmyty charakter oceny.

W rozdziale drugim dokonano zestawienia stanu wiedzy z zakresu poruszanych zagadnień w rozbiciu na: przegląd zagadnień z zakresu opisu elementu infrastruktury (rozdział 2.1), znaczenie sygnalizacji drogowej w ocenie warunków ruchu (rozdział 2.2) i tendencje wykorzystania metod heurystycznych w ocenie elementów infrastruktury drogowej (rozdział 2.3). Na bazie tego podsumowania określono autorski wkład w dziedzinę projektowania i oceny elementów infrastruktury drogowej. Sformułowano trzy tezy oraz sprecyzowano cel i zakres monografii.

Rozdział trzeci zawiera opis modelu oceny elementu infrastruktury. Opisano (rozdział 3.1) wielopoziomową strukturę modelu z podziałem na charakterystyczne ujęcia dotyczące czasu oraz przestrzeni. Omówiono wyróżniane grupy użytkowników, przyjmując człowieka poruszającego się różnymi środkami lokomocji jako podstawową jednostkę miary. Rozdział 3.2 dotyczy poziomu opisu elementu infrastruktury. Omówiono wielkości związane z geometrią drogi oraz charakteryzujące ruch drogowy. Uwzględniono opis zachowywania się pojedynczych użytkowników drogi oraz całej ich zbiorowości. Wskazano na czas, jako podstawową wielkość opisującą ruch oraz na wielkości z nim powiązane, między innymi prędkość ruchu.

Wielkości związane z oceną warunków ruchu opisano w rozdziale 3.3. Wprowadzono zestaw wielkości podstawowych będących stymulantami i destymulantami oceny. Przedstawiono także inne wielkości dotyczące elementu infrastruktury nazywane tu wagami. Określono liczebność grup użytkowników (lub ich udział w ogólnej

liczbie użytkowników) jako podstawowe wagi w proponowanej dalej metodzie. Wyodrębniono wagi, które modyfikują znaczenie (wartości) wielkości podstawowych.

W dalszej kolejności (rozdział 3.4) zaproponowano autorską metodę konstruowania wielkości zagregowanych. Na bazie wybranych wielkości związanych z czasem i z przepustowością skonstruowano zagregowane wielkości oceny elementu infrastruktury (pozytywne i negatywne). Wielkości te nazwano ekwiwalentami jakości. Zaproponowano zapis ekwiwalentów umożliwiający używanie różnych skal ocen: procentowej (preferowanej w dalszych analizach) lub liczbowej. Wprowadzono pojęcie wielkości psychologicznych, uwzględniając inne podejście do oceny elementu infrastruktury niż przy użyciu wielkości technicznych. Wielkości psychologiczne wyrażać mają percepcję człowieka. W przeciwieństwie do precyzyjnych wielkości technicznych mają one nieprecyzyjny charakter. Wskazano na sensowność wykorzystania metod wnioskowania rozmytego do opisu i analizowania wielkości psychologicznych. Rozdział 3.5 zawiera definicje autorskich, rozmytych funkcji oceny elementu infrastruktury. Skonstruowano specyficzne funkcje satysfakcji z jakości (F_S) i akceptacji występujących w elemencie niedogodności (F_A). Zaproponowano dwa sposoby zapisu tych funkcji: liniowy i harmoniczny (z wykorzystaniem funkcji \sin i \cos). Określono ogólnie parametry charakteryzujące funkcje typu F_S i F_A .

Rozdział 4 dotyczy identyfikacji zmiennych funkcji satysfakcji i akceptacji. W rozdziale 4.1 scharakteryzowano ogólnie możliwe metody identyfikacji. Metody te są różne w zależności od wielkości występujących w konkretnych funkcjach F_S i F_A . Rozdział 4.2 przybliży wielkości wykorzystywane w metodzie HCM, zbliżonej do rozważań niniejszej pracy. Wielkości te oraz sama metoda HCM stanowią przykład oceny elementów infrastruktury z uwzględnieniem specyfiki różnych grup użytkowników oraz wskazują kierunki dalszych prac. W kolejnych rozdziałach (4.3–4.5) autor monografii wyprowadza zestawy wielkości opisujących elementy infrastruktury drogowej charakterystyczne dla typowych problemów (zadań) projektowych. Zadania te podzielono według powiązań z podziałem: dostępnego czasu w sygnalizacjach stałoczasowych (rozdział 4.3), dostępnej przestrzeni elementów infrastruktury (rozdział 4.4) oraz czasu i przestrzeni (kompleksowo) w sygnalizacjach dostosowujących się do zmian ruchu (rozdział 4.5).

Rozdział 5 dotyczy kalibracji parametrów funkcji satysfakcji i akceptacji. Rozdział 5.1 zawiera opis i przykład klasycznej metody kalibracji dotyczącej wielkości opisywanych przez dwie zmienne (cecha i jej ocena) oraz metodzie grupowania rozmytego FCM. Rozpatrywaną i kalibrowaną przykładową wielkością jest tu odległość pomiędzy przejściami przez jezdnie. Dla grupowania analizowanej wielkości autor monografii zastosował opracowany przez siebie algorytm i program FUZZY. W rozdziale 5.2 opisano proponowaną przez autora monografii nową metodę kalibracji. Metoda ta dotyczy wielkości opisywanych przez jedną zmienną (tylko cecha), ale jak wykazano, pozwala na efektywną kalibrację dla wielkości używanych w prezentowanej metodzie. W kolejnych rozdziałach (5.3–5.5) dokonano kalibracji parametrów wykorzystywa-

nych dalej wielkości w podziale na: związane z natężeniem ruchu (w tym także rezerwa i stopień wykorzystania przepustowości), stratami czasu (w tym długości sygnałów zielonych) i prędkością (w tym szerokość pasa ruchu). W rozdziale 5.6 przedstawiono wzorcowe zestawy wartości parametrów dla wybranych wielkości będące wynikiem podsumowania studiów całego rozdziału. Podano sposoby wyznaczania parametrów dla wielkości dotąd nie grupowanych w sposób rozmyty.

W rozdziale 6 sformułowano metodę oceny elementu infrastruktury drogowej bazującą na modelu opisanym w rozdziale 3 oraz wielkościach zidentyfikowanych w rozdziale 4 i parametrach kalibrowanych w rozdziale 5. W rozdziale 6.1 opisano konstrukcję metody w podziale na trzy składniki uwzględniające: wrażliwość użytkowników i preferencje lokalne poprzez dobór wartości parametrów cząstkowych funkcji oceny, preferencje zarządcy systemu transportu poprzez dobór wag oraz wpływ liczebności grup poprzez dobór postaci funkcji oceny. Poszczególne składniki metody omówiono szczegółowo w rozdziałach: 6.2–6.4. Zbudowano trzy postacie funkcje oceny bazujące na wyprowadzonych wcześniej funkcjach satysfakcji i akceptacji: F_S i F_A dla wszystkich grup użytkowników z uwzględnieniem wag.

Rozdział 6.5 omawia sposoby poszukiwania rozwiązania elementu infrastruktury o najwyższej ocenie. Przedstawiono sposób analityczny oraz heurystyczny. Stwierdzono, że w sposób analityczny można rozwiązać tylko proste zadania z nieskomplikowaną postacią funkcji oceny i z niewielką liczbą zmiennych. Jako metodę heurystyczną zaproponowano algorytmy genetyczne – specyficzne metody przeszukiwania przestrzeni rozwiązań wykorzystujące analogie do zasad doboru naturalnego lub zachowań społecznych organizmów żywych. Omówiono autorski algorytm skonstruowany i stosowany w monografii, o nazwie GAFRO (*Genetic Algorithm For Road Optimisation*, czyli algorytm genetyczny do optymalizacji w elementach infrastruktury drogowej). Przedstawiono elementy odróżniające podejście autora od klasycznego GA. Opisano specyficzną terminologię oraz jej powiązanie z nazewnictwem wprowadzonym w metodzie oceny.

W rozdziale 7 pokazano przykład zastosowania metody oceny elementu infrastruktury pod kątem testowania wpływu składników metody na wybór wariantu rozwiązania. Rozdział 7.1 zawiera opis analizowanego elementu infrastruktury – wybrano złożone skrzyżowanie, na którym wystąpić mogą różnorodne problemy projektowe. Określono ponadto wielkości wykorzystane jako zmienne cząstkowych funkcji oceny. W rozdziale 7.2 podano przykład oceny takiego elementu według dotychczas stosowanych metod. Wskazano na ich ograniczenia. W rozdziałach: 7.3–7.5 przeanalizowano wpływ: wyboru postaci funkcji oceny, wag jako preferencji dla określonych grup użytkowników drogi oraz zmian wartości parametrów cząstkowych funkcji oceny na rozwiązania problemów opisywanych w rozdziale 4 monografii. W ten sposób badano możliwości uwzględniania priorytetów dla użytkowników z różnych grup, efektywność nadawanych priorytetów oraz sposoby ingerencji decydenta w proces projektowania i oceny elementu infrastruktury. Jednocześnie wykaza-

no uniwersalność i wielostronność metody autora monografii, także na tle rozwiązań uzyskiwanych dotychczasowymi metodami.

W rozdziale 8 dokonano podsumowania pracy prezentując efekty zastosowania metody oraz zbierając wnioski z ogólnego podsumowania monografii. Uwypuklono osiągnięcia i wkład własny autora. Opisano możliwości wykorzystania efektów pracy oraz określono dalsze kierunki badań.

Pracę zamyka zestawienie literatury przywoływanej w poszczególnych rozdziałach.

3. Model oceny elementu infrastruktury drogowej przez jej użytkowników

3.1. Struktura modelu

Opis elementu infrastruktury (węzła lub odcinka międzywęzłowego) w postaci najbardziej szczegółowej wymaga podania wielkości dotyczących każdego z użytkowników i charakteryzujących każdą pozycję oraz czas chwilowy. W praktyce konieczne i możliwe jest grupowanie użytkowników oraz przypisanie poszczególnym grupom wielkości uśrednionych (średnich lub podobnych charakterystyk będących parametrami rozkładów zmiennych losowych). Stąd zapis matematyczny modelu oceny elementu infrastruktury jest zbiorem wartości funkcji satysfakcji i akceptacji dla każdej z grup użytkowników, według (3.1):

$$EI = \{F_{Sh}(w_h), F_{Ah}(w_h) : h = 1 \dots H\}, \quad (3.1)$$

gdzie:

- EI – zbiór wartości funkcji satysfakcji i akceptacji dla każdej z grup użytkowników,
- $F_{Sh}(w_h)$ – wartość funkcji satysfakcji dla grupy użytkowników h i zmiennej w_h właściwej dla konkretnej grupy użytkowników,
- $F_{Ah}(w_h)$ – wartość funkcji akceptacji dla grupy użytkowników h i zmiennej w_h właściwej dla konkretnej grupy użytkowników,
- H – liczba grup użytkowników elementu infrastruktury.

Funkcja F_{Sh} określa satysfakcję z przemieszczania się w elemencie infrastruktury z punktu widzenia konkretnej grupy użytkowników. Jest to funkcja zmiennej dobranej stosownie do rodzaju elementu infrastruktury, mającej charakter pozytywny (stymulatywny), co oznacza że przy wzroście wartości tej zmiennej wartość funkcji satysfakcji również wzrasta. Funkcję satysfakcji, w ujęciu ogólnym (bez przypisania do grupy użytkowników), F_S definiuje się według (3.2):

$$F_S = f(w_p), \quad (3.2)$$

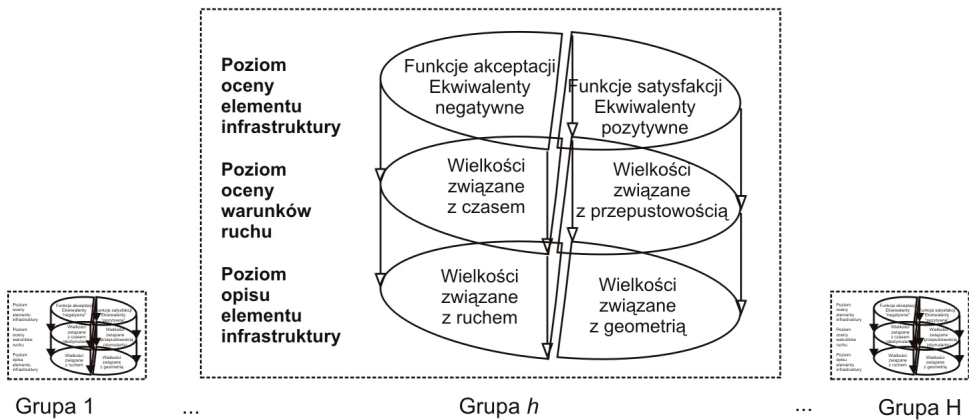
gdzie w_p – ogólne oznaczenie zmiennej o charakterze pozytywnym.

Funkcja F_{Ah} określa akceptację utrudnień przemieszczania się w elemencie infrastruktury z punktu widzenia konkretnej grupy użytkowników. Jest to funkcja zmiennej dobranej stosownie do rodzaju elementu infrastruktury, mającej charakter negatywny (destymulatywny), co oznacza że przy wzroście wartości tej zmiennej wartość funkcji akceptacji maleje. Funkcję akceptacji, w ujęciu ogólnym (bez przypisania do grupy użytkowników), F_A definiuje się według (3.3):

$$F_A = f(w_N), \quad (3.3)$$

gdzie w_N – ogólne oznaczenie zmiennej o charakterze negatywnym.

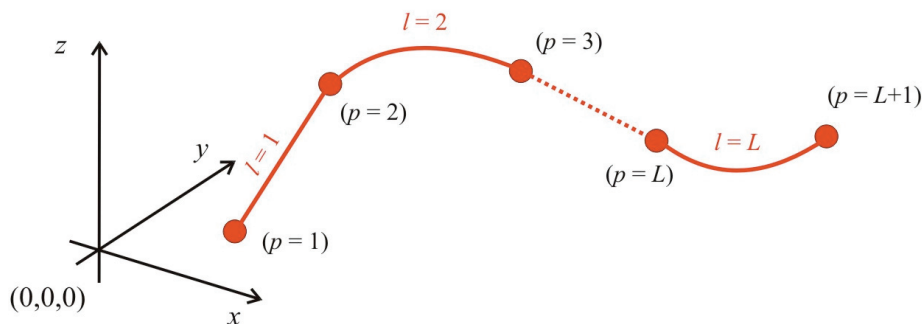
Jako zmienne: w_P , w_N wykorzystuje się wielkości bazujące na opisie elementu infrastruktury oraz ocenie warunków ruchu. Funkcje F_S , F_A są funkcjami przynależności do rozmytych grup ocen elementu infrastruktury. Powyższe definicje korespondują z przyjętą strukturą opisu modelu elementu infrastruktury (por. rys. 1.1), gdzie ocena warunków ruchu bazuje na opisie ruchu oraz geometrii elementu infrastruktury. Strukturę tę rozwija się i uszczegóławia wprowadzając nazwy dla trzech poziomów modelu: opis elementu infrastruktury, ocena warunków ruchu, ocena elementu infrastruktury. Wielkości i funkcje podzielone są także na dwa nurty: związane z ruchem → związane z czasem → ekwiwalenty negatywne → funkcje akceptacji, związane z geometrią → związane z przepustowością → ekwiwalenty pozytywne → funkcje satysfakcji. Konkretnie zestawy wielkości przyporządkowane są do poszczególnych grup użytkowników. Strukturę modelu obrazuje rysunek 3.1.



Rys. 3.1. Struktura modelu oceny elementu infrastruktury

Każda wielkość występująca w modelu oceny elementu infrastruktury jest wyróżniona (indeksem) poprzez przypisanie jej do konkretnej grupy. Jedną z przesłanek grupowania użytkowników jest środek lokomocji. Wprowadza się następujące ozna-

czenia grup użytkowników: piesi – P (od *pedestrians*), rowerzyści – B (od *bicycles*), podróżujący w pojazdach jako kierowcy lub pasażerowie (z wyłączeniem pasażerów transportu zbiorowego) – V (od *vehicles*), podróżujący jako pasażerowie w pojazdach transportu zbiorowego – T (od *transit*), zmieniający środek lokomocji w ramach trasy – M (od *multimodal*). W grupie podróżujących w pojazdach transportu zbiorowego wyróżnia się podgrupy związane z typem pojazdu, np. T – tramwaj (grupa TT), B – autobus (grupa TB). Wyróżnienie takie będzie konieczne, np. przy stosowaniu odmiennego stopnia priorytetów dla tych środków transportu. Podobnie rozdziela się grupę zmieniających środek lokomocji w zależności od charakteru takiej zmiany. Inny będzie opis (i indeks) dla trasy polegającej na wsiadaniu do pojazdu transportu zbiorowego (P-TT, pieszy wsiada do tramwaju), inny przy przesiadaniu się z własnego samochodu na rower miejski (V-P-B), jeszcze inny przy przesiadce w ramach podróży środkami transportu zbiorowego na węzle przesiadkowym (na przykład: TB-P-TB – zmiana linii autobusowej). Grupy o takich samych środkach lokomocji, ale z odmienną trasą w danym elemencie infrastruktury rozróżnia się przypisując im (w indeksie) stosowny numer.



Rys. 3.2. Sparametryzowany model trasy w elemencie infrastruktury

Dla każdej grupy użytkowników definiuje się i opisuje trasę przemieszczania się w ramach analizowanego elementu infrastruktury. Trasy wiążą się z przejazdem po poszczególnych jezdniach (wyborem kierunku), przejściami po chodniku, przez jezdnię, dojściem do przystanku itp. Definiuje się charakterystyczne punkty oraz części trasy znajdujące się pomiędzy tymi punktami. Części te nazywane są tutaj ogniwami i oznaczane l (od *link*). Wszystkich ogniw na danej trasie jest L , toteż punktów charakterystycznych będzie $L + 1$. Punkty charakterystyczne wiążą się z miejscami zatrzymań, podjęcia decyzji o zmianie kierunku (pasa) ruchu, miejscami zmiany środka lokomocji (np. na przystanku – wsiadania i wysiadania z pojazdu transportu zbiorowego) itp. Prowadzi to do sparametryzowanego opisu trasy. Graficzny model trasy przedstawiono na rysunku 3.2. Dla opisu przebiegu trasy wprowadza się układ współrzędnych jednolity dla całego elementu infrastruktury. Siatka współrzędnych jest

trójwymiarowa. Każdy punkt na trasie jest opisany przez zestaw trzech współrzędnych $M(x, y, z)$, a cała trasa poprzez macierz przebiegu, $\mathbf{P}_h [L_h + 1, 3]$.

3.2. Poziom opisu elementu infrastruktury

Wielkości poziomu opisu elementu infrastruktury nie są zmiennymi funkcji satysfakcji lub akceptacji. Są jednak podstawą do obliczenia wielkości poziomu oceny warunków ruchu, które są zmiennymi funkcji F_S i F_A . Stąd poziom opisu elementu infrastruktury jest bazowym dla prezentowanego tu modelu. Na poziomie tym wyróżnia się wielkości związane z geometrią elementu infrastruktury oraz z ruchem grup użytkowników na trasach. Podział wielkości dokonywany jest także stosownie do przypisania ich grupom lub ogniwom. Zestaw wielkości opisujących element infrastruktury będzie zróżnicowany w zależności od środka lokomocji oraz szczegółów rozplanowania tego elementu. Na przykład jeżeli element infrastruktury obejmuje torowisko tramwajowe wraz z przystankiem, w opisie znajdują się wielkości charakteryzujące to torowisko, wymiarujące przystanek, opisujące ruch tramwajów, czas postoju na przystanku itp. Jeżeli element infrastruktury nie jest wyposażony w sygnalizację, w opisie nie znajdują się wielkości dotyczące pracy sygnalizacji.

Wielkości związane z geometrią elementu infrastruktury drogowej i dotyczące poszczególnych ogniw to: liczba i szerokość jezdni, liczba i szerokość pasów ruchu, szerokość (charakter, typ) pobocza, pochylenie podłużne drogi, pochylenia poprzeczne drogi (i poszczególnych pasów ruchu), promienie łuków (poziomych i pionowych), długości odcinków prostych, łuków i krzywych przejściowych, charakterystyki krzywych przejściowych (np. parametr dla kłotoidy), miejsca zmian szerokości jezdni (lub pasów ruchu). Uwzględnia się także krzywiznę i szerokość ogniwa, pochylenie poprzeczne.

Dla użytkowników z wybranych grup wyróżnia się dodatkowe wielkości: dla pieszych – szerokość chodnika (promienie łuków, pochylenia itp.), dla rowerzystów – szerokość i rodzaj ścieżki rowerowej (promienie łuków, pochylenia itp.), dla podróżujących w pojazdach transportu zbiorowego – szerokość wydzielonych pasów (promienie łuków, pochylenia, wymiary zatok autobusowych itp.).

Na odcinkach międzywęzłowych występują także obiekty towarzyszące drodze, a istotne dla opisu elementu infrastruktury. Wprowadza się dodatkowe wielkości takie jak: długość i konfiguracja miejsc postojowych na pasie postoju, zjazdu i wjazdu (nie będące skrzyżowaniami) wyposażone czasami w dodatkowe pasy ruchu – promienie skrętów i charakterystyki pasów.

Węzły opisywane są przez: liczbę wlotów (oraz ich położenie), liczbę pasów ruchu (oraz ich położenie), liczbę przejść dla pieszych (oraz ich położenie), szerokość pasów ruchu, długość dodatkowych pasów ruchu, szerokość i długość przejść dla pieszych, promienie skrętów.

Zestaw wielkości poziomu opisu elementu infrastruktury wykorzystywanych w dalszej części monografii zestawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Zestaw wykorzystywanych wielkości poziomu opisu elementu infrastruktury

	Wielkości związane z geometrią	Wielkości związane z ruchem
Wielkości dla poszczególnych grup (tras) $h = 1, 2, \dots, H$	liczba ogniw, L_h	macierz przebiegu oparta na współrzędnych x, y, z , $\mathbf{P}_h [L_h + 1, 3]$, natężenie ruchu (liczba użytkowników), Q_h , natężenie ruchu (liczba użytkowników) relacji nadrzędnych, Qn_h ,
Wielkości dla ogniw $l_h = 1, 2, \dots, L_h$	typ (nazwa), $T_{h,l}$, krzywizna, $\Phi_{h,l}$, szerokość pasa ruchu, $s_{h,l}$, szerokość i rodzaj poboczy, $sp_{h,l}$, pochylenie poprzeczne, $i_{h,l}$, pochylenie podłużne, $ip_{h,l}$	czas swobodnego przebycia, $t_{h,l}$, czas reakcji kierowców, $tr_{h,l}$, czas wymiany pasażerów, $tw_{h,l}$, czas ruszania (hamowania, przyspieszania), $ts_{h,l}$, długość sygnału zielonego, G , długość cyklu, $G + R$

Dla konstrukcji kompletnego zestawu wielkości istotny jest fakt, iż mają one posłużyć do obliczenia wielkości poziomu oceny warunków ruchu. O obecności w modelu konkretnych wielkości decyduje zatem zastosowanie określonej metody i wzorów.

Liczby użytkowników wyraża się stosując jednostkę [u] oznaczającą pojedynczego użytkownika (ang. *user*), pieszego bądź rowerzystę, ale także podróżującego w pojeździe. Wprowadzenie jednostki [u] powoduje konieczność przekształcenia innych używanych dotąd jednostek. Na przykład natężenie ruchu (i przepustowość) określa się w użytkownikach na jednostkę czasu, najczęściej na godzinę ([u/h]). Niektóre z omawianych wielkości mogą być zmiennymi losowymi, do opisu których niezbędne jest podanie parametrów stosownych rozkładów. W uproszczeniu można jednak operować wartościami średnimi (lub innymi charakterystykami pozycyjnymi, jak wartość oczekiwana) i odchyleniami standardowymi (lub innymi charakterystykami rozrzutu, jak wariancja).

Wielkości przypisane do ogniw i dotyczące ruchu użytkowników oparte są na czasie. Wyróżnia się czas swobodnego przebycia ogniwa oraz czasy związane z zatrzymaniami (w tym straty czasu). Zatrzymania wystąpią w punktach oznaczających końce poszczególnych ogniw (i identyfikowanych numerem ogniwa). Związane są z: oczekiwaniem przed sygnalizacją świetlną, czasem wymiany pasażerów na przystankach, procesem rozładowywania się kolejki pojazdów itp.

Dodatkowo, na poziomie opisu elementu infrastruktury wprowadza się wielkości o charakterze wagowym. Wielkości te zestawiono w tabeli 3.2. Wielkości o charakte-

rze wag mają często charakter opisowy (nieliczbowy) – nie określono ich symbolami. Jako wielkości wagowe podano także wzajemne konfiguracje części elementu infrastruktury względem pozostałych pasów lub osi drogi. Na przykład chodniki mogą być po jednej lub po obu stronach drogi (rzadziej w pasie rozdziału), autobusy mogą posiadać pasy wydzielone lub kursować po wspólnym i wydzielonym pasie razem z tramwajami. W ramach tych wielkości podaje się także położenie torowisk tramwajowych, długość i typy przystanków oraz lokalizację.

Tabela 3.2. Wielkości poziomu opisu elementu infrastruktury o charakterze wag

Typ użytkowników (środek lokomocji), U_h , skład grupy, obecność przeszkód bocznych i innych elementów towarzyszących (parkowanie, przystanki), konfiguracja części elementu infrastruktury względem pozostałych pasów lub osi drogi, struktura kierunkowa i rodzajowa ruchu
--

Poszczególne części elementu infrastruktury drogowej przypisuje się do konkretnej grupy użytkowników lub do kilku jako współdzielone. Wspólne korzystanie z danej części elementu infrastruktury ma charakter integracyjny lub konfliktowy. Charakter integracyjny występuje przy przeznaczeniu części elementu infrastruktury do wspólnego korzystania w tym samym czasie na bazie określonych zasad (przepisy o ruchu drogowym, inne), na przykład jako równy dostęp lub poprzez wskazanie grupy uprzywilejowanej. Taka sytuacja ma miejsce między innymi na: pasach ruchu ogólnego jezdnii drogowych, ciągach pieszo – rowerowych, w strefach zamieszkania, pasach z których korzystają zarówno autobusy, jak i rowerzyści itd. Charakter konfliktowy występuje gdy użytkownicy z różnych grup z zasady nie powinni w tym samym momencie korzystać z danej części elementu infrastruktury. Przykładem jest przejście dla pieszych w poziomie terenu jako część elementu infrastruktury dla pieszych oraz osób poruszających się w pojazdach. Podobnie, części o charakterze konfliktowym wystąpią w węzłach, w miejscach przecinania się tras.

3.3. Poziom oceny warunków ruchu

Ocena infrastruktury przez użytkownika wiąże się z występowaniem nieuchronnych sytuacji konfliktowych (szczególnie w częściach o charakterze konfliktowym). Sytuacje takie występują wobec sytuowania elementu infrastruktury w ograniczonej przestrzeni (szczególnie widoczne jest to w obszarach centralnych miast) oraz przy konieczności przydziału określonego czasu (dla grup i relacji konfliktowych). W ocenie warunków ruchu kluczowe są wielkości związane z przepustowością oraz z czasem.

Istniejące metody wyznaczania przepustowości koncentrują się na obliczeniach dotyczących ruchu pojazdów. Metody dedykowane pieszym, czy rowerzystom są rzadziej stosowane. Użytkownicy z różnych grup nie są uwzględniani kompleksowo, ani nie są w zbliżony sposób traktowani w obliczeniach. Wskazać można także na problem stosowania różnych wielkości, jednostek oraz sposobu oceny warunków ruchu pomiędzy poszczególnymi metodami.

W metodologii niniejszej monografii przepustowość – jako maksymalna liczba użytkowników (pojazdów) jest jedną z wielkości oceny warunków ruchu i to użytecznie stosowaną dopiero w korelacji z natężeniem ruchu (liczbą pojazdów/podróżujących). Porównanie tych dwóch wielkości za pomocą ich różnicy (rezerwa przepustowości) lub ilorazu (stopień wykorzystania przepustowości) jest używane do oceny warunków ruchu. Przepustowość jest też wykorzystywana do obliczania innych wielkości oceny warunków ruchu, na przykład strat czasu.

Przepustowość wyrażona przez zmodyfikowane (autorskie i zunifikowane) jednostki, dedykowane pojedynczym użytkownikom elementu infrastruktury nabiera nieco innego znaczenia niż tradycyjnie stosowana wielkość oznaczająca liczbę pojazdów. W metodzie autora niniejszej monografii staje się wielkością charakteryzującą pojemność elementu infrastruktury. Autor rozważał, czy zastosować termin pojemność jako alternatywę dla przepustowości (angielski termin *capacity* oznacza zarówno przepustowość, jak i pojemność). Przepustowość jest jednak określeniem powszechnie stosowanym i intuicyjnie nazwa ta oddaje także szersze znaczenie wprowadzane w monografii. Stąd zdecydowano się na używanie terminu przepustowość z dodaniem elementu infrastruktury lub jego części (oznaczenie: CT).

Straty czasu (czas tracony) są powszechnie używaną wielkością charakteryzującą warunki ruchu w miejscach występowania zaburzeń jego płynności. Przyjęto zatem następujące wielkości na poziomie oceny warunków ruchu: straty czasu D (jako wielkość związaną z ruchem) oraz rezerwę przepustowości ΔCT (jako wielkość związaną z przestrzenią). Pomocniczymi wielkościami w modelu są: stopień wykorzystania przepustowości XT oraz średnia prędkość pokonania całej trasy v . Straty czasu i prędkość są zazwyczaj średnimi z wartości rejestrowanych dla wszystkich użytkowników w grupie na przestrzeni ustalonego czasu (najczęściej jednej godziny). Zestaw wielkości modelu dla poziomu oceny warunków ruchu przedstawiono w tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Zestaw wielkości modelu na poziomie oceny warunków ruchu

Wielkości związane z przepustowością elementu infrastruktury (przestrzenią)	rezerwa przepustowości, ΔCT_h stopień wykorzystania przepustowości, XT_h
Wielkości związane z czasem w elemencie infrastruktury	straty czasu, D_h prędkość, v_h

Na poziomie oceny warunków ruchu występują także wielkości o charakterze wagowym. Mają one charakter opisowy (nieliczbowy) i modyfikują wartości wielkości

zestawionych w tabeli 3.3. Ponieważ nie dotyczą ani opisu geometrii elementu infrastruktury, ani ruchu na trasach, nie uwzględniono ich na niższym poziomie. Konkretny zestaw wielkości wagowych do oceny warunków ruchu zależy od szczegółów rozplanowania elementu infrastruktury. Są to wielkości opisujące organizację ruchu, widoczność, sposób działania sygnalizacji itp. Przykłady takich wielkości przedstawiono w tabeli 3.4.

Tabela 3.4. Przykładowe wielkości poziomu oceny warunków ruchu o charakterze wag

Organizacja ruchu (i oznakowanie), Widoczność i inne elementy blokujące (relacje nadrzędne, piesi), Rodzaj sygnalizacji, Usytuowanie analizowanego elementu (znajomość drogi, skład populacji kierowców), Parametry akomodacji, Stopień priorytetu

Na poziomie oceny elementu infrastruktury wprowadza się specyficzne wielkości agregujące opisane tu wielkości poziomu oceny warunków ruchu nazywane ekwiwalentami oceny.

3.4. Zagregowane wielkości oceny elementu infrastruktury

Stosowanie dotychczas zestawionych wielkości oceny warunków ruchu oraz opisu elementu infrastruktury do zintegrowanej oceny tego elementu napotyka na określone trudności. Trudno jest porównywać ze sobą wielkości określające czas przebywania w ramach elementu infrastruktury z wielkościami powiązаныmi z przepustowością, na przykład z rezerwą przepustowości. Jednostki miary dla wielkości z tych dwóch grup nie przystają do siebie. Nie można jednoznacznie rozstrzygnąć, czy lepiej zapewnić krótszy czas podróży, czy może większą rezerwę przepustowości. Kolejny dylemat związany jest z pytaniem, czy lepsze są rozwiązania preferujące większe grupy użytkowników, czy oceniające element infrastruktury niezależnie od liczebności grup?

Na poziomie oceny elementu infrastruktury skonstruowany zostaje zatem zestaw wielkości zagregowanych odpowiadających różnym podejściom oraz uwzględniający różne znaczenie wielkości z wyżej wymienionych grup. Wielkość zagregowana nazywana jest ekwiwalentem oceny elementu infrastruktury. Na ekwiwalent składają się wybrane wielkości związane z czasem i przepustowością. Skonstruowano dwa ekwiwalenty bazujące na odmiennych wielkościach agregowanych. Jeden ma charakter negatywny, a drugi pozytywny. Wykorzystano podstawowe wielkości poziomu oce-

ny warunków ruchu: straty czasu (D), prędkość (v), rezerwa przepustowości (ΔCT) i stopień wykorzystania przepustowości (XT).

Aby możliwe było porównywanie wielkości związanych z czasem i przepustowością oraz wykorzystanie ich jako składników ekwiwalentu oceny, wprowadza się dodatkowe wielkości nazywane wspólnie stosunkiem danej wielkości do jej maksimum lub minimum, w skrócie – stosunkiem (r_w). Indeks „w” oznacza tu dowolną wielkość agregowaną. W zależności od tego, czy dana wielkość ma charakter negatywny, czy pozytywny, wyżej scharakteryzowane stosunki mają odmienną postać matematyczną. Odnosząc się do wyżej wymienionych wielkości agregowanych definiuje się trzy stosunki według zależności (3.4)–(3.6) odpowiednio dla: strat czasu, prędkości oraz rezerwy przepustowości. Stopień wykorzystania przepustowości nie wymaga przekształceń, gdyż jest już od razu w wymaganej postaci.

$$r_D = \frac{D}{D_{\max}}, \quad (3.4)$$

$$r_V = 1 - \frac{v_{\min}}{v}, \quad (3.5)$$

$$r_{\Delta CT} = 1 - \frac{\Delta CT_{\min}}{\Delta CT}. \quad (3.6)$$

Występującą we wzorze (3.4) wartość maksymalną strat czasu D_{\max} przyjmuje się indywidualnie w zależności od elementu infrastruktury jako wynik obliczeń lub obserwacji. Minimalna wartość prędkości v_{\min} występująca we wzorze (3.5) wyznaczana jest na podstawie przyjętego maksymalnego czasu przejazdu (z uwzględnieniem zatrzymań) t_{\max} oraz długości trasy l . Minimalna rezerwa przepustowości ΔCT_{\min} występująca we wzorze (3.6) wynika z przyjętych założeń lub analizy warunków ruchu w elemencie infrastruktury. Powyższe wielkości ekstremalne są wynikiem określonych założeń odnośnie dopuszczalnej/pożądaney jakości elementu infrastruktury, jako swoisty poziom odniesienia.

Stosunki r_w przyjmują wartości z przedziału $[0,1]$. Są tak skonstruowane, że dla opisywanych przez nie wielkości pozytywnych same mają charakter pozytywny, a dla wielkości negatywnych – negatywny.

Składnikiem formuł na ekwiwalent oceny elementu infrastruktury są także wagi ρ_w . Wprowadza się cztery wagi odpowiadające czterem wielkościom agregowanym: ρ_D , ρ_v , $\rho_{\Delta CT}$, ρ_X . Wagi są z przedziału $[0, 1]$ zatem i wartości ekwiwalentu będą z przedziału $[0, 1]$. Wartości wag odzwierciedlają znaczenie poszczególnego składnika ekwiwalentu, czyli albo wielkości związanej z czasem albo z przepustowością. Jeżeli znaczenie którejś z tych wielkości agregowanych ma być większe, to należy przypisać jej wagę o wyższej wartości. Różne wagi można także stosować dla odmiennych grup

użytkowników. Na przykład w grupach użytkowników pojazdów podwyższać można znaczenie rezerwy przepustowości, a w grupach pieszych strat czasu.

Definiuje się dwie formy ekwiwalentu według zależności (3.7) i (3.8). Ekwiwalent negatywny (E_1) uwzględnia straty czasu i stopień wykorzystania przepustowości. Ekwiwalent pozytywny (E_2) bazuje na prędkości i rezerwie przepustowości.

$$E_1 = r_D \cdot \rho_D + XT \cdot \rho_{XT}, \quad (3.7)$$

$$E_2 = r_v \cdot \rho_v + r_{ACT} \cdot \rho_{ACT}. \quad (3.8)$$

Dodatkowo definiuje się ekwiwalent E_γ pozwalający podać wynik zagregowanej oceny elementu infrastruktury w wybranej skali ocen. Ekwiwalent ten oblicza się według zależności (3.9) z wykorzystaniem przelicznika (3.10), oznaczając najniższą możliwą ocenę przez o_{\min} , a najwyższą przez o_{\max} . We wzorze (3.9) jako E_i oznaczono dowolny z ekwiwalentów: E_1 lub E_2 .

$$E_\gamma = \gamma \cdot E_i + o_{\min}, \quad (3.9)$$

$$\gamma = o_{\max} - o_{\min}. \quad (3.10)$$

W niniejszej metodzie stosowane są dwie skale ocen: $[0, 1]$, którą można utożsamiać z procentowym wyrażeniem oceny (np. 0,13 ~ 13%) lub $[0, 6]$ nawiązująca do szkolnego systemu ocen. Przeliczenie wartości ekwiwalentów pomiędzy skalami dokonuje się na podstawie zależności (3.9).

3.5. Funkcje satysfakcji i akceptacji

Postulat oceny elementu infrastruktury z punktu widzenia użytkowników nakazuje stosować wielkości odmienne od dotychczasowych. Ocena bazująca na zintegrowanych ekwiwalentach miałaby w dalszym ciągu charakter ściśle techniczny, nieprzystający do zmiennych cech ludzkiej percepcji. Proponuje się wprowadzenie podejścia rozmytego do definiowania wielkości oceny oraz zakresów (zbiorów) poszczególnych ocen. Matematycznym obrazem podejścia rozmytego będą stosowne postacie funkcji F_S i F_A oraz sposób kalibracji wartości ich parametrów. W wyniku zmiany podejścia przeformułowaniu ulega nazewnictwo poszczególnych, zestawionych wcześniej wielkości, które nabiorą teraz charakteru rozmytego.

Dość łatwo jest zdefiniować opisowo nazwy nowych wielkości odpowiadających wyżej zestawionym wielkościom. Jako odpowiednik wielkości określającej przepustowość proponuje się wielkość satysfakcja z oferowanej przepustowości. Wielkości związane z czasem przemieszczania się w ramach elementu infrastruktury przekształcane zostają na wielkość akceptacja strat w czasie przemieszczania. Nawiązuje to do

wprowadzanego już nazewnictwa funkcji satysfakcji i akceptacji. Opisywane wcześniej wielkości oceny warunków ruchu oraz ekwiwalenty poddane procesowi rozmycia (fuzzyfikacji) staną się zmiennymi funkcji F_S lub F_A . Poprzez proces rozmycia rozumie się tu specyficzne przypisanie wartości danych wielkości do grup ocen o nieostrych (rozmytych) granicach. Konkretna wartość przypisana będzie do jednej lub więcej grup, o czym zadecyduje wartość funkcji przynależności. W matematycznym opisie nowych wielkości nieodzowne (i bardzo przydatne) staje się zastosowanie logiki rozmytej.

Istotny nurt zastosowań zbiorów i liczb rozmytych określić można jako rozmyte grupowanie określonych wielkości, czy zależności. Klasyczne grupowanie w oparciu np. o konstruowanie drzew decyzyjnych nie zakłada braku precyzji w określaniu granic pomiędzy grupami. Nie jest też możliwa częściowa przynależność danej wartości wielkości do wielu grup. Grupy powstałe po zastosowaniu rozmytych metod grupowania nazywane będą dalej klastrami (od angielskiego *cluster*), a takie grupowanie – klastrowaniem. Wartości zmiennych funkcji F_S i F_A określa się w opisie zastosowanej metody grupowania jako próbki.

Kompletny opis zmiennej rozmytej polega na identyfikacji liczby i środków klastrów oraz na doborze postaci funkcji przynależności. Metody konstruowania modeli rozmytych przedstawiono szczegółowo w [4]. Sposoby klastrowania są liczne i dostosowane do złożoności zagadnienia. Najpopularniejszym sposobem jest klasyczna metoda C-środków (FCM) oraz jej modyfikacje [73], [180], [314]. Ograniczenia stosowania tego podejścia omówiono m.in. w [188]. Dla mało liczebnych próbek proponuje się użycie Bayesowskiego modelu Ying-Yang [90]. W przypadku niekompletnych zbiorów danych wprowadza się nowe algorytmy, np.: FCEM [125], czy FMLE [278]. Podstawowym problemem metody FCM jest konieczność założenia już na wstępie (a priori) liczby klastrów. Liczba ta niekoniecznie musi korelować z charakterem rozpatrywanej próbki. Opracowano wiele modeli optymalizacji liczby klastrów. Modele te wykorzystują: narzędzia o nazwie RAGMD [188], entropię [311], algorytmy genetyczne [45], fuzję podgrup [58], kombinacje metod [62]. Tradycyjnie nadawano funkcjom przynależności kształty trójkątne. Wady takiego podejścia opisano m.in. w [4]. Szerszy przegląd technik generowania funkcji przynależności przedstawiono w [188]. Interesujące zastosowanie krzywych Beziera do generowania tych funkcji podano w [187]. W dalszym jednak ciągu metoda FCM jest stosowana w praktyce, zwłaszcza gdy próbki są liczne i mało zaszumione.

Do podziału zbioru próbek pomiędzy określoną liczbę klastrów stosowana będzie w dalszej części pracy najbardziej popularna metoda C-środków (FCM) [78], [226]. Liczebność zbioru próbek to J . Każda próbka opisywana jest przez K zmiennych w_k . Proces obliczeń można ująć w sześć kroków (inicjacja, pierwsze obliczenie środków klastrów, obliczenie przynależności, kolejne obliczenie środków klastrów, sprawdzenie warunku zatrzymania, opis modelu rozmytego). Ogólne formuły na obliczanie: środków klastrów, przynależności próbki i odległości próbki od środka klastra oraz warunek zakończenia obliczeń przyjmują postaci: (3.11)–(3.14):

$$v_{\kappa,j,n} = \frac{\sum_{j=1}^J \mu_{ij,n}^m \cdot w_{\kappa}}{\sum_{j=1}^J \mu_{ij,n}^m}, \quad \kappa = 1, 2, \dots, K, \quad (3.11)$$

$$\mu_{ij,n+1} = \frac{1}{\sum_{p=1}^I \left[\frac{l_{ij,n}}{l_{pj,n}} \right]^{\frac{2}{m-1}}}, \quad (3.12)$$

$$l_{ij,n} = \sqrt{\sum_{\kappa=1}^K (w_{\kappa} - v_{\kappa,i,n})^2}, \quad (3.13)$$

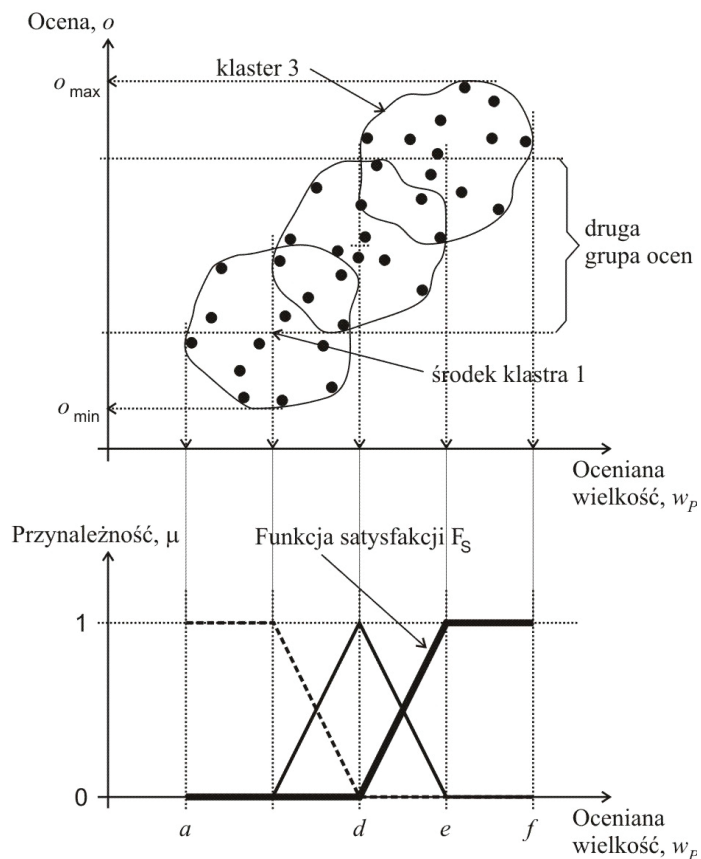
$$\frac{1}{J \cdot I} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J |\mu_{ij,n+1} - \mu_{ij,n}| \leq \varepsilon, \quad (3.14)$$

gdzie:

- j – numer próbki scharakteryzowanej przez zmienne w_{κ} ,
- J – liczba próbek,
- w_{κ} – zmienne poddane klastryzacji,
- κ – numer zmiennej,
- K – liczba zmiennych charakteryzujących próbkę,
- i – numer klastra,
- I – liczba klastrów,
- n – krok obliczeń w algorytmie FCM,
- m – parametr określający stopień rozmytości analiz,
- ε – parametr określający warunki zatrzymania analiz,
- $v_{\kappa,i,n}$ – środek klastra i dla zmiennej κ w kroku n ,
- $\mu_{ij,n}$ – przynależność próbki j do klastra i w kroku n ,
- $l_{ij,n}$ – odległość (euklidesowa) próbki j od środka klastra i w kroku n .

Ocena elementu infrastruktury wyrażona satysfakcją bądź akceptacją jest grupowana w charakterystyczne klastry. Dany klaster oznacza konkretną grupę oceny. Metoda FCM dopuszcza dowolną liczbę klastrów. W niniejszej monografii przyjęto podział na trzy grupy ocen: dobra, przeciętna i zła. Mimo iż grupowanie na trzy klastry jest niezbyt dokładnym wartościowaniem danego zjawiska (wielkości), to niezaprzeczalną zaletą takiego podejścia jest jego prostota. Ideę grupowania pokazano na rysunkach: 3.3 i 3.4 odpowiednio dla wielkości o charakterze pozytywnym i negatywnym. Zestawy wielkości oraz przyporządkowanie ich do poszczególnych klastrów

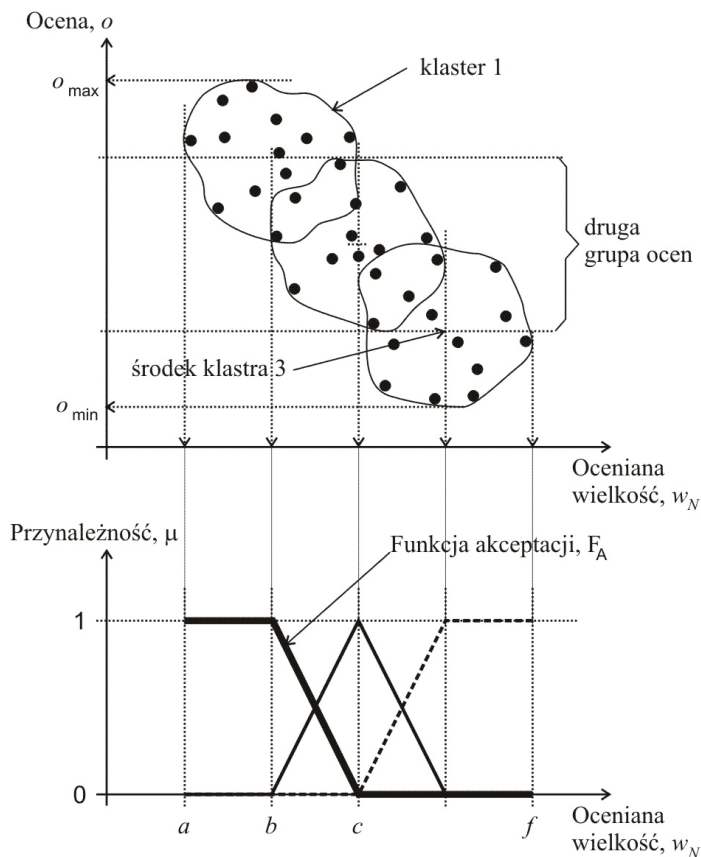
pokazano w górnych częściach rysunków: 3.3 i 3.4. W wyniku zastosowania metody FCM wyznacza się między innymi parametry funkcji przynależności, μ do rozmytych grup. Funkcje te przedstawiono w dolnych częściach rysunków: 3.3 i 3.4. Jedną spośród trzech funkcji przynależności zostaje utożsamiona z funkcją satysfakcji lub akceptacji.



Rys. 3.3. Definicja funkcji satysfakcji

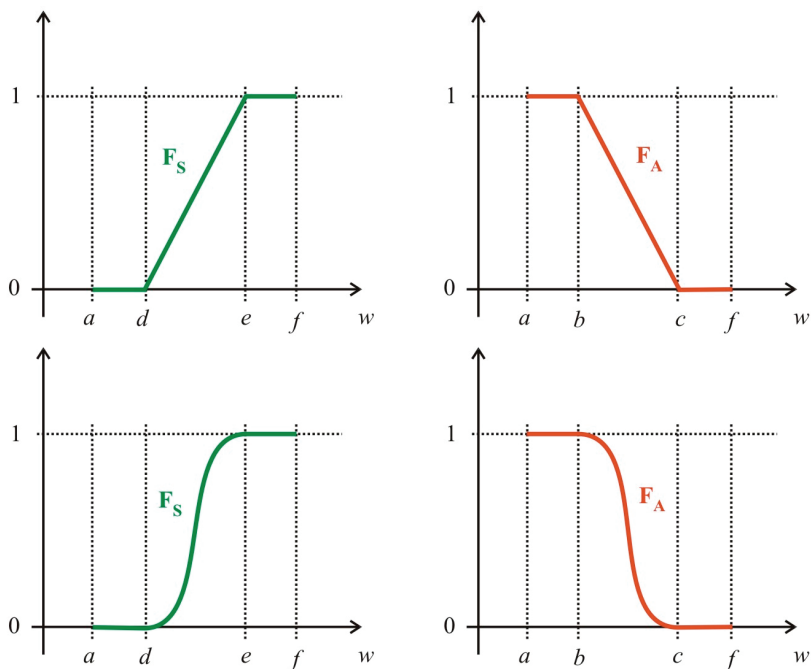
W procesie grupowania wielkości o charakterze pozytywnym funkcja przynależności do klastra 3 (grupy najwyższych ocen) będzie tożsama z funkcją satysfakcji, F_S . Parametry: a, f funkcji satysfakcji wynikają z zakresu zmienności analizowanej wielkości. Parametry: d, e to rzuty środków klastrów: 2 i 3 na oś w_p . Funkcja akceptacji jest funkcją przynależności do klastra 1 (grupy najwyższych ocen) uzyskanej w procesie grupowania rozmytego wielkości o charakterze negatywnym. Parametry: a, f funkcji akceptacji, podobnie jak w przypadku funkcji satysfakcji, wynikają z zakresu

zmienności analizowanej wielkości. Natomiast parametry: b , c to rzuty środków klastrów: 1 i 2 na oś w_N .



Rys. 3.4. Definicja funkcji akceptacji

W powyższych definicjach (rys. 3.3 i 3.4) odcinki funkcji satysfakcji i akceptacji mają przebieg liniowy. W grupowaniu rozmytym oraz w monografii wykorzystuje się także postacie nieliniowe tych funkcji. Porównanie stosowanych kształtów funkcji F_S , F_A wraz z zestawieniem charakterystycznych parametrów pokazano na rysunku 3.5. Matematyczny opis tych funkcji przedstawiają wzory (3.15)–(3.18) skonstruowane w oparciu o funkcje liniowe lub trygonometryczne (\sin i \cos) z zastosowaniem wprowadzonych parametrów. Użycie liniowych postaci funkcji F_S i F_A zmienia nieco wartości ocen dla konkretnych wartości zmiennych, jest jednak wykorzystywane w celu uproszczenia i przyspieszenia obliczeń.



Rys. 3.5. Funkcje F_S i F_A w postaci liniowej i nieliniowej

$$F_S = \begin{cases} 0, & \text{dla } w \in \langle a, d \rangle \\ \frac{1}{e-d} \cdot w - \frac{d}{e-d}, & \text{dla } w \in \langle d, e \rangle \\ 1, & \text{dla } w \in \langle e, f \rangle \end{cases} \quad (3.15)$$

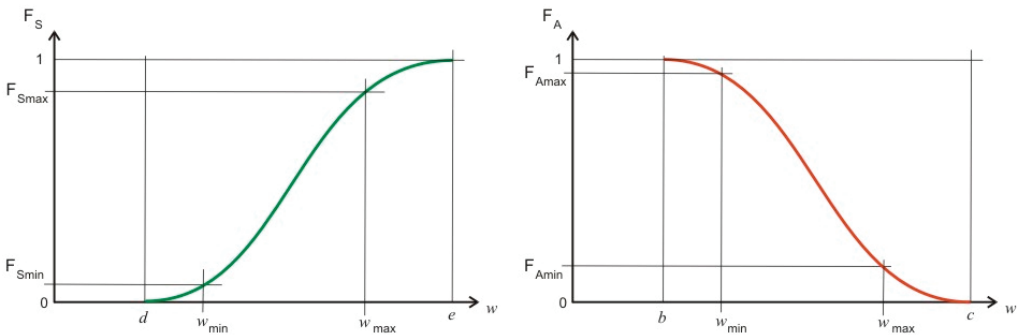
$$F_S = \begin{cases} 0, & \text{dla } w \in \langle a, d \rangle \\ 0,5 \cdot \sin \left[\frac{\pi}{e-d} \left(w - \frac{d+e}{2} \right) \right], & \text{dla } w \in \langle d, e \rangle \\ 1, & \text{dla } w \in \langle e, f \rangle \end{cases} \quad (3.16)$$

$$F_A = \begin{cases} 0, & \text{dla } w \in \langle a, b \rangle \\ -\frac{1}{c-b} \cdot w + \frac{c}{c-b}, & \text{dla } w \in \langle b, c \rangle \\ 1, & \text{dla } w \in \langle c, f \rangle \end{cases} \quad (3.17)$$

$$F_A = \begin{cases} 1, & \text{dla } w \in \langle a, b \rangle \\ 0,5 \cdot \cos \left[\frac{\pi}{c-b} (w-b) \right] + 0,5, & \text{dla } w \in \langle b, c \rangle \\ 0, & \text{dla } w \in \langle c, f \rangle \end{cases} \quad (3.18)$$

W niniejszej metodzie oceny elementu infrastruktury używa się różnego rodzaju wielkości jako zmienne w funkcjach F_S i F_A . Są to opisane wcześniej wielkości związane z czasem przemieszczania się lub z przepustowością oraz ekwiwalenty agregujące te wielkości. Dobór (identyfikacja) i kalibracja zmiennych właściwych dla konkretnych elementów infrastruktury jest przedmiotem badań opisanych w dalszej części pracy. Tutejszy opis zasada się na ogólnym oznaczeniu zmiennej w (z ewentualnym indeksem).

Dla dalszych rozważań istotne jest założenie, że użytkownicy elementu infrastruktury prawie nigdy nie osiągają pełnej satysfakcji z przemieszczania elementu infrastruktury, jak również że nigdy nie akceptują w pełni występujących w nim niedogodności. Matematycznie oznacza to, że wartości funkcji satysfakcji i akceptacji nie osiągają wartości 1 w dziedzinie funkcji wyrażonej fizycznymi ograniczeniami wartości odpowiednich wielkości. Podobnie nie osiągane są wartości zerowe tych funkcji, co należy interpretować jako sytuację, gdy satysfakcja lub akceptacja nigdy nie jest zerowa. Należy pamiętać, że wartości tych funkcji opisują pewną zbiorowość danej grupy użytkowników, toteż przyjęte wartości tych funkcji wyrażają oceny średnie w zbiorowości. Osiągnięcie skrajnych wartości, czyli zera lub jedynki oznaczałoby jednorodność ocen rzadko występującą w rzeczywistości.



Rys. 3.6. Graficzna interpretacja wartości maksymalnych i minimalnych funkcji F_S i F_A

Dla danej grupy użytkowników (h) wprowadza się dodatkowe parametry funkcji F_S i F_A oznaczane: w_{max} i w_{min} . Parametry te oznaczają fizyczne minimum i maksimum dla danej wielkości (na przykład straty czasu co najmniej równe zero, rezerwa przepustowości nie większa niż przepustowość). Wartości tych parametrów określają także praktyczne maksimum i minimum stosownych funkcji. Graficzną interpretację powyższych uwarunkowań pokazano na rysunku 3.6. Faktycznie występujące wartości zmiennych w ograniczone są według zależności: (3.19) – w funkcjach satysfakcji i (3.20) w funkcjach akceptacji:

$$a \leq d \leq w_{\min} \leq w \leq w_{\max} \leq e \leq f, \quad (3.19)$$

$$a \leq b \leq w_{\min} \leq w \leq w_{\max} \leq c \leq f. \quad (3.20)$$

Z powyższego wynika między innymi, że wartości poszczególnych parametrów uzyskane w drodze kalibracji mogą być sprzeczne z fizycznym ograniczeniem dla danej wielkości (mogą być na przykład ujemne).

Ograniczenie satysfakcji i akceptacji w ocenie elementu infrastruktury wiąże się z pojęciem zasobu w elemencie infrastruktury drogowej. Autor monografii wprowadza ten termin do dziedziny budownictwa drogowego, nawiązując do zastosowań w innych dyscyplinach oraz wykorzystując i adaptując różne aspekty rozumienia tego terminu. Zasób jest pojęciem wielodyscyplinowym używanym między innymi w ekonomii, psychologii oraz naukach o ziemi. Jako elementy rozumienia (i konotacji) terminu zasób wykorzystywane w różnych dyscyplinach naukowych a istotne dla modelu oceny skonstruowanego w niniejszej monografii rozumie się:

- pojęcia zasobów naturalnych oraz rozróżnienie na odnawialne i nieodnawialne stosowane w naukach o ziemi (zob. np. [53]),
- fakt konkurencji o ograniczone zasoby zaczerpnięty z makroekonomii (np. [18], [266]),
- teorię zachowania zasobów, gdzie użytkownicy (ludzie) czerpią zadowolenie z wykorzystywania zasobów oraz doznają stresu w związku z ich brakiem używane w psychologii (np. [101]).

Element infrastruktury cechować będą wielkości o charakterze zasobów o ograniczonych wartościach. Opis elementu infrastruktury z wykorzystaniem pojęcia zasobu pozwala wskazać na ograniczenia infrastruktury w pomieszczeniu wszystkich użytkowników, czy też na konieczność przeznaczania części elementu infrastruktury dla określonych grup użytkowników kosztem innych grup. Wykorzystanie sposobu korzystania z zasobów oraz czerpania satysfakcji, względnie doznawania stresu względem konkurencji grup o ograniczone zasoby istotne jest w konstruowanej metodzie oceny elementu infrastruktury.

Ponadto, szczególnie w węzłach, a zwłaszcza przy wykorzystaniu sygnalizacji drogowej do sterowania ruchem, jako zasób elementu infrastruktury wykorzystywany jest dostępny i limitowany czas (na przykład łączna długość sygnałów zielonych/dopuszczających do ruchu) do podziału pomiędzy grupy użytkowników (trasy). Czas jako zasób musi być podzielony pomiędzy grupy użytkowników. Konkurencja o ograniczone zasoby przekłada się na niemożliwość osiągnięcia pełnej satysfakcji i akceptacji.

Rozmiary i rozplanowanie elementu infrastruktury, czy też jego części, a także przyjęte zasady sterowania ruchem, na przykład długości sygnałów dopuszczających do ruchu (zielonych), określa się zasobem elementu infrastruktury, który jest limitowany i który musi być podzielony pomiędzy użytkowników z różnych grup. Wyróżnia

się grupy konkurujące o ograniczone zasoby. Ocena danego elementu przez użytkownika z jakiejś grupy jest powiązana z oceną użytkownika z grupy konkurującej. Wyższa ocena w jednej grupie oznacza niższą ocenę w innej grupie. Działanie zwiększające ocenę elementu infrastruktury w ramach wybranej grupy oznacza pogarszanie ocen użytkowników grup konkurujących (opozycyjnych). Nie jest zazwyczaj możliwa maksymalizacja ocen użytkowników z wszystkich grup. Konieczne są kompromisy. Uwzględnienia się gradację znaczenia poszczególnych grup, to znaczy stosowania określonych preferencji dla danej grupy, na przykład w konkretnej lokalizacji elementu infrastruktury drogowej.

4. Identyfikacja zmiennych funkcji satysfakcji i akceptacji

4.1. Uwarunkowania dla zmiennych funkcji oceny elementu infrastruktury

Przedmiotem rozdziału czwartego jest opis wybranych elementów infrastruktury drogowej oraz ich części, potencjalnych grup użytkowników i typowych problemów (zadań) projektowych celem wskazania wielkości, które będą użyteczne jako zmienne funkcji satysfakcji lub akceptacji. Jeżeli ocena elementu infrastruktury dotyczy użytkowników takiego samego środka lokomocji, na przykład osób podróżujących w pojazdach, stosować można dotychczas używane, proste wielkości, takie jak: przepustowość, czy straty czasu. Gdy zadanie jest bardziej kompleksowe i uwzględnia grupy wykorzystujące różne środki lokomocji, zastosowanie prostych wielkości napotyka trudności związane z odmiennymi sposobami (metodami) ich wyliczania dla różnych grup, często nieporównywalnymi jednostkami oraz występującym niekiedy brakiem możliwości uwzględnienia liczebności grup. W takich przypadkach należy używać wielkości zagregowane, umożliwiające porównywanie i ważenie ocen, takie jak zdefiniowane wcześniej ekwiwalenty oceny elementu infrastruktury. Stosowanie ekwiwalentów możliwe i celowe jest w sytuacji braku jednoznacznie porównywalnych wielkości charakteryzujących element infrastruktury w ocenach użytkowników z różnych grup.

Zmienne funkcji satysfakcji i akceptacji zdefiniowane ogólnie wzorami (3.2) i (3.3) muszą mieć odpowiednio charakter pozytywny i negatywny. W najprostszym podejściu zmiennymi funkcji F_S i F_A są wielkości związane z przepustowością lub z czasem. Dla odcinków międzywęzłowych najbardziej zasadne wydaje się być użycie rezerwy przepustowości. Dla węzłów i innych miejsc, w których występują zaburzenia płynności ruchu – strat czasu (podobnie jak w dotychczas używanych metodach). W pewnych specyficznych przypadkach, związanych z sygnalizacją świetlną, zmiennymi mogą być długości sygnałów, a dla oceny wykorzystania przestrzeni elementu infrastruktury – szerokości pasa ruchu.

W metodzie HCM [100], w toku jej licznych aktualizacji, skonstruowano zestawy wielkości charakteryzujących drogę i ruch na niej, stanowiące podstawę do oceny poziomu swobody ruchu (*Level of Service* – LOS). Wielkości te są wykorzystywane między innymi w prezentowanej metodzie jako zmienne opisujące element infrastruktury dla prostszych problemów z homogenicznymi grupami użytkowników. Przytoczony dalej skrótowy przegląd wielkości wykorzystywanych w metodzie HCM jest podstawą do identyfikacji zmiennych funkcji satysfakcji i akceptacji dla konkretnych problemów (zadań) występujących w ocenie elementów infrastruktury drogowej oraz konstrukcji i kalibracji wielkości zagregowanych (ekwiwalentów). Istotny jest także fakt, że w metodzie HCM wykorzystuje się wielkości charakteryzujące nie tylko ruch ogółu pojazdów, ale także pojazdów transportu zbiorowego, pieszych i rowerzystów.

Jako charakterystyczne elementy infrastruktury uwzględniono węzły będące skrzyżowaniami czterowłotowymi oraz odcinki międzywęzłowe w formie ulic o zróżnicowanej liczbie pasów ruchu. Zadania występujące w takich elementach infrastruktury dotyczą podziału: dostępnego czasu w sygnalizacjach stałoczasowych, dostępnej przestrzeni (przepustowości) oraz, kompleksowo, czasu i przestrzeni w sygnalizacjach dostosowujących się do zmian ruchu. Wykorzystywanymi wielkościami pozytywnymi są: prędkość, przepustowość lub rezerwa przepustowości elementu infrastruktury, a także ekwiwalent E_2 (agregujący prędkość i rezerwę przepustowości). Zmienną pozytywną jest także suma wielkości negatywnych dla grup opozycyjnych. Specyficznymi zmiennymi pozytywnymi są także: długość sygnału zielonego (lub suma długości sygnałów czerwonych dla grup opozycyjnych) i szerokość pasa ruchu. Jako zmienne negatywne używa się: straty czasu, czas łączny podróży, stopień wykorzystania przepustowości elementu infrastruktury lub ekwiwalent E_1 (agregujący straty czasu i stopień wykorzystania przepustowości). Zmienną negatywną jest także suma wielkości pozytywnych dla grup opozycyjnych. Specyficznymi zmiennymi negatywnymi są także: długość sygnału czerwonego (lub suma długości sygnałów zielonych dla grup opozycyjnych), szerokości pasa ruchu dla grup opozycyjnych. Uwzględnianie konkretnych zmiennych zależy od specyfiki zadania dla ocenianego elementu infrastruktury.

4.2. Wielkości wykorzystywane w metodzie HCM

Ważnym wskaźnikiem oceny elementu infrastruktury jest PSR (poziom swobody ruchu). PSR definiuje się jako jakościową miarę warunków ruchu uwzględniającą odczucia kierowcy i innych użytkowników drogi [80]. Klasyfikacja do poszczególnych PSR odbywa się według kryteriów opisowych bądź ilościowych, na podstawie wartości granicznych stosownych wielkości. W Polsce w użyciu są metody dla oceny

warunków ruchu pojazdów [55], [106], [107], [190]–[192]. Dla odcinków międzywęzłowych dróg i ulic wielkością kwalifikującą do PSR jest natężenie ruchu. Najgorszy PSR odpowiada wtedy przepustowości. Dla wlotu na skrzyżowanie kwalifikacja do PSR odbywa się w oparciu o straty czasu. Cytowane metody wykorzystywane są do ocen warunków ruchu dla: wlotów skrzyżowań z sygnalizacją świetlną i wlotów na rondo, odcinków przeplatania w ramach węzłów drogowych, pasów włączenia i wyłączenia w ramach węzłów drogowych. W ocenie warunków ruchu liczą się także: prędkość, swoboda manewrów, odczucia indywidualne użytkowników.

Metodologia PSR wywodzi się z opracowań amerykańskich – HCM [100]. Zauważyć wypada, że w opracowaniach tych PSR określane jest jako *level of service* (LOS), czyli poziom obsługi. Polskie tłumaczenie dopasowane jest do terminologii oceny części dróg związanych z ruchem pojazdów. Natomiast części, w których występuje czas oczekiwania na wlotach, a szczególnie części elementów infrastruktury związane z innymi użytkownikami (np. przejście przez jezdnię, konfiguracja przystanków), nie powinny być oceniane pod kątem swobody ruchu, a raczej – poziomu obsługi. Zastosowanie HCM pozwala dokonać oceny zróżnicowanych elementów infrastruktury (w tym systemów transportu zbiorowego) dla różnych grup użytkowników. LOS jest więc dość uniwersalnym parametrem oceny elementów infrastruktury. W kolejnych tabelach (4.1–4.8) przytacza się wybrane wielkości wykorzystywane w metodzie HCM oraz wartości graniczne pozwalające na klasyfikację do konkretnego PSR (LOS). W tabelach: 4.1 i 4.2 podano dodatkowo przedziały kwalifikujące do PSR według polskiej metodologii z uwagi na stosowanie innej liczby poziomów oceny.

Interesujące jest zastosowanie odmiennej skali ocen (zarówno w HCM, jak i w metodach polskich) dla skrzyżowań wyposażonych w sygnalizację oraz dla pozostałych (w tym rond). Straty czasu rzędu 40 s to na skrzyżowaniu wyposażonym w sygnalizację poziom D (lub II), co oznacza przeciętne warunki ruchu. Straty czasu o takiej samej wartości, ale na skrzyżowaniu bez sygnalizacji to już poziom E (lub III), czyli warunki złe. Różnica w kwalifikacji polega prawdopodobnie na cechach użytkowników – kierowców, którzy skłonni są uznać wyższe straty czasu w sytuacji występowania sygnalizacji, niejako akceptując fakt, iż przy takim sterowaniu ruchem należy liczyć się z dłuższym postojem. Powyższe podejście koresponduje z postulatem autora niniejszej monografii – uwzględniania ludzkiej percepcji w projektowaniu elementów infrastruktury. Taka argumentacja, nie jest jednak w wyraźny sposób wyeksponowana w cytowanych metodach. Nie jest także rozwijana na specyfikę oceny użytkowników innych grup.

W tabelach: 4.3–4.8 skoncentrowano się na wybranych wielkościach dotyczących pieszych, rowerzystów i transportu zbiorowego. Są to zarówno wielkości powszechnie używane, jak i mniej typowe: powierzchnia zajmowana przez pieszych na chodniku, częstotliwość występowania przeszkód na drodze rowerowej, liczba miejsc siedzących w pojazdach transportu zbiorowego. Wskazuje to na różnorodność i nieporównywalność narzędzi oceny w różnych grupach, a także na potrzebę unifikacji wielkości oce-

ny. W Polsce nie wykorzystywano jak dotąd takiego sposobu oceny elementów infrastruktury.

Metodologia HCM jest użyteczna z punktu widzenia zagadnień poruszanych w niniejszej pracy. Przydział do sześciu poziomów LOS koresponduje z oceną elementu infrastruktury wyrażoną grupowaniem na podstawie wartości funkcji satysfakcji i akceptacji. Każdą z trzech grup wartości tych funkcji (równe 0, od 0 do 1, równe 1) utożsamia się z dwoma poziomami LOS. Wtedy wartości graniczne pomiędzy poziomami B – C oraz D – E stają się parametrami odpowiednich funkcji oceny elementu infrastruktury.

Tabela 4.1. Kryteria oceny warunków ruchu pojazdów na wlotach skrzyżowań wyposażonych w sygnalizację [100], [192]

Poziom Swobody Ruchu (PSR)	Średnie straty czasu [s]		Level Of Service (LOS)
I	≤ 20	≤ 10	A
		10–20	B
II	20–45	20–35	C
		35–55	D
III	45–80	55–80	E
		> 80	F

Tabela 4.2. Kryteria oceny warunków ruchu pojazdów na wlotach skrzyżowań nie wyposażonych w sygnalizację (w tym ronda) [100], [190], [191]

Poziom Swobody Ruchu (PSR)	Średnie straty czasu [s]		Level Of Service (LOS)
I	≤ 5	≤ 10	A
		10–15	B
II	15÷30	15–25	C
		25–35	D
III	30÷50	35–50	E
		> 50	F

Tabela 4.3. Kryteria oceny warunków ruchu pieszych na chodnikach [100]

LOS (PSR)	Powierzchnia [m ² /p]	Natężenie ruchu [p/min/m]	Prędkość [m/s]	Stopień wykorzystania przepustowości
A	$> 5,6$	≤ 16	$> 1,30$	$\leq 0,21$
B	3,7–5,6	16–23	1,27–1,30	0,21–0,31
C	2,2–3,7	23–33	1,22–1,27	0,31–0,44
D	1,4–2,2	33–49	1,14–1,22	0,44–0,65
E	0,75–1,4	49–75	0,75–1,14	0,65–1,0
F	$< 0,75$	zmiennie	$\leq 0,75$	zmiennie

Tabela 4.4. Kryteria oceny warunków ruchu pieszych na skrzyżowaniach [100]

LOS (PSR)	Średnie straty czasu [s]	
	Na skrzyżowaniu z sygnalizacją	Na skrzyżowaniu bez sygnalizacji
A	<10	<5
B	10–20	5–10
C	20–30	10–20
D	30–40	20–30
E	40–60	30–45
F	>60	>45

Tabela 4.5. Kryteria oceny warunków ruchu rowerzystów poruszających się po jezdni ruchu ogólnego [100]

LOS (PSR)	Prędkość podróży [km/h]
A	>22
B	15–22
C	11–15
D	8–11
E	7–8
F	<7

Tabela 4.6. Kryteria oceny warunków ruchu rowerzystów poruszających się po wydzielonej ścieżce [100]

LOS (PSR)	Częstotliwość występowania przeszkód [przeszkód/km]
A	≤40
B	40–60
C	60–100
D	100–150
E	150–195
F	>195

Tabela 4.7. Kryteria oceny jakości obsługi transportem zbiorowym w mieście [100]

LOS (PSR)	Odstępy pomiędzy kursami [min]	Częstotliwość [P/h]
A	<10	>6
B	10–14	5–6
C	14–20	3–4
D	20–30	2
E	30–60	1
F	>60	<1

Tabela 4.8. Kryteria oceny jakości podróży w pojazdach transportu zbiorowego [100]

LOS (PSR)	Autobus		Kolej	
	Powierzchnia [m ² /p]	Liczba pasażerów/ miejsce siedzących	Powierzchnia [m ² /p]	Liczba pasażerów/ miejsce siedzących
A	>1,20	<0,50	>1,85	<0,50
B	0,80–1,20	0,50–0,75	1,30–1,85	0,50–0,75
C	0,60–0,80	0,75–1,0	0,95–1,30	0,75–1,0
D	0,50–0,60	1,0–1,25	0,50–0,95	1,0–2,0
E	0,40–0,50	1,25–1,50	0,30–0,50	2,0–3,0
F	<0,40	>1,50	<0,30	>3,0

Już sam sposób wykorzystywania różnego rodzaju wielkości jako podstawy do oceny jakości obsługi w elementach infrastruktury jest cenny z uwagi na metodologię skonstruowaną w niniejszej pracy. Po przeglądzie elementów stosowanych w metodzie HCM zwraca jednak uwagę fakt, iż nie używa się tożsamy wielkości dla opisu w różnych grupach użytkowników. Często jest także wykorzystywanie różnych jednostek dla opisu tej samej wielkości (np. natężenia ruchu) dla użytkowników z różnych grup. Utrudnia to porównywanie jakości tego samego elementu infrastruktury w różnych grupach użytkowników. Konieczne jest przekształcenie wielkości używanych w HCM, a także weryfikacja ich i uzupełnienie pod kątem spójnego modelu do oceny elementu infrastruktury.

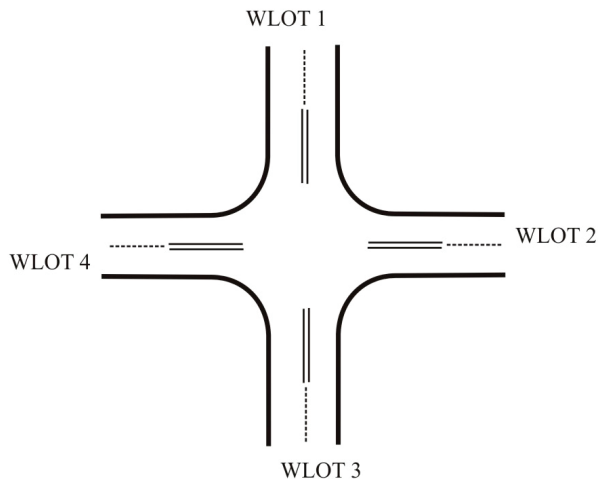
4.3. Zestaw wielkości związanych z podziałem dostępnego czasu w sygnalizacjach stałoczasowych

W niniejszym rozdziale rozpatruje się problem oceny elementu infrastruktury, którego zasób polega wyłącznie na czasie (dostępne długości sygnałów) oraz z ograniczonym zróżnicowaniem grup użytkowników (tylko podróżujący w pojazdach ruchu ogólnego lub występowanie dwóch opozycyjnych grup: piesi/podróżujący w pojazdach). Są to typowe zadania z zakresu sterowania ruchem z wykorzystaniem prostych, stałoczasowych sygnalizacji. Intencją autora monografii jest pokazanie możliwości wykorzystania własnej metody dla takich zadań, wskazanie na specyfikę podejścia, identyfikacja wielkości oceny oraz jako podstawa analizy bardziej złożonych zagadnień.

Sygnalizacje stałoczasowe realizują określone sekwencje sygnałów przypisane poszczególnym grupom lub relacjom. Sekwencja taka, nazywana programem sygnalizacji, nie zmienia się w przeciągu założonego czasu (zazwyczaj jest to kilka godzin). Powtarzalność sygnałów jest więc cykliczna. Dobór długości cyklu, czy kolejności oraz długości poszczególnych sygnałów dokonywany jest przed uruchomieniem programu. Wielkości te są zmiennymi sterującymi pracą sygnalizacji. Mimo iż nie uwzględnia się zmian natężeń ruchu w trakcie realizacji danego programu, przyjęte wartości poszczególnych

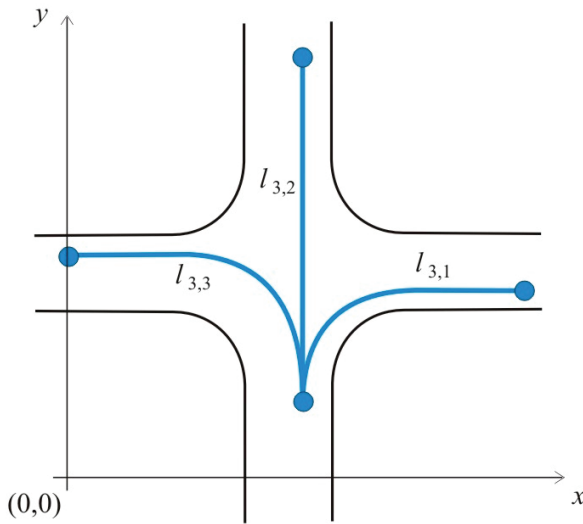
zmiennych sterujących odpowiadają obserwowanym lub przewidywanym warunkom ruchu. Na przykład, dla bardziej obciążonych relacji przydziela się dłuższy sygnał zielony. Potencjalne uprzywilejowanie konkretnych grup użytkowników realizuje się poprzez przydzielenie dłuższego sygnału zielonego lub specyficzną kolejność faz ruchu. Taki stosunkowo prosty sposób sterowania ruchem, pozornie nieefektywny wobec potencjalnych zmian natężenia ruchu, jest jednak często stosowany. Przede wszystkim spotyka się go na obszarach o niedużym ruchu, na przykład na małych skrzyżowaniach. Sygnalizacja stosowana jest wtedy nie tyle do poprawy warunków ruchu, co dla względów bezpieczeństwa. Cykliczny sposób pracy sygnalizacji może być także efektywny przy bardzo dużych natężeniach ruchu, w stanach przesylenia. Nadmiar popytu (natężenia ruchu) nad podażą (długość sygnału) na wszystkich wlotach przez dłuższy czas prowadzi do konieczności realizacji identycznych sygnałów dla wszystkich grup niezależnie od faktu stosowania sygnalizacji stałoczasowej lub nie. Niewątpliwie łatwiejsza jest ocena ich zasadności i sposobu działania. Bardziej wyrafinowane działania mają czasami tendencje do niezgodności zamierzeń z uzyskanymi efektami.

Jednym z podstawowych zadań dla elementów infrastruktury będących węzłami w formie skrzyżowania o ruchu sterowanym sygnalizacją stałoczasową jest dobór długości sygnałów zielonych dla poszczególnych grup użytkowników (wlotów, faz i relacji). Rozpatruje się tutaj skrzyżowanie czterowlotowe (rys. 4.1). Oznaczono wloty, co jest tu tożsame z numeracją grup. Liczba grup, H wynosi więc cztery. Grupy są powiązane z wlotami, gdyż założono taki sposób sterowania ruchem za pomocą sygnalizacji, że w danej fazie ruch odbywa się tylko z jednego wlotu we wszystkich kierunkach (sterowanie wlotami). Nie zakłada się określonej długości cyklu (może ona być różna w zależności od rozwiązania).



Rys. 4.1. Ilustracja do zadania oceny dla elementu infrastruktury, którego zasób polega wyłącznie na czasie

Model rozpatrywanego elementu infrastruktury ma uproszczoną postać (w sensie liczby i zróżnicowania grup użytkowników). Każda z tras w danej grupie ma trzy ogniwa ($L_h = 3$). Przykład ogniw dla trasy z wlotu 3 pokazano na rysunku 4.2. Układ współrzędnych zakładany jest w przestrzeni dwuwymiarowej (x, y). Początek układu dobrano w taki sposób aby współrzędne wszystkich początków i końców ogniw miały wartości dodatnie. Macierz przebiegu \mathbf{P}_h ma dla każdej trasy wymiar $[4,2]$. Nie definiuje się typu użytkowników U_h . Dla analizowanej sytuacji nie określa się liczby użytkowników na trasach (wlotach). Założono zbliżone natężenia ruchu. Oznacza to także brak wag dla analiz w tym przykładzie. Wszystkie wloty (trasy) mają równoważne znaczenie.

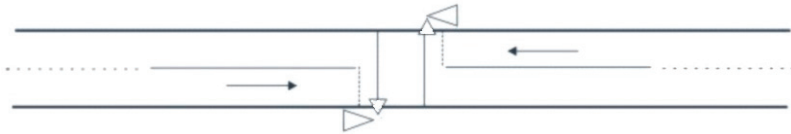


Rys. 4.2. Model ogniw dla trasy z wlotu 3

Podstawową zmienną wpływającą na warunki ruchu (i ocenę elementu infrastruktury) staje się w tym przypadku długość sygnału zielonego przyznawanego dla danej grupy użytkowników (wlotu). Satysfakcja użytkowników będzie zależeć od tej wielkości. Jako miarodajną wielkość negatywną typuje się straty czasu na wlotach z uwagi na powszechność występowania tej wielkości w dotychczasowych metodach oceny warunków ruchu. Stąd do zadań o charakterze podobnym do tutaj opisywanego, jako wielkości funkcji F_S przyjmuje się długości sygnałów zielonych, G , a funkcji F_A straty czasu, D .

Preferencje użytkowników poszczególnych grup co do długości sygnału zielonego na odpowiednim wlocie wyrażone będą wartościami parametrów funkcji oceny, które dobrane zostaną w toku kalibracji. Na etapie kalibracji możliwe jest też uwzględnienie priorytetów dla konkretnych grup.

Nieco inaczej należy potraktować zadanie podziału sygnału zielonego w sytuacji bardziej zróżnicowanych grup. Na przykład przy rozpatrywaniu opozycji: grupa użytkowników pieszych względem grupa użytkowników w pojazdach. Uwzględniane grupy w dalszym ciągu konkurują o ograniczony zasób – łączną długość sygnałów zielonych, ale ich oczekiwania względem elementu infrastruktury są inaczej formułowane i ważone z uwagi na odmienność środka lokomocji. Ilustrację elementu infrastruktury dla tak sformułowanego zadania pokazano na rysunku 4.3. Jeżeli nie rozróżnia się kierunków ruchu, a jedynie środki lokomocji, to liczba grup, H jest ograniczona do dwóch (piesi, P i podróżujący w pojazdach, V). Każda z tras w danej grupie ma tylko jedno ogniwo ($L_h = 1$). Macierz przebiegu \mathbf{P}_h dla każdej trasy jest o wymiarze $[2,2]$. Konieczne jest zdefiniowanie typu użytkowników U_h . Zasadne jest w tym przypadku także określenie liczby użytkowników w poszczególnych grupach N_h .



Rys. 4.3. Ilustracja do zadania podziału sygnału zielonego na przejściu przez jezdnię

Podział sygnału zielonego pomiędzy odmienne grupy użytkowników napotyka na większe trudności metodologiczne niż w przypadku podziału w obrębie jednej grupy. Pojawiają się pytania: według jakich kryteriów dokonywać podziału, w jaki sposób zapisywać preferencje dla określonej grupy, jak mierzyć efektywność sterowania ruchem?

Przedstawiane rozważania (por. [153], [154]), jako nowe podejście do programowania sygnalizacji świetlnej wydają się mieć sens szczególnie w przypadku podziału sygnału zielonego pomiędzy odmienne grupy użytkowników drogi, a szczególnie gdy jedną z grup użytkowników są piesi. Piesi, jako tak zwani użytkownicy niechronieni wymagają szczególnego traktowania w zadaniach planowania elementów infrastruktury (także z zakresu sterowania ruchem). Podziału sygnału zielonego pomiędzy dwie grupy użytkowników nie należy dokonywać na takiej samej zasadzie jak podziału pomiędzy opozycyjne grupy pojazdów. W analizowanych tu sytuacjach kryterium strat czasu, przepustowości (czy nawet płynności ruchu) nie może decydować o wyniku rozwiązania, gdyż prawie zawsze będzie ono oznaczać niski standard obsługi pieszych.

W niektórych obszarach miasta, czyli wszędzie tam gdzie znaczenie ruchu pieszego jest lub powinno być duże, konieczne jest stosowanie, innych niż dotychczas, kryteriów przydziału sygnału zielonego. Obecnie nie są stosowane w praktyce metody pozwalające na porównanie parametrów ruchu odmiennych grup użytkowników drogi. Tym samym nie sposób projektować sygnalizacji z wyważeniem zapotrzebowania

pieszych. Prowadzi to do pogarszających się standardów obsługi na przejściach w polskich miastach (duże straty czasu, kilkukrotny postój w obrębie jednego skrzyżowania).

W związku z powyższym proponuje się wykorzystanie w funkcjach satysfakcji i akceptacji wielkości agregowanych – ekwiwalentów jakości. Dla funkcji F_S przyjmuje się ekwiwalent E_2 , który agreguje prędkość, v czyli czas obsługi w elemencie infrastruktury oraz rezerwę przepustowości ΔCT . W funkcjach F_A wykorzystany zostanie ekwiwalent E_1 agregujący straty czasu D oraz stopień wykorzystania przepustowości XT . Wykorzystanie wielkości agregowanych pozwoli ująć w zadaniu wieloaspektowość oceny jakości.

Konieczne jest obliczenie powyższych wielkości, a także przyjęcie poziomów odniesienia: D_{\max} , v_{\min} i ΔCT_{\min} (do obliczenia udziałów, r zgodnie z zasadami opisanymi w rozdziale 3). Na tym etapie uwzględnia się ingerencję decydenta w parametry zadania poprzez przyjęcie poziomów odniesienia stosownie do specyfiki lokalnej, chęci preferowania określonej grupy, zagadnień koordynacji lub innych uwarunkowań. Na etapie opisywanej tu identyfikacji zakłada się identyczne poziomy odniesienia dla każdej z grup niezależnie od środka lokomocji. Ewentualne uwzględnienie liczebności grup wyraża się zróżnicowaniem poziomów odniesienia.

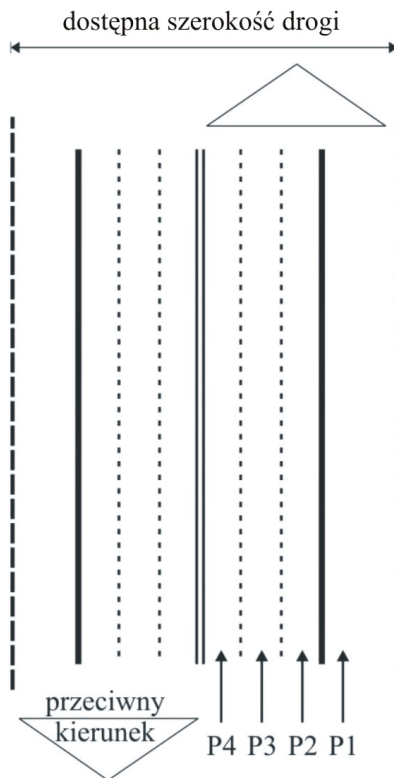
Podobnie, ingerencją decydenta jest dobór wartości pozostałych składników formuł na ekwiwalent jakości sterowania ruchem, a mianowicie wag ρ_w . Poprzez wążenie wpływu poszczególnych składników ekwiwalentów realizuje się określone zamierzenia na przykład odnośnie preferencji dla danej grupy użytkowników. W uproszczeniu, wpływ taki jest równoważny, co będzie mieć odzwierciedlenie w uproszczeniu formuł: (3.4) i (3.5). Przedstawione stosuje się nie tylko na izolowanych przejściach przez jezdnie, ale także dla przejść w obszarach skrzyżowań.

4.4. Zestaw wielkości związanych z podziałem dostępnej przestrzeni (przepustowości elementów infrastruktury)

Odrębnego podejścia wymagają problemy dotyczące podziału przestrzeni (przepustowości) elementów infrastruktury. Zadanie polega tu na znalezieniu najwyższej ocenionego sposobu wykorzystania dostępnej przestrzeni (najczęściej w ramach pasa drogowego). Przestrzeń ta jest zazwyczaj ograniczona – najsilniej zachodzi to w obszarach centralnych dużych miast. Konieczny jest podział tej przestrzeni pomiędzy użytkowników z różnych grup (w sensie odmiennych środków lokomocji lub kolizyjnych relacji w ramach takiego samego środka). Rozróżnić tu można dwa charakterystyczne problemy: doboru elementów przekroju poprzecznego drogi na odcinku

międzywęzłowym (tu istotne są środki lokomocji) i przydziału pasów ruchu dla poszczególnych relacji na wlocie węzła (zazwyczaj bez różnicowania grup ze względu na środek lokomocji).

W pierwszym problemie zakłada się ograniczoną dostępną szerokość drogi na pewnym odcinku o niesprecyzowanej długości oraz przy założeniu braku występowania zaburzeń w ruchu na całym odcinku. Nie uwzględnia się zatem rozgałęzień, zjazdów i wjazdów. Ocenie podlegają wybrane wielkości związane z geometrią drogi. Odcinek taki pokazano na rysunku 4.4. W ramach dostępnej szerokości drogi (pomiędzy liniami rozgraniczającymi) sytuuje się po kilka pasów ruchu w każdym kierunku. Pasy te przeznaczone są dla różnych grup użytkowników drogi. Grupy użytkowników konkurują o dostępną przestrzeń. Uwzględniając ich wymagania, przydziela się pasy ruchu dla konkretnych grup użytkowników w celu uzyskania maksymalnej oceny elementu infrastruktury.



Rys. 4.4. Ilustracja do zadania doboru elementów przekroju poprzecznego drogi

W prezentowanym przykładzie wyróżnia się pięć grup użytkowników drogi: TT, TB, B, P i V. Potencjalne pasy ruchu, oznaczone na rysunku 4.4 jako P1–P4, mogą

mieć odmienne zastosowanie. Pas P1 może być przeznaczony w całości dla pieszych, co oznacza bardzo szeroki chodnik. Można też w ramach tego pasa wydzielić ścieżkę dla rowerzystów. Kolejną opcją jest przeznaczenie go pod dodatkowy pas ruchu dla pojazdów. Mogą to być pojazdy w ruchu ogólnym (grupa V) lub autobusy transportu zbiorowego (grupa TB). Pas P2 może być przeznaczony dla ruchu ogólnego lub dla autobusów transportu zbiorowego. Pas P3 jest pasem dla ruchu ogólnego. W bardzo specyficznym przypadku można by go przeznaczyć także dla autobusów lub tramwajów. Pas P4 może być wydzielonym torowiskiem tramwajowym, wspólnym pasem tramwajowo – autobusowym albo pasem dla ruchu ogólnego z wbudowanym torowiskiem tramwajowym. Podobne opcje rozważa się dla przeciwnego kierunku.

Modelując taki element infrastruktury wyróżnia się do 10 tras, po jednej dla każdej grupy użytkowników w rozbiciu na kierunki ruchu. Trasa oznacza w tym przypadku konkretny pas ruchu. W zależności od przeznaczenia pasów liczba tras może być mniejsza od 10 (np. gdy autobusy nie wydzielane są z ruchu ogólnego nie oznacza się dla nich odrębnej trasy). Każda z tras ma tu tylko jedno ogniwo ($L_h = 1$) ponieważ nie zakłada się żadnych zaburzeń w ruchu na odcinku międzywęzłowym. Układ współrzędnych założono w przestrzeni dwuwymiarowej (x, y) . Macierz przebiegu \mathbf{P}_h ma dla każdej trasy wymiar $[2,2]$. Do każdej trasy przypisuje się: typ (U_h) oraz liczbę (N_h) użytkowników. Nie stosuje się dodatkowych wag.

Jako wielkości charakteryzujące opisywany element infrastruktury należy przyjmować takie które powiązane są ze specyficznym zasobem określającym przestrzeń / przepustowość. Przyjmuje się jako zmienną funkcji satysfakcji dla konkretnej grupy użytkowników szerokość przydzielonego jej pasa ruchu, s . W funkcji akceptacji zmienną będzie stopień wykorzystania przepustowości elementu infrastruktury, XT . Stopień wykorzystania przepustowości pozwala powiązać wielkość charakteryzującą przestrzeń (zależną od szerokości) z liczebnością danej grupy.

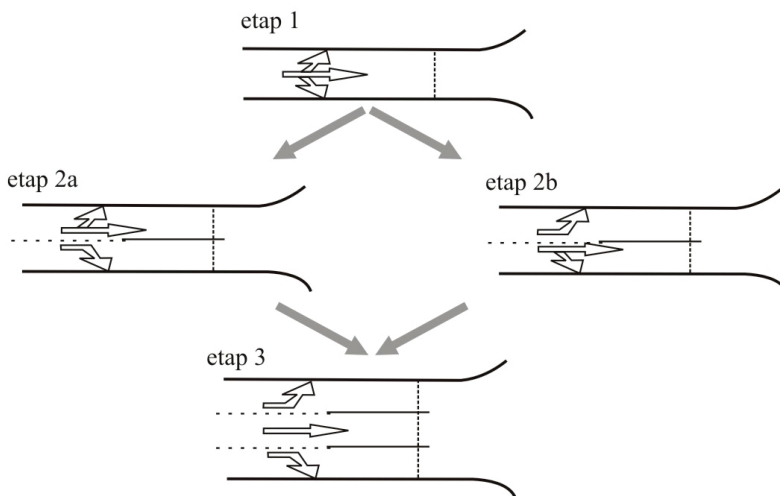
Dla danych wartości funkcji F_S i F_A otrzymuje się zestaw szerokości jakie należy zapewnić dla poszczególnych grup użytkowników w rozbiciu na kierunki ruchu. Aby uzyskać pożądane przepustowości (lub wartości zbliżone do pożądanych) należy ocenić możliwe konfiguracje pasów ruchu pod kątem zgodności wartości rezerw przepustowości z wartościami z rozwiązania o najwyższej ocenie. Oprócz zmian przeznaczenia pasów ruchu wprowadza się także korekty wielkości geometrycznych opisujących poszczególne pasy, przede wszystkim szerokości. Opisane wyżej opcje przeznaczenia poszczególnych pasów ruchu dla konkretnej grupy użytkowników traktuje się więc jako warianty wyboru. Decyzję odnośnie wyboru wariantu podejmuje się w oparciu o metodę prezentowaną w niniejszej pracy.

Problem przydziału pasów ruchu dla poszczególnych relacji dotyczy wlotów na węzeł (skrzyżowanie jako jednopoziomowy element infrastruktury). Jako grupy użytkowników traktuje się w tym przypadku poszczególne relacje. Będą to relacje: w lewo, na wprost i w prawo. Stąd liczba grup dla zadania wynosi 3. Trasa przypisana do grupy ma jedno ogniwo ($L_h = 1$), a macierz przebiegu \mathbf{P}_h ma dla każdej trasy wymiar

[2,2]. Nie różnicuje się grup z uwagi na środek lokomocji, natomiast znaczenie ma liczebność grup wyrażona liczbą osób podróżujących w pojazdach poszczególnych relacji (w uproszczeniu jest to liczba pojazdów poszczególnych relacji, przy założeniu zbliżonych napełnień wszystkich pojazdów).

Zagadnienie przydziału pasa ruchu dla poszczególnych relacji formułuje się jako zadanie poszukiwania wartości zmiennych funkcji F_S i F_A przy których określona grupa (w tym przypadku relacja) uzyskuje oddzielny pas ruchu. Na rysunku 4.5 przedstawiono ilustrację problemu: rozwiązanie wstępne oznaczające jeden wspólny pas dla wszystkich relacji oraz przykładowe rozwinięcia i konfiguracje pasów aż do sytuacji trzech oddzielnych pasów dla każdej relacji.

Problem konfiguracji pasów ruchu rozpatrywano dotąd analizując warunki ruchu (PSR) dla poszczególnych relacji (z obliczeniem rezerwy przepustowości lub strat czasu) i na ich podstawie dokonywano decyzji o wydzieleniu bądź nie pasa dla poszczególnych relacji. Wytyczne do projektowania elementów infrastruktury określają graniczne natężenia ruchu przy których nakazuje się wydzielenie pasów dla relacji skrajnych. Wskazuje to na fakt, iż natężenie ruchu (liczebność użytkowników) powinno być podstawową wielkością dla takich zadań. Dla przejścia na poziom oceny elementu infrastruktury przydatne mogą być metody stosowane do modelowania wyboru pasa ruchu przez kierowców. Długość kolejki pojazdów na danym pasie ruchu jest jednym z czynników warunkujących wybór konkretnego pasa. Standardową reakcją kierowcy jest wybór pasa ruchu z mniejszą kolejką. Problem wyboru pasa ruchu może być także rozpatrywany z punktu widzenia strat czasu. W tym przypadku na wybór pasa ruchu wpływa ocena potencjalnie niższych strat czasu. Należy podkreślić, że ocena wartości strat z punktu widzenia użytkownika jest obciążona dużą niepewnością.



Rys. 4.5. Kolejne etapy rozważanych konfiguracji pasów ruchu na wlocie węzła

Bonneson opracował w roku 1998 [27] model który ocenia indywidualne natężenia pasa ruchu i stopień nasycenia bazując na udziale relacji skrzyżnych na wspólnych pasach ruchu. Model ten wykorzystuje zasadę równego stosunku strumienia przy ocenie podziału ruchu. Bonneson wprowadza także czynnik prawdopodobieństwa zmiany pasa ruchu. Badacz opisuje to prawdopodobieństwo jako funkcję motywacji i możliwości. Pod bardzo niskimi stanami strumienia ruchu kierowcy mają małą motywację do zmiany pasa ruchu. Przy bardzo dużych natężeniach ruchu z kolei jest mało możliwości do takiej zmiany.

W stosowanych dotychczas modelach uwagę zwraca mała liczba uwzględnianych czynników wpływających na wybór pasa ruchu. Pewnym przyczynkiem do zmiany tej sytuacji była praca [183], gdzie analizowano wybór pasa ruchu z uwzględnieniem kilku, dotychczas nieuwzględnianych czynników, między innymi udział natężeń relacji kolizyjnych, czy wpływ tramwajów.

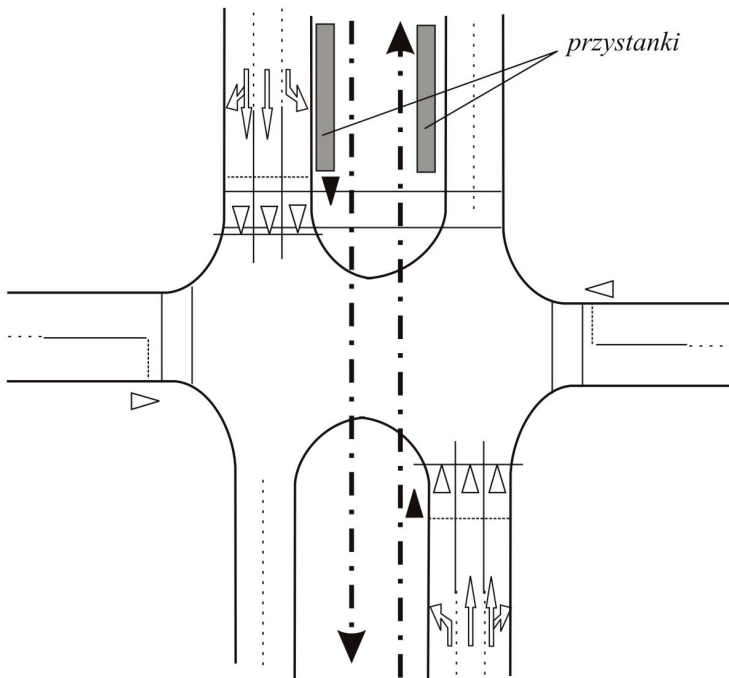
Z uwagi na powyższe, w niniejszej monografii przyjmuje się jako zmienne funkcji F_S : liczbę użytkowników (natężenie ruchu) poszczególnych relacji, N , a dla funkcji F_A : stopień wykorzystania przepustowości elementu infrastruktury, XT . Na podstawie wartości tych cząstkowych funkcji oceny wyznacza się graniczne wartości liczb użytkowników dla konkretnych relacji w powiązaniu z oferowaną dla nich przepustowością (co wyraża także wielkości opisujące geometrię elementu infrastruktury). Porównanie wartości granicznych z występującymi (lub prognozowanymi) w danym elemencie pozwoli podjąć decyzję o konfiguracji pasów ruchu na wlocie. Powyższy problem rozpatruje się także w kontekście wyboru pasa ruchu dla pojazdów uprzywilejowanych, w tym transportu zbiorowego.

4.5. Zestaw wielkości związanych z podziałem czasu i przestrzeni w sygnalizacjach dostosowujących się do zmian ruchu

Najbardziej kompleksowego podejścia wymagają zadania w których istotne jest uwzględnienie zasobu elementu infrastruktury opartego zarówno na czasie, jak i na przestrzeni (przepustowości). Wystąpi to w przypadku węzłów, na których ruch sterowany jest za pomocą sygnalizacji dostosowujących się do zmian ruchu. Przy czym, jako istotne zmienne, nie będą uwzględniane wyłącznie wielkości związane z algorytmem pracy sygnalizacji, ale również wielkości innych poziomów opisu elementu infrastruktury, w tym dotyczące jego geometrii (na przykład liczba i przeznaczenie pasów ruchu na poszczególnych wlotach, sytuowanie przystanków). W kontekście powyższego, problemy rozpatrywane w tym rozdziale łączą zagadnienia z poprzednich rozdziałów w ujęciu bardziej kompleksowym i uniwersalnym, a zarazem bardziej

skomplikowanym. Kompleksowe uwzględnienie wielkości związanych z podziałem czasu i przestrzeni pozwala na znalezienie rozwiązania o najwyższej ocenie użytkowników między innymi poprzez dobór najlepszych parametrów sygnalizacji do najkorzystniejszej rozwiązanej geometrii wlotów. Ponieważ prezentowane tu problemy są rozwinięciem prostszych zagadnień, w niniejszym rozdziale zrezygnowano już ze szczegółowego opisu części elementu infrastruktury (charakterystyki grup użytkowników, liczenie ogniw itp.).

Sygnalizacje dostosowujące się do zmian natężenia ruchu użytkowników drogi, nazywane także aktualizowanymi lub zależnymi od ruchu, funkcjonują przy nienarzuconych z góry długościach sygnałów i przy nieustalonej ich sekwencji. Na poszczególne sygnały nakłada się ograniczenia odnośnie długości (od góry i od dołu) oraz zasady ich wyświetlania (kolejność, uwarunkowania realizacji). Pozostałe wielkości związane z algorytmem pracy sygnalizacji są jednak zależne od natężeń ruchu oraz przyjętej strategii sterowania. W ramach konkretnej strategii przydziela się priorytety dla wybranych relacji lub dla uprzywilejowywanych grup użytkowników, takich jak podróżujący transportem zbiorowym, czy piesi i rowerzyści. Istotnymi wielkościami stają się więc tu wagi, które odzwierciedlają stopień przyznawanego priorytetu. Zadania występujące w tej grupie problemów sterowania ruchem sprowadza się do dwóch sytuacji: doboru zasad wydłużania i skracania sygnałów oraz wyboru kolejności ich wyświetlania.



Rys. 4.6. Ilustracja do zadania wydłużania i skracania sygnałów

Zadanie modyfikacji długości fazy z udziałem tramwajów na węzle będącym skrzyżowaniem czterowłotowym jest przykładem pierwszego z problemów. Sytuację pokazano na rysunku 4.6. Torowisko tramwajowe poprowadzono wzdłuż głównej drogi w osi północ-południe. Dla ruchu tramwajów przewidziana jest faza I obsługująca także relację na wprost (i w prawo) drogi głównej. Pozostałe dwie fazy ruchu dotyczą relacji w lewo z drogi głównej (II) oraz wszystkich relacji wlotów bocznych (III). Podstawowym założeniem strategii sterowania jest umożliwienie jak najbardziej płynnego przejazdu tramwajów. Wydłużenie fazy z ruchem tramwajów oznacza skrócenie pozostałych faz.

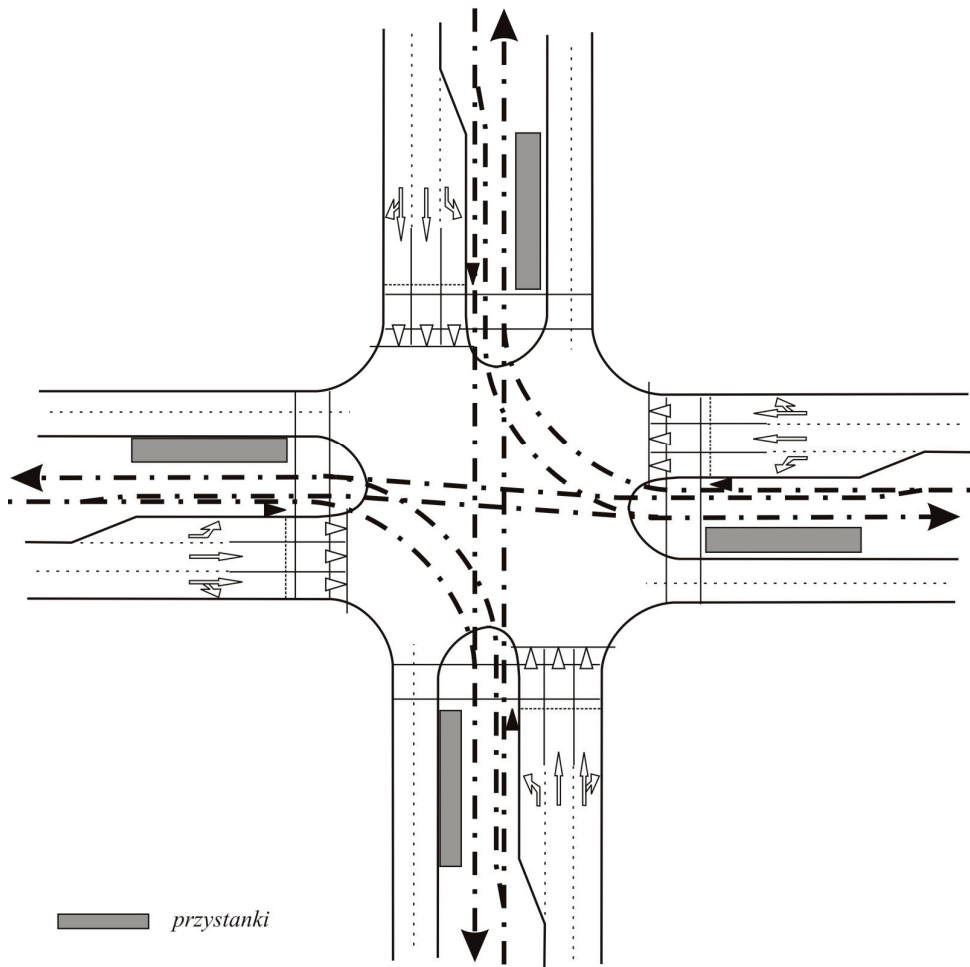
Do kontroli przebiegu pracy dobowej i ewentualnych zmian zasad sterowania w ciągu doby wykorzystywana jest zmienna g . Długości faz w programie podstawowym (bez zgłoszeń na detektorach) są określone jako wartości stałe i wynoszą: G_I , G_{II} i G_{III} . Wprowadzono następujące wielkości stałe: Δ_I – maksymalne wydłużenie fazy I jako parametr określający możliwość detekcji w pozostałych fazach, Δ_{II} – maksymalne skrócenie fazy II, Δ_{III} – maksymalne skrócenie fazy III, $G_{I\min}$ – minimalna długość fazy I, $G_{III\min}$ – minimalna długość fazy III, a także zmienne dla poszczególnych faz: g_I , g_{II} i g_{III} przypisane do tych części faz, w których możliwa jest detekcja. Dla przyjętych zasad modyfikacji cyklu zmienne te mogą przyjmować wartości: $g_I = \langle 0, \Delta_I \rangle$, $g_{II} = \langle 0, \Delta_I + \Delta_{II} \rangle$ i $g_{III} = \langle 0, \Delta_{III} \rangle$. Δ_{II} i Δ_{III} powiązane są z minimalnymi długościami odpowiednich faz wynikającymi z przepisów lub założonymi przez projektanta: $\Delta_{II} = G_{II} - G_{II\min}$, $\Delta_{III} = G_{III} - G_{III\min}$. Długość cyklu wynosi: $G_C = G_I + G_{II} + (g_{II} - \Delta_{II}) + g_d$, gdzie g_d jest czasem trwania faz następujących po fazie II. W przypadku zgłoszeń na detektorach w tej fazie $g_d = G_{I\min} + G_{III\min}$, a w przeciwnym przypadku $g_d = G_{III} + (g_{III} - \Delta_{III})$.

Z uwagi na powyższe uwarunkowania funkcje oceny powinny być oparte na wielkościach związanych z czasem (długościami sygnałów) oraz nawiązywać do przepustowości. Stąd jako zmienną dla funkcji satysfakcji przyjmuje się wielkości związane z wydłużaniem faz, g . W funkcjach akceptacji zmienną będzie strata czasu, D .

Drugi, charakterystyczny problem, to zadanie zmiany kolejności faz. Kolejność faz ulega modyfikacji stosownie do zgłaszanego zapotrzebowania i ewentualnych priorytetów. W sytuacji zgłoszeń pojazdów na danych wlotach (skojarzonych z konkretną fazą) przydziela się im właściwą fazę ruchu z pominięciem fazy dla której nie zarejestrowano zgłoszeń. Podobnie, jeżeli zgłasza się pojazd z priorytetem, to odpowiadająca mu faza ruchu jest przywoływana wcześniej. Zgłaszającymi zapotrzebowanie są także piesi i rowerzyści.

Przez węzeł będący skrzyżowaniem czterowłotowym przeprowadzono torowisko tramwajowe w obu relacjach na wprost oraz w dwóch (z czterech możliwych) z relacji skrętnych. Sytuację zilustrowano rysunkiem 4.7. Daje to możliwość przeprowadzenia czterech linii tramwajowych o różnym przebiegu. Założono lokalizację przystanków na wylotach (na kierunek podróży). W normalnym trybie (bez zgłoszeń na detektorach lub w przypadku awarii) sterownik realizuje podstawowy układ faz. Przyjęto sterowa-

nie czterofazowe: dwie fazy dla relacji na wprost (w tym tramwaje) i w prawo oraz dwie fazy dla relacji w lewo (plus stosowna relacja tramwajowa w prawo). Takie często stosowane ułożenie faz powoduje, że w trybie pracy bez możliwości zmiany ich kolejności podróżujący w tramwajach narażeni są na znaczne straty czasu w sytuacji gdy dojazd tramwaju określonej relacji nastąpi w niewłaściwej fazie (a szczególnie gdy nastąpi tuż po fazie w której możliwy był przejazd).



Rys. 4.7. Ilustracja do zadania zmiany kolejności faz

Koncepcja sterowania zakłada możliwość zmiany kolejności wyświetlania faz bez zmiany ich długości G_i , co oznacza utrzymanie stałej długości cyklu. Zmiany kolejności faz mają za zadanie minimalizować oczekiwanie tramwajów na wlotach skrzyżo-

wania. Wprowadza się specyficzne zmienne: zapotrzebowanie na fazę oraz zajęcie przystanku dla wylotu. Sygnały z detektorów tranzytowych zlokalizowanych w określonej odległości przed wlotami skrzyżowania są odczytywane co 1 sekundę. Odebranie określonego sygnału z konkretnego detektora powoduje modyfikację wyżej określonych zmiennych. Sygnał o wybranym kierunku dalszej jazdy zwiększa wartość zmiennej zapotrzebowania na fazę. Jednocześnie modyfikacja wartości tej zmiennej jest tak ustawiona, że im krótszy jest czas od poprzedniej realizacji pożądanej fazy (czyli dłuższy czas oczekiwania na nią), tym większą wartość otrzymuje ta zmienna.

Z uwagi na znaczenie strat czasu zmienne funkcji F_S i F_A oparte zostają na tej wielkości. W funkcjach satysfakcji zmienną staje się suma strat czasu grup opozycyjnych, ΣD . W funkcjach akceptacji straty czasu danej grupy, D .

5. Kalibracja parametrów funkcji satysfakcji i akceptacji

5.1. Opis i przykład klasycznej metody kalibracji

Kalibracja parametrów funkcji satysfakcji i akceptacji polega na rozmytym grupowaniu wartości konkretnych wielkości. Grupowanie wielkości na stosowne klastry pozwoli ustalić rzędne środków klastrów i na tej podstawie określić wartości parametrów funkcji. Wielkości wykorzystywane w kalibracji opisywane są przez dwie zmienne: wartość wielkości o charakterze pozytywnym lub negatywnym według identyfikacji przeprowadzonej w rozdziale 4 oraz przez przypisaną do niej ocenę użytkowników. Kalibracji podlegają parametry: d , e dla funkcji satysfakcji oraz b , c dla funkcji akceptacji. Parametry te mogą być różne, bowiem wyrażają rozmyte oceny użytkowników elementu infrastruktury w konkretnym przypadku. Nie oznacza to jednak potrzeby kalibracji każdorazowo dla kolejnego (innego) elementu infrastruktury. Wręcz przeciwnie, stosować można pewne wzorcowe zestawy parametrów funkcji F_S i F_A opracowane dla specyficznych zastosowań.

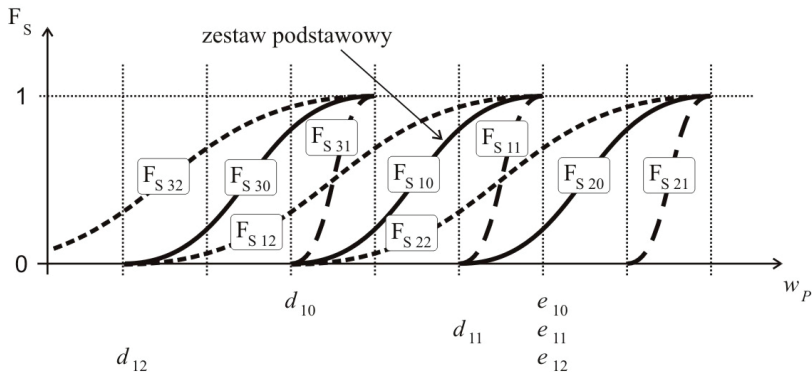
Omawiane są dwa sposoby kalibracji. Sposób pierwszy opiera się na zestawach wielkości opisywanych przez obie zmienne (wartość wielkości i ocena elementu infrastruktury) oraz wykorzystuje klasyczną metodę rozmytego grupowania FCM (opisaną w rozdziale 3.5). Taka metoda kalibracji określana jest w dalszej części jako klasyczna. Jako przykład podejścia klasycznego dokonano kalibracji wybranej wielkości. Drugi, autorski sposób kalibracji bazuje na zestawach wielkości opisywanych tylko przez jedną zmienną. Na bazie tej metody dokonano kalibracji wielkości wykorzystanych w ocenie elementów infrastruktury.

Grupowanie wielkości i wyznaczenie środków klastrów jest podstawą do budowy wzorcowych zestawów parametrów funkcji satysfakcji i akceptacji. W celu uwzględnienia użytkowników o różnym sposobie oceny zdefiniowano specyficzne rodziny tych funkcji. Rodzinę funkcji satysfakcji przedstawiono na rysunku 5.1, a funkcji akceptacji – na rysunku 5.2. Dla konkretnych funkcji określono indywidualny zestaw parametrów, przy czym parametry uzyskane w toku kalibracji przyporządkowuje się funkcjom zestawu podstawowego. W rodzinach wytypowano funkcje o średnich war-

tościach (w sensie wyniku oceny) i skojarzono je z zestawem podstawowym parametrów.

Rodzina funkcji obejmuje grupy użytkowników w odmienny sposób oceniających dany element infrastruktury. Zestaw podstawowy to użytkownicy przeciętni dokonujący oceny w sposób zrównoważony. Zestaw podstawowy ulega modyfikacjom stosownie do dwóch aspektów oceny. Użytkownicy mogą być mniej lub bardziej zdecydowani w ocenach oraz mniej lub bardziej wymagający. Prowadzi to do rodziny 9 funkcji wyróżniających się odmiennymi wartościami parametrów. W grupie użytkowników bardziej wymagających wartości parametrów funkcji satysfakcji muszą być wyższe niż w zestawie podstawowym. Natomiast wartości parametrów funkcji akceptacji – niższe. Odpowiednio, w grupie użytkowników mniej wymagających należy zdefiniować niższe wartości parametrów funkcji satysfakcji, a wyższe dla funkcji akceptacji.

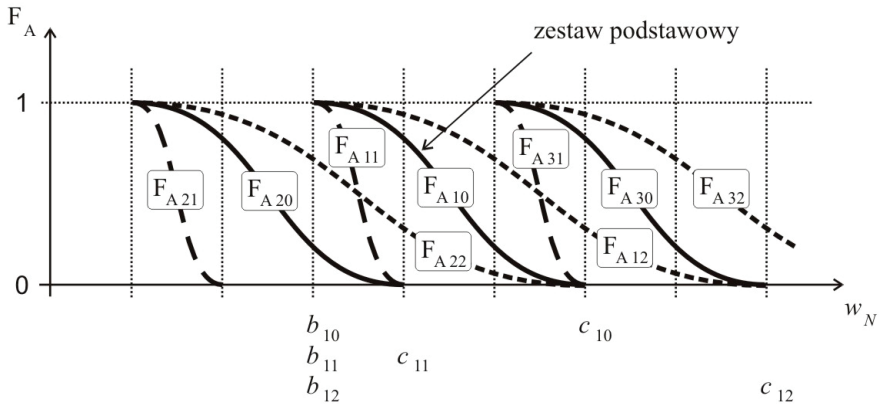
Grupa użytkowników bardziej zdecydowanych cechuje się mniejszym dystansem liczbowym pomiędzy wartościami kalibrowanych parametrów (d , e dla funkcji satysfakcji oraz b , c dla funkcji akceptacji). Uzyskanie skrajnych ocen (0 lub 1) związane jest w tym przypadku z mniejszą zmianą wartości kalibrowanej wielkości niż dla zestawu podstawowego. Mniej zdecydowani użytkownicy wymagają zwiększenia dystansu liczbowego pomiędzy wartościami konkretnych parametrów.



Rys. 5.1. Rodzina funkcji satysfakcji

Z powyższymi definicjami korespondują oznaczenia funkcji na rysunkach: 5.1 i 5.2: F_{S10} lub F_{A10} to grupa zestawu podstawowego, F_{S11} lub F_{A11} – bardziej zdecydowani użytkownicy zestawu podstawowego, F_{S12} lub F_{A12} – mniej zdecydowani użytkownicy zestawu podstawowego, F_{S20} lub F_{A20} – użytkownicy bardziej wymagający, F_{S21} lub F_{A21} – użytkownicy bardziej zdecydowani i bardziej wymagający, F_{S22} lub F_{A22} – użytkownicy mniej zdecydowani i bardziej wymagający, F_{S30} lub F_{A30} – użytkownicy mniej wymagający, F_{S31} lub F_{A31} – użytkownicy bardziej zdecydowani i mniej wymagający, F_{S32} lub F_{A32} – użytkownicy mniej zdecydowani i mniej wyma-

gający. Na rysunkach 5.1 i 5.2 pokazano także sytuowanie wartości parametrów dla kilku wybranych funkcji. Podane zależności pomiędzy wartościami parametrów, na przykład b_{10} , b_{11} , b_{12} nie oznaczają, że są one równe dla każdej wielkości.



Rys. 5.2. Rodzina funkcji akceptacji

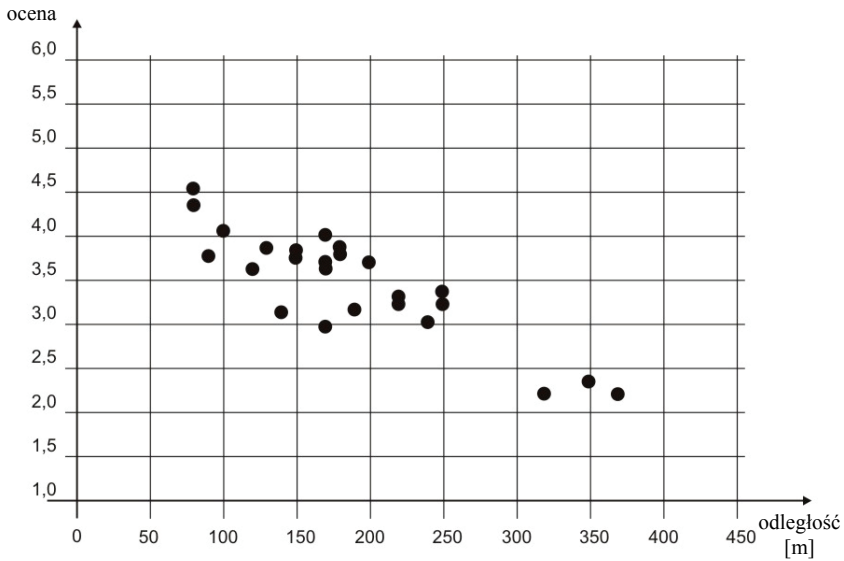
Jako przykład wielkości wykorzystywanej do oceny elementu infrastruktury (tu: odcinka międzywęzłowego) i kalibrowanej metodą tradycyjną, wybrano odległość pomiędzy przejściami przez jezdnię z punktu widzenia użytkowników – pieszych. Autor monografii przeprowadził stosowne badania w latach 2005–2011 (badania te dokumentuje odrębna publikacja będąca w roku 2013 na etapie recenzji). Dla grup po około 100 studentów sporządzono specjalny kwestionariusz, który wykorzystano do oceny wybranych miejsc z przejściami przez jezdnie. Wytypowano 28 miejsc o zbliżonym i dużym natężeniu ruchu pojazdów, co uniemożliwiało przechodzenie poza wyznaczonymi przejściami. Odległości pomiędzy przejściami przez jezdnie były zróżnicowane, ale nieznanie ankietowanym. Istotą badań było nadanie indywidualnych ocen poszczególnym miejscom i tym samym wytypowanie odstępów granicznych dla poszczególnych przedziałów. Najkrótsza odległość wynosiła 50 metrów, a najdłuższa 400. Uczestnikom badań uwidoczniiono te miejsca, sugerując nadanie odpowiednio najwyższej i najniższej oceny z dostępnego przedziału. Najwyższą oceną mogło być 6, a najniższą 1. Miejsca o najkrótszej i najdłuższej odległości nie uwzględniano w dalszych badaniach, koncentrując się na pozostałych 26. W tabeli 5.1 zamieszczono między innymi podstawowe charakterystyki dla badanych miejsc, a mianowicie rzeczywistą odległość pomiędzy przejściami oraz średnią ocenę wynikającą z ankiet. Zależność średniej oceny użytkownika od rzeczywistej odległości pokazano na rysunku 5.3. Zależność ta ma charakter malejący, co jest zgodne z intuicją. Z rysunku wynika także swoista rozmytość ocen. Odległość między przejściami jest wielkością o charakterze negatywnym, co pozwala wykorzystać ją jako zmienną funkcji akceptacji.

Tabela 5.1. Charakterystyki (odległość i ocena użytkowników) oraz wartości przynależności dla poszczególnych miejsc badań

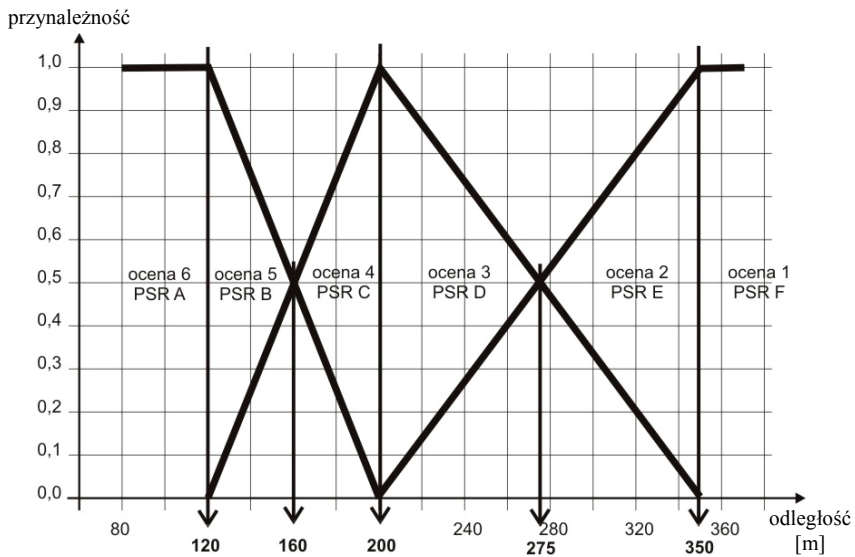
Charakterystyki miejsca badań:			Wartości funkcji przynależności dla analiz trzech klastrów:		
numer	odległość [m]	średnia ocena użytkowników	klaster pierwszy	klaster drugi	klaster trzeci
1	350	2,35	0,00	0,00	1,00
2	240	3,02	0,08	0,81	0,11
3	170	3,71	0,26	0,72	0,02
4	250	3,23	0,09	0,72	0,19
5	180	3,81	0,10	0,88	0,02
6	200	3,71	0,00	1,00	0,00
7	220	3,26	0,03	0,95	0,02
8	90	3,78	0,93	0,06	0,01
9	220	3,31	0,03	0,95	0,02
10	140	3,14	0,87	0,12	0,01
11	250	3,37	0,09	0,72	0,19
12	150	3,76	0,70	0,28	0,02
13	180	3,87	0,10	0,88	0,02
14	120	3,63	1,00	0,00	0,00
15	100	4,07	0,97	0,03	0,00
16	90	3,79	0,93	0,06	0,01
17	130	3,87	0,97	0,03	0,00
18	150	3,84	0,70	0,28	0,02
19	170	4,02	0,26	0,72	0,02
20	80	4,54	0,90	0,08	0,02
21	190	3,17	0,02	0,97	0,01
22	170	3,66	0,26	0,72	0,02
23	370	2,20	0,01	0,02	0,97
24	320	2,21	0,01	0,04	0,95
25	170	2,97	0,26	0,72	0,02
26	80	4,36	0,90	0,08	0,02

Wykorzystując metodę grupowania rozmytego FCM opisaną w rozdziale 3.5 oraz autorskie oprogramowanie FUZZY, przeprowadzono obliczenia, których celem było przyporządkowanie uzyskanych wyników do możliwie homogenicznej liczby klastrów. Obliczenia kontrolowano także programem FuzzyToolBox pakietu Matlab. Ostatecznie analizowano rozwiązanie z trzema klastrami. W tabeli 5.1 zestawiono wartości funkcji przynależności do poszczególnych klastrów. Zgodnie z opisanymi wcześniej założeniami, środki klastrów: 2 i 3 utożsamiono z parametrami b , c funkcji akceptacji. Zakres zmienności analizowanej wielkości pozwolił także określić parametry: a , f tej funkcji. Na podstawie grupowania do trzech klastrów możliwe stało się także określenie 6 przedziałów oceny badanej wielkości i ocena jej na podobieństwo

metodologii PSR. Taki sposób oceny ilustruje rysunek 5.4, a konkretne grupy ocen i proponowane nazewnictwo zestawiono w tabeli 5.2.



Rys. 5.3. Zależność średniej oceny użytkownika od rzeczywistej odległości pomiędzy przejściami przez jezdnie



Rys. 5.4. Grupowanie na 3 klastry i przyporządkowanie do 6 przedziałów oceny w odniesieniu do metody PSR

Badania wykazały, że odległości mniejsze jak 160 metrów mogą być oceniane jako dobre, a większe jak 275 metrów są już odczuwane jako złe. Odnosząc się do metodologii PSR i zakładając że najważniejszy do projektowania jest PSR C można przyjmować, że prawidłowe (z punktu widzenia użytkownika pieszego) odległości pomiędzy przejściami przez jezdnie powinny wynosić od 160 do 200 metrów. W obszarach gdzie preferuje się ruch niezmotoryzowany bardziej właściwe byłoby dążenie do zapewnienia PSR B. Wtedy odległości pomiędzy przejściami powinny lokować się w przedziale od 120 do 160 metrów.

Tabela 5.2. Proponowane nazwy oraz granice poszczególnych grup oceny

Odległość [m]	Nazwy dla trzech grup	Nazwy dla sześciu grup		PSR (LOS)
poniżej 120	dobrze	6	bardzo dobrze	A
120–160		5	lepiej jak przeciętnie (dobrze)	B
160–200	przeciętnie	4	raczej przeciętnie niż dobrze	C
200–275		3	bardziej przeciętnie niż złe	D
275–350	źle	2	gorzej jak przeciętnie (źle)	E
350 i więcej		1	bardzo źle	F

Odległość pomiędzy przejściami przez jezdnie jest wielkością negatywną dla pieszych grup użytkowników. Jej wzrost oznacza pogarszanie oceny elementu infrastruktury. Ta sama wielkość może mieć jednak także charakter pozytywny – dla grup opozycyjnych, np. osób poruszających się w pojazdach po ulicach które przecinane są przejściami przez jezdnie. Z prowadzonych analiz wyprowadza się więc także parametry stosownych funkcji satysfakcji F_S . Wielkość, która będzie zmienną funkcji F_S , definiuje się jako różnicę pewnej wartości granicznej odległości pomiędzy przejściami a wartościami rzeczywistymi (l_r), na przykład $400 - l_r$. Wielkość taka nabiera charakteru pozytywnego i w takich uwarunkowaniach parametry funkcji satysfakcji przyjmują wartości: $d = 200$ m (odległość poniżej której wartość przynależności, czyli funkcji F_S równa się 0), $e = 280$ m (odległość powyżej której wartość przynależności czyli funkcji F_S równa się 1).

W podobny sposób dokonuje się kalibracji parametrów funkcji F_S i F_A dla innych wielkości oceny elementu infrastruktury, takich, których ocena może być uzyskana w drodze ankietowania użytkowników. Takimi wielkościami są: szerokości pasów ruchu (jezdni, chodników), długości sygnałów zielonych (oraz inne wielkości związane z czasem, takie jak straty czasu, wydłużenia sygnałów). Pozostają jednak wielkości istotne w autorskiej metodzie oceny, których kalibracja nie jest możliwa według metody klasycznej lub jest problematyczna metodologicznie. Do takich wielkości zalicza się: prędkość, natężenie ruchu, wielkości związane z przepustowością (stopień jej wykorzystania i rezerwa) oraz ekwiwalenty E_1 i E_2 .

Z uwagi na zastosowanie w metodzie oceny wielkości, które nie mogą być kalibrowane metodą klasyczną, a także chcąc ograniczyć pracochłonność prowadzenia badań ankietowych, autor monografii wprowadza własną metodę kalibracji parametrów funkcji satysfakcji i akceptacji.

5.2. Autorska metoda kalibracji

Podejście tradycyjne w kalibracji parametrów funkcji satysfakcji i akceptacji wymaga zgromadzenia dużego zbioru danych związanych z ankietowaniem użytkowników. Jest to zajęcie uciążliwe i obciążone potencjalnym błędem wynikającym z przyjęcia niereprezentatywnej próbki. Tymczasem w grupowaniu na potrzeby kalibracji istotne jest znalezienie rozmytych granic wyrażonych konkretnymi wartościami kalibrowanej wielkości. Nie jest więc konieczna znajomość oceny dla konkretnej wartości wielkości. Wystarczy zatem jedna zmienna – wielkość pozytywna lub negatywna.

Przesłanką do stosowania metody autorskiej jest założenie, że oceniany jest cały możliwy zakres występowania danej wielkości (w konkretnym elemencie infrastruktury lub w konkretnym rodzaju elementu, takim jak odcinek międzywęzłowy ulicy o dwu pasach ruchu, małe rondo jednopasowe itd.). Z uwagi na specyfikę oceny człowieka (i całych grup) część wartości takiej wielkości, które najbardziej satysfakcjonują użytkowników (lub są najbardziej akceptowane), uzyska najwyższą ocenę w przyjętej skali ocen. Inna część wartości uzyska oceny średnie, a jeszcze inna – najniższe. Nie jest potrzebne zatem pytanie użytkowników o konkretną wartość oceny. Ważne jest przyjęcie liczby klas i przypisanie do nich stosownych przedziałów kalibrowanej wielkości. Przypisanie na zasadzie grupowania rozmytego pozwoli uwzględnić niepewność ocen użytkowników.

Autor niniejszej monografii opracował metodę grupowania rozmytego wielkości używanych w ocenie elementów infrastruktury. Metoda ta przystosowana jest do kalibracji parametrów danej wielkości jako zmiennej funkcji satysfakcji lub akceptacji. Nie jest konieczne ankietowanie użytkowników pod kątem oceny danej wielkości. Potrzebne jest za to zgromadzenie bazy danych o wartościach danej wielkości występujących dla konkretnego elementu infrastruktury drogowej (na przykład wlotu skrzyżowania wyposażonego w sygnalizację) oraz konkretnej grupy użytkowników. Zgromadzenie danych o badanej wielkości (na przykład straty czasu) z możliwie szerokiego przedziału czasowego pozwoli uzyskać zbiór wszystkich występujących wartości wraz z ich rozrzutem. Grupowanie rozmyte takiego zbioru danych pozwoli wyznaczyć granice poszczególnych klastrów, czyli wartości graniczne pomiędzy poszczególnymi rozmytymi grupami – podobnie jak w przypadku metody tradycyjnej.

Przyjęcie w algorytmie grupowania konkretnej liczby klastrów pozwala na wyznaczenie wartości granicznych dla trzech przedziałów oceny. Wartości parametrów funkcji

satysfakcji i akceptacji uzyskane w wyniku autorskiej metody kalibracji tworzą jeden z zestawów wzorcowych charakteryzujących dany element infrastruktury z punktu widzenia konkretnej grupy użytkowników. Duża liczba danych wykorzystanych w kalibracji powoduje, że jej wynik odpowiada przeciętnej populacji użytkowników.

W metodzie autora istotne jest zgromadzenie zbioru danych o wystarczającej liczbie. Liczebność ustala się procedurą iteracyjną. Przyrost liczebności zbioru danych oznacza zmiany w wyniku grupowania. Z tych zmian wynikają odmienne wartości graniczne zmiennych. W momencie, gdy dalsze przyrosty liczebności zbioru danych nie powodują zmian w wyniku grupowania, przyjmuje się że zbiór jest wystarczająco liczny.

Do kalibracji parametrów charakterystycznych wielkości opisujących element infrastruktury wykorzystano bazy danych z badań własnych autora oraz źródeł zewnętrznych (takich jak automatyczne stacje pomiaru ruchu). Dane te zbierano w latach 1999–2008, niekoniecznie w każdym przypadku na potrzeby niniejszej monografii. Ponieważ zebrane dane wykorzystywane są do zobrazowania zmienności wielkości modelu oceny w typowych elementach infrastruktury, nie jest konieczna ich aktualizacja. W rozdziałach: 5.3–5.5 opisano kalibrację metodą autora parametrów dla wielkości wykorzystywanych w dalszej części monografii.

5.3. Kalibracja parametrów wielkości związanych z natężeniem ruchu

Analizowano wielkości: natężenie ruchu, rezerwa i stopień wykorzystania przepustowości. Wykorzystano wyniki pomiarów wykonywanych dla zadań, które prowadził lub przy których współpracował autor monografii. W zakresie dotyczącym ruchu pojazdów samochodowych są to: pomiary w przekrojach poprzecznych ulic oraz na wlotach skrzyżowań w Szczecinie (rok 2006) oraz podobne pomiary wykonane w Białej Podlaskiej (rok 2008), pomiary do kalibracji macierzy podróży wykonywane we Wrocławiu (lata 2005–2007). W zakresie dotyczącym ruchu pieszych są to: pomiary na skrzyżowaniach w Białej Podlaskiej (rok 2008) oraz badania własne z Wrocławia (lata 2004–2006). W zakresie dotyczącym ruchu tramwajów są to: pomiary z Łodzi (rok 2008) i Wrocławia (lata 2005–2007). W zakresie dotyczącym ruchu autobusów transportu miejskiego są to: pomiary z Lubina (rok 2006), Białegostoku (rok 2007), Opola (rok 2008) i Wrocławia ((lata 2005–2008). Wykorzystano także bazę danych z pomiarów ze stacji automatycznych lokalizowanych na drogach wylotowych z Wrocławia (most Milenijny) i Krakowa (ul. Wielicka). Dane te zaczerpnięto z sieci internet (www.traxelectronik.pl).

Dla wyżej wymienionych zbiorów danych dokonano grupowania rozmytego (metodą FCM) z użyciem modułu Fuzzy Toolbox programu Matlab. Prezentowane tu wyniki

kalibracji ogranicza się do kilku charakterystycznych przypadków z zawężeniem liczby klastrow do trzech, tak aby uzyskiwane wartości korespondowały z metodą wykorzystywaną w niniejszej monografii. W tabelach: 5.3–5.5 zebrano charakterystyki kilku typowych zestawów danych związanych z natężeniami ruchu, odpowiednio: pojazdów ruchu ogólnego, pieszych i pojazdów transportu zbiorowego. Oprócz środków klastrow wyznaczonych metodą FCM podano także charakterystyki statystyczne (średnia, minimum, maksimum, mediana, percentyl 25, percentyl 75, odchylenie standardowe i wariancja). Dla pojazdów ruchu ogólnego rejestrowano natężenia z kolejnych kwadransów w przedziale całej doby. Natężenia ruchu pieszych dotyczą interwałów dziesięciosekundowych z przedziału godziny szczytu. Dla pojazdów transportu zbiorowego zestawiono wartości dotyczące liczby pojazdów w przeciągu godziny.

Tabela 5.3. Charakterystyki natężeń ruchu pojazdów ruchu ogólnego [P/15 min]

Sytuacja (zestaw)	Arteria miejska (odcinek międzywęzłowy)	Włot na skrzyżowanie osygnalizowane	Włot na rondo
Środek pierwszego klastra	21	23	16
Środek drugiego klastra	172	132	96
Środek trzeciego klastra	253	197	160
Średnia	135	96	70
Minimum	2	3	1
Maksimum	305	279	234
Mediana	162	98	79
Percentyl 25	22,75	20	17
Percentyl 75	214,00	145,75	108,50
Odchylenie standardowe	96,84	68,70	54,84
Wariancja	9377,75	4720,18	3007,89

Tabela 5.4. Charakterystyki natężeń ruchu pieszych [u/h]

Sytuacja (zestaw)	Przeście przez jezdnię	Wyjście z budynku	Zwężenie na chodniku
Środek pierwszego klastra	4	2	3
Środek drugiego klastra	7	9	13
Środek trzeciego klastra	10	20	27
Średnia	3,5	6,2	10,6
Minimum	0	0	0
Maksimum	13	28	42
Mediana	3	4	9
Percentyl 25	2	2	3
Percentyl 75	5	8	15
Odchylenie standardowe	2,53	5,52	8,35
Wariancja	6,38	30,44	69,69

Tabela 5.5. Charakterystyki natężeń ruchu pojazdów transportu zbiorowego [P/h]

Sytuacja (zestaw)	Tramwaje na węźle przystankowym	Tramwaje na odcinku międzywęzłowym	Autobusy na wydzielonym pasie
Środek pierwszego klastra	46	39	25
Środek drugiego klastra	70	98	69
Środek trzeciego klastra	103	231	172
Średnia	63	65	44
Minimum	36	24	16
Maksimum	117	343	205
Mediana	54	44	29
Percentyl 25	46	35	20
Percentyl 75	76	73	44
Odchylenie standardowe	22,7	56,0	43,7
Wariancja	517	3140	1912

Przepustowość obliczono dla kilku charakterystycznych sytuacji na podstawie: pomierzonych natężeń ruchu (wyżej wymienione bazy danych), metod obliczania przepustowości oraz wielkości charakteryzujących daną sytuację koniecznych z punktu widzenia danej metody obliczania przepustowości. Przepustowość wlotów skrzyżowań wyposażonych w sygnalizację świetlną obliczono na podstawie formuły (5.1), dla relacji podporządkowanych na skrzyżowaniu bez sygnalizacji według wzorów (5.2) i (5.3), dla wlotów na rondo według zależności (5.4), a dla odcinków międzywęzłowych ulic według (5.5) i (5.6). Dla obliczenia przepustowości wlotów skrzyżowań z sygnalizacją świetlną podstawowe znaczenie ma natężenie nasycenia (S) – wzór (5.7).

$$C = S \cdot \frac{G_e}{G + R}, \quad (5.1)$$

$$C_0 = \frac{3600}{t_f} \cdot e^{-1,10 \cdot \frac{Q_n}{3600} \left(t_g - \frac{t_f}{2} \right)}, \quad (5.2)$$

$$C_0 = \frac{3600}{t_f} \cdot e^{-1,07 \cdot \frac{Q_n}{3600} \left(t_g - \frac{t_f}{2} \right)}, \quad (5.3)$$

$$C_0 = \frac{Q_n \cdot \exp\left(-0,95 \cdot \frac{Q_n \cdot t_g}{3600}\right)}{1 - \exp\left(-1,10 \cdot \frac{Q_n \cdot t_f}{3600}\right)}, \quad (5.4)$$

$$C = 2800 \cdot f_k \cdot f_p \cdot f_c, \quad (5.5)$$

$$C = C_{VP} \cdot n \cdot f_p \cdot f_{ac} \cdot f_o \cdot f_{zd}, \quad (5.6)$$

$$S = \frac{3600}{\Delta t}. \quad (5.7)$$

Przepustowość zależy od natężenia nasycenia (S) oraz od udziału długości efektywnego sygnału zielonego (G_e) w długości cyklu (przy czym długość cyklu oznacza się w niniejszej monografii poprzez sumę sygnałów zielonych, G i pozostałych – niezielonych, R). Przepustowość wyjściowa relacji podporządkowanych na skrzyżowaniach bez sygnalizacji (C_0) zależy od sumy natężeń ruchu na relacjach nadrzędnych (Q_n), granicznego odstępu czasu (t_g) oraz odstępu czasu pomiędzy pojazdami wjeżdżającymi z kolejki (t_f). Przepustowość wyjściowa C_0 dla wlotów ronda jednopasowego zależy od: Q_n – natężenia ruchu na jezdni ronda przy wlocie, t_g – granicznego odstępu czasu, t_f – odstępu czasu między pojazdami opuszczającymi kolejkę na wlocie w przypadku wystąpienia dużej luki czasu w potoku na jezdni ronda. Przepustowość odcinków międzywęzłowych dróg zamiejskich (z wyjątkiem klas A lub S) oblicza się stosując szereg współczynników f_i modyfikujących wyjściową wartość przepustowości i uwzględniających wpływ takich czynników, jak szerokość pasa ruchu, czy struktura rodzajowa ruchu.

Wykorzystując zależności (5.1)–(5.6) oraz przyjmując określone wartości wielkości zawartych w tych wzorach, wyznaczono charakterystyczne wartości przepustowości elementu infrastruktury, CT dla typowych sytuacji na drodze i dla pojazdów ruchu ogólnego. Na podstawie badań własnych podano także wartości przepustowości dla innych grup użytkowników. Wartości te zestawiono w tabeli 5.6. Długość cyklu zapisano jako sumę sygnałów $G + R$. Dokonano unifikacji jednostek [u/h], przyjmując napelnienie pojazdu osobowego równe 1, autobusu transportu miejskiego równe 20, a tramwaju równe 60 osób. Dla pojazdów transportu zbiorowego przyjęto ponadto: postój na przystanku = 40 s, minimalny odstęp czasowy pojazdów poruszających się po wydzielonym pasie = 20 s. Na podstawie typowych wartości przepustowości (tabela 5.6) oraz zbioru danych o natężeniach ruchu wyliczono zbiory danych rezerwy przepustowości elementu infrastruktury, ΔCT oraz stopni wykorzystania przepustowości elementu infrastruktury, XT – według zależności (5.8) i (5.9):

$$\Delta CT = CT - Q, \quad (5.8)$$

$$XT = \frac{Q}{CT}. \quad (5.9)$$

Następnie dokonano kalibracji tych wielkości, wykorzystując taką samą metodę i narzędzia jak przy kalibracji natężeń ruchu. Stopień wykorzystania przepustowości,

XT jest wielkością ujemną. Rezerwa przepustowości, ΔCT jest wielkością pozytywną. Charakterystyki rezerwy przepustowości elementu infrastruktury oraz stopnia jej wykorzystania zamieszczono w tabelach: 5.7–5.12.

Tabela 5.6. Typowe wartości przepustowości, CT

Grupa użytkowników, sytuacja	Przepustowość [u/h]
Pojazdy w ruchu ogólnym, pas ruchu na odcinku międzywęzłowym	1200
Pojazdy w ruchu ogólnym, wlot na skrzyżowanie osygnalizowane $G_e/(G + R) = 0,5$	900
Pojazdy w ruchu ogólnym, wlot na rondo	1000
Pojazdy w ruchu ogólnym, wlot z drogi podporządkowanej	500
Piesi, przejście przez jezdnię, $G_e/(G + R) = 0,25$	4500
Piesi, chodnik o szerokości 3 m	13500
Piesi, chodnik o szerokości 1,5 m	6750
Autobusy transportu zbiorowego, wydzielony pas ruchu	5400
Autobusy transportu zbiorowego, przystanek przy skrzyżowaniu	1800
Tramwaje, torowisko wydzielone	10800
Tramwaje, przystanek przy skrzyżowaniu	5400

Pojawiające się w tabelach: 5.7–5.9 wartości ujemne rezerwy przepustowości są wynikiem przyjętego sposobu klastrowania.

Tabela 5.7. Charakterystyki rezerwy przepustowości, ΔCT dla pojazdów ruchu ogólnego [u/h]

Sytuacja (zestaw)	Arteria miejska (odcinek międzywęzłowy)	Wlot na skrzyżowanie osygnalizowane	Wlot na rondo
Środek pierwszego klastra	189	110	360
Środek drugiego klastra	509	371	617
Środek trzeciego klastra	1115	809	938
Średnia	656	517	718
Minimum	-20	-216	64
Maksimum	1192	888	1000
Mediana	552	508	682
Percentyl 25	344	317	566
Percentyl 75	1109	820	932
Odchylenie standardowe	387,36	274,81	219,38
Wariancja	150044	75523	48126

Tabela 5.8. Charakterystyki rezerwy przepustowości, ΔCT dla pieszych [u/h]

Sytuacja (zestaw)	Przejście przez jezdnię	Wyjście z budynku	Zwężenie na chodniku
Środek pierwszego klastra	1849	6341	-2939
Środek drugiego klastra	3094	10257	1957
Środek trzeciego klastra	4148	12708	5507
Średnia	3230	11258	2949
Minimum	-180	3420	-8370
Maksimum	4500	13500	6750
Mediana	3420	12060	3510
Percentyl 25	2700	10620	1350
Percentyl 75	3780	12780	5670
Odchylenie standardowe	909,57	1986,33	3005,30
Wariancja	827 318	3 945 516	9 031 847

Tabela 5.9. Charakterystyki rezerwy przepustowości, ΔCT dla pojazdów transportu zbiorowego [u/h]

Sytuacja (zestaw)	Tramwaje na węzle przystankowym	Tramwaje na odcinku międzywęzłowym	Autobusy na wydzielonym pasie
Środek pierwszego klastra	-799	-3089	1954
Środek drugiego klastra	1192	4934	4005
Środek trzeciego klastra	2608	8452	4908
Średnia	1607	6883	4515
Minimum	-1639	-9793	1290
Maksimum	3220	9345	5088
Mediana	2163	8127	4825
Percentyl 25	847	6396	4525
Percentyl 75	2626	8687	4995
Odchylenie standardowe	1364	3362	874
Wariancja	1 862 408	11 302 801	764 778

Tabela 5.10. Charakterystyki stopnia wykorzystania przepustowości, XT dla pojazdów ruchu ogólnego

Sytuacja (zestaw)	Arteria miejska (odcinek międzywęzłowy)	Włot na skrzyżowanie osygnalizowane	Włot na rondo
Środek pierwszego klastra	0,07	0,10	0,06
Środek drugiego klastra	0,57	0,59	0,38
Środek trzeciego klastra	0,84	0,88	0,64
Średnia	0,45	0,43	0,28
Minimum	0,01	0,01	0,00
Maksimum	1,02	1,24	0,94
Mediana	0,54	0,44	0,32
Percentyl 25	0,07	0,09	0,07
Percentyl 75	0,71	0,65	0,43
Odchylenie standardowe	0,32	0,31	0,22
Wariancja	0,10	0,09	0,05

Tabela 5.11. Charakterystyki stopnia wykorzystania przepustowości, XT dla pieszych

Sytuacja (zestaw)	Przejście przez jezdnię	Wyjście z budynku	Zwężenie na chodniku
Środek pierwszego klastra	0,08	0,06	0,18
Środek drugiego klastra	0,31	0,24	0,71
Środek trzeciego klastra	0,59	0,53	1,43
Średnia	0,28	0,17	0,56
Minimum	0	0	0
Maksimum	1,04	0,75	2,24
Mediana	0,24	0,11	0,48
Percentyl 25	0,16	0,05	0,16
Percentyl 75	0,40	0,21	0,80
Odchylenie standardowe	0,20	0,15	0,45
Wariancja	0,04	0,02	0,20

Tabela 5.12. Charakterystyki stopnia wykorzystania przepustowości, XT dla pojazdów transportu zbiorowego

Sytuacja (zestaw)	Tramwaje na węzle przystankowym	Tramwaje na odcinku międzywęzłowym	Autobusy na wydzielonym pasie
Środek pierwszego klastra	0,52	0,22	0,09
Środek drugiego klastra	0,79	0,54	0,26
Środek trzeciego klastra	1,15	1,28	0,64
Średnia	0,70	0,36	0,16
Minimum	0,40	0,13	0,06
Maksimum	1,30	1,91	0,76
Mediana	0,60	0,25	0,11
Percentyl 25	0,51	0,20	0,07
Percentyl 75	0,84	0,41	0,16
Odchylenie standardowe	0,25	0,31	0,16
Wariancja	0,06	0,10	0,03

5.4. Kalibracja parametrów wielkości związanych ze stratami czasu

Bazę danych związanych ze stratami czasu skompletowano na dwa sposoby. Straty czasu tramwajów mierzono przy okazji prac prowadzonych przez autora monografii: we Wrocławiu (lata: 1999, 2002, 2005) i w Łodzi (rok 2008). Straty czasu w ruchu pieszych oraz pojazdów obliczono wykorzystując znane zależności oraz dane o ruchu gromadzone na potrzeby kalibracji parametrów innych wielkości (natężenia ruchu). Straty czasu dla wlotu na skrzyżowanie osygnalizowane obliczono według zależności: (5.10) i (5.11). Straty czasu dla wlotu na rondo według (5.12), a straty czasu pieszych

dla przejścia przez jezdnię według (5.13) [162], gdzie poprzez N_R oznaczono liczbę pieszych docierających do przejścia w trakcie wyświetlania sygnału czerwonego, a poprzez N liczbę pieszych docierających w trakcie całego cyklu. Charakterystyki dla strat czasu zamieszczono w tabelach: 5.13 i 5.14.

$$D = 0,5 \cdot (G + R) \cdot \frac{(1 - \lambda)^2}{1 - X \cdot \lambda} + 900 \cdot \left[(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{3,5 \cdot X^2}{C}} \right] \quad (5.10)$$

$$\lambda = \frac{G + 1}{G + R}, \quad (5.11)$$

$$D = 1,12 \cdot \left\{ \frac{3600}{C} + 900 \cdot \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot X}{C}} \right] \right\} + \frac{0,027}{1 - 0,99 \cdot X} - 2,2, \quad (5.12)$$

$$D = \frac{R}{2} \cdot \frac{N_R}{N}. \quad (5.13)$$

Tabela 5.13. Charakterystyki strat czasu dla pojazdów ruchu ogólnego [s]

Sytuacja (zestaw)	Wlot na skrzyżowanie osygnalizowane	Wlot na rondo
Środek pierwszego klastra	11,0	2,7
Środek drugiego klastra	17,3	6,4
Środek trzeciego klastra	36,8	43,5
Średnia	14,7	4,5
Minimum	10,1	1,9
Maksimum	48,0	46,2
Mediana	13,3	3,7
Percentyl 25	10,5	2,2
Percentyl 75	16,7	5,0
Odchylenie standardowe	6,28	5,24
Wariancja	39,4	27,4

Specyficznym parametrem funkcji oceny elementu infrastruktury są długości sygnałów zielonych. Kalibracji długości sygnałów dokonuje się na dwa sposoby. Pierwsza opcja to fuzyfikacja (rozmycie) wartości granicznych długości sygnałów wykorzystywanych do oceny warunków ruchu w metodzie PSR (LOS). Druga opcja kalibracji polega na powiązaniu wartości długości sygnałów zielonych z wartościami strat czasu i przeliczeniu już skalibrowanych wartości strat. W niniejszym rozdziale wykorzystano ten drugi sposób. Przeliczenia skalibrowanych wartości strat czasu dla pojazdów ruchu ogólnego (tabela 5.13) oraz dla pieszych (tabela 5.14) dokonano na podstawie zależności: (5.10) i (5.11) oraz (5.13). W formule na straty czasu pojazdów (5.10) pominięto człon związany z losowymi stratami czasu (z uwagi na nieduże ich

wartości) oraz przyjęto długość cyklu: $G + R = 80$ s, $C = 900$ P/h. W formule na straty czasu pieszych (5.13) przyjęto: $G + R = 80$ s, $N_R/N = 0,5$. Wartości środków klastrów dla długości sygnału zielonego zamieszczono w tabeli 5.15. Długość sygnału zielonego jest wielkością pozytywną.

Tabela 5.14. Charakterystyki strat czasu dla pieszych i dla tramwajów [s]

Sytuacja (zestaw)	Piesi – przejście przez jezdnię	Tramwaje na węzle przystankowym
Środek pierwszego klastra	16,6	13,4
Środek drugiego klastra	21,6	33,8
Środek trzeciego klastra	26,4	55,5
Średnia	22,4	33,0
Minimum	15,0	3,2
Maksimum	28,8	62,1
Mediana	22,2	32,7
Percentyl 25	20,0	20,6
Percentyl 75	25,0	45,1
Odchylenie standardowe	3,52	16,6
Wariancja	12,4	276

Tabela 5.15. Charakterystyki długości sygnałów zielonych [s]

Sytuacja (zestaw)	Pojazdy	Piesi
Środek pierwszego klastra	4	27
Środek drugiego klastra	33	37
Środek trzeciego klastra	44	47

5.5. Kalibracja parametrów wielkości związanych z prędkością

Do stworzenia bazy danych o prędkościach pojazdów samochodowych wykorzystano wyniki rejestrowane w automatycznych stacjach pomiarowych zlokalizowanych na terenie Wrocławia i Krakowa (www.traxelectronik.pl). Bazę wzbogacono także wynikami pomiarów własnych z terenu Wrocławia i Wałbrzycha (lata 2005–2008). Pomiarzy prędkości tramwajów wykonano w Łodzi (rok 2008) oraz we Wrocławiu (lata 1998–2007). We Wrocławiu rejestrowano także prędkości autobusów transportu miejskiego (lata jak wyżej). Prędkości pieszych określono na podstawie pomiarów wykonywanych we Wrocławiu (lata 1999–2005). Charakterystyki dla prędkości zamieszczono w tabelach: 5.16 i 5.17.

Specyficznym parametrem funkcji oceny elementu infrastruktury jest szerokość pasa ruchu. Do kalibracji tego parametru autor monografii proponuje powiązać jego wartości z wartościami prędkości (już skalibrowanymi). Wprowadza się parametr η do przeliczania tych wartości według zależności (5.14):

$$s = \eta \cdot v. \quad (5.14)$$

Tabela 5.16. Charakterystyki prędkości dla pojazdów ruchu ogólnego [km/h]

Sytuacja (zestaw)	Ulice, $v > 50$ km/h	Ulice, $v < 50$ km/h	Drogi dwujezdniowe	Drogi szybkiego ruchu
Środek pierwszego klastra	18	12	35	54
Środek drugiego klastra	32	24	48	97
Środek trzeciego klastra	46	36	62	138
Średnia	30	24	48	94
Minimum	11	6	30	41
Maksimum	50	41	70	155
Mediana	30	24	48	93
Percentyl 25	20	16	37	62
Percentyl 75	40	33	59	118
Odchylenie standardowe	11,8	9,9	11,6	34,0
Wariancja	138	98	134	1158

Tabela 5.17. Charakterystyki prędkości dla pieszych, rowerzystów i pojazdów transportu zbiorowego [km/h]

Sytuacja (zestaw)	Piesi	Rowerzyści	Tramwaje	Autobusy
Środek pierwszego klastra	3,3	8,3	12	17
Środek drugiego klastra	4,9	10,8	18	28
Środek trzeciego klastra	6,0	13,9	25	39
Średnia	4,5	11,4	18	28
Minimum	2,5	7,0	9	13
Maksimum	6,5	15,0	28	43
Mediana	4,7	11,4	18	28
Percentyl 25	3,7	9,9	14	20
Percentyl 75	5,3	13,3	22	36
Odchylenie standardowe	1,1	2,2	5,4	9,1
Wariancja	1,1	4,9	29	83

W toku analiz określono wartości parametru η dla poszczególnych grup użytkowników drogi: = 0,11 dla pojazdów w ruchu ogólnym, = 0,50 dla pieszych, = 0,21 dla rowerzystów, = 0,24 dla tramwajów i = 0,15 dla autobusów transportu miejskiego. Na podstawie tych wartości, zależności (5.14) oraz wartości prędkości z tabel (5.16)

i (5.17) obliczono wartości środków klastrów dla szerokości pasa ruchu (tabela 5.18). Szerokość pasa ruchu jest wielkością pozytywną.

Tabela 5.18. Charakterystyki szerokości pasa ruchu [m]

Sytuacja (zestaw)/grupa	Pojazdy	Piesi	Rowerzyści	Tramwaje	Autobusy
Środek pierwszego klastra	3,85	1,65	1,74	2,88	2,55
Środek drugiego klastra	5,28	2,45	2,27	4,32	4,20
Środek trzeciego klastra	6,82	3,00	3,00	6,00	5,85

5.6. Wzorcowe zestawy parametrów

Punktem odniesienia dla prezentowanych wartości parametrów są opisane wyżej wyniki ich kalibracji. Rzuty środków klastrów na oś poziomą stają się wartościami stosownych parametrów zgodnie z opisem w rozdziale 3. Dotyczy to tak zwanego zestawu podstawowego charakteryzującego użytkowników o ocenach zrównoważonych. W nawiązaniu do rodzin funkcji satysfakcji i akceptacji pokazanych na rysunkach: 5.1 i 5.2 skonstruowano zestawy wzorcowe parametrów tych funkcji dla użytkowników o uśrednionych wymaganiach (zestaw podstawowy) – funkcje F_{S10} i F_{A10} , dla użytkowników bardziej i mniej zdecydowanych – funkcje F_{S11} , F_{A11} , F_{S12} i F_{A12} oraz dla użytkowników bardziej i mniej wymagających (bez rozróżnienia stopnia zdecydowania) – funkcje F_{S20} , F_{A20} , F_{S30} i F_{A30} . Parametry pozostałych definiowanych funkcji konstruuje się na podobnych zasadach jak niżej opisane.

W tabelach: 5.19–5.28 zestawione są wartości wzorcowe kalibrowanych wielkości pozytywnych: prędkości, rezerwy przepustowości elementu infrastruktury i ekwiwalentu E_2 oraz wielkości negatywnych: strat czasu, stopnia wykorzystania przepustowości elementu infrastruktury i ekwiwalentu E_1 . Dla każdego zestawu podano wartości średnie (wzorcowe) oraz minimalne i maksymalne parametrów funkcji satysfakcji i akceptacji. Określenie minimum i maksimum wartości danego parametru odzwierciedla zróżnicowanie preferencji użytkowników. Do wyznaczenia wartości minimalnych i maksymalnych wykorzystano charakterystyki statystyczne zidentyfikowane w procesie kalibracji konkretnych wielkości. Oparto się przede wszystkim na odchyleniu standardowym analizowanego zbioru danych.

W uzasadnionych sytuacjach korzysta się z wartości parametrów zawierających się pomiędzy minimum a maksimum. Dotyczy to sytuacji, w których obserwuje się, że preferencje użytkowników wyraźnie różnią się od przeciętnych. Różnicuje się także preferencje użytkowników takiej samej grupy, ale na przykład różnych tras (relacji). W pozostałych przypadkach należy się jednak opierać na wartościach średnich parametrów.

Tabela 5.19. Zestaw podstawowy wartości parametrów funkcji F_{S10}

Wielkość, użytkownik, rodzaj elementu infrastruktury, jednostka	Parametr d			Parametr e		
	min	wartość wzorcowa	max	min	wartość wzorcowa	max
v [km/h]:						
pojazdy, ulice, $v > 50$,	21	30	39	39	48	57
pojazdy, ulice, $v < 50$,	16	23	30	34	41	48
pojazdy, drogi dwujezdniowe,	41	50	59	61	70	79
pojazdy, drogi szybkiego ruchu,	73	98	123	77	102	127
piesi,	3,7	4,5	5,3	5,2	6,0	6,8
rowerzyści.	9	11	13	12	14	16
ΔCT pojazdy [P/h]	200	400	600	600	800	1000
E :						
zakres ocen [0, 1],	0,46	0,56	0,66	0,66	0,76	0,86
zakres ocen [1, 6].	3,3	3,8	4,3	4,3	4,8	5,3

Warto podkreślić, że prezentowane wartości parametrów odpowiadają skrajnym wartościom stosownych funkcji satysfakcji lub akceptacji (zero lub jeden). Stosownie do założenia, że oceny użytkowników nie osiągają skrajnych wartości (rozdział 3) może się więc zdarzyć, że prezentowana wartość parametru wykracza poza fizyczne ograniczenia danej wielkości. Stąd w tabelach występują na przykład wartości ujemne parametrów b dla wielkości: straty czasu. Interpretować to należy następująco: użytkownicy danej grupy nie akceptują w pełni żadnych możliwych fizycznie strat czasu (to znaczy nie jest możliwe uzyskanie wartości funkcji akceptacji = 1). Dla najmniejszych możliwych strat czasu (równych zero) wartość funkcji akceptacji jest mniejsza od 1. O ile jest mniejsza od jedności zależy od wartości parametru b (ujemnego) podanego w konkretnej tabeli.

Tabela 5.20. Zestaw podstawowy wartości parametrów funkcji F_{A10}

Wielkość, użytkownik, rodzaj elementu infrastruktury, jednostka	Parametr b			Parametr c		
	min	wartość wzorcowa	max	min	wartość wzorcowa	max
D [s]:						
pojazdy, sygnalizacja,	6	11	16	13	18	23
pojazdy, bez sygnalizacji,	-1	3	7	2	6	10
piesi / rowerzyści, sygnalizacja,	14	17	20	19	22	25
piesi / rowerzyści, bez sygnalizacji.	10	13	16	15	18	21
ΔT :						
piesi,	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4
pojazdy.	-0,1	0,1	0,3	0,4	0,6	0,8
E :						
zakres ocen [0, 1],	0,13	0,23	0,33	0,33	0,43	0,53
zakres ocen [1, 6].	1,6	2,2	2,6	2,6	3,2	3,6

Tabela 5.21. Wartości parametrów funkcji F_{S11} dla użytkowników bardziej zdecydowanych

Wielkość, użytkownik, rodzaj elementu infrastruktury, jednostka	Parametr d			Parametr e		
	min	wartość wzorcowa	max	min	wartość wzorcowa	max
v [km/h]:						
pojazdy, ulice, $v > 50$,	33	42	51	39	48	57
pojazdy, ulice, $v < 50$,	28	35	42	34	41	48
pojazdy, drogi dwujezdniowe,	54	63	72	61	70	79
pojazdy, drogi szybkiego ruchu,	75	100	125	77	102	127
piesi,	4,7	5,5	6,3	5,2	6,0	6,8
rowerzyści.	11	13	15	12	14	16
ΔCT pojazdy [P/h]	450	650	850	600	800	1000
E :						
zakres ocen [0, 1],	0,56	0,66	0,76	0,66	0,76	0,86
zakres ocen [1, 6].	3,8	4,3	4,8	4,3	4,8	5,3

Wzorcowe wartości parametrów dla: prędkości, strat czasu oraz rezerwy i stopnia wykorzystania przepustowości elementu infrastruktury określono na podstawie kalibracji opisaną powyżej. Wzorcowe wartości ekwiwalentów jakości obliczono przeliczając stosowne wielkości wchodzące w ich skład. Przy stosowaniu ekwiwalentów jakości istotna jest używana skala (zakres) ocen. Znając ją, przyjmuje się graniczne wartości ocen uważane za wysokie i rozmywając je, uzyskuje wartości parametrów funkcji F_S i F_A . Przykładowo dla skali ocen od 1 do 6 za wysoką satysfakcję można uznać oceny: 5 i 6. Graniczna wartość przebiega tu pomiędzy 4 a 5. Rozmywając granicę uzyskuje się wartości parametrów: $d = 3,8$, $e = 4,8$ (dla funkcji F_S). Podobnie wysoka akceptacja oznacza oceny: 1 i 2, a wartości parametrów po rozmyciu wynoszą: $b = 2,2$, $c = 3,2$ (dla funkcji F_A).

Tabela 5.22. Wartości parametrów funkcji F_{A11} dla użytkowników bardziej zdecydowanych

Wielkość, użytkownik, rodzaj elementu infrastruktury, jednostka	Parametr b			Parametr c		
	min	wartość wzorcowa	max	min	wartość wzorcowa	max
D [s]:						
pojazdy, sygnalizacja,	6	11	16	9	14	19
pojazdy, bez sygnalizacji,	-1	3	7	1	5	9
piesi / rowerzyści, sygnalizacja,	14	17	20	16	19	22
piesi / rowerzyści, bez sygnalizacji.	10	13	16	12	15	18
XT :						
piesi,	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3
pojazdy.	-0,1	0,1	0,3	0,1	0,3	0,5
E :						
zakres ocen [0, 1],	0,13	0,23	0,33	0,23	0,33	0,43
zakres ocen [1, 6].	1,6	2,2	2,6	2,2	2,6	3,0

Zestawy parametrów dla użytkowników bardziej lub mniej zdecydowanych oraz bardziej lub mniej wymagających stworzono przeliczając parametry zestawu podstawowego stosownie do definicji rodzin funkcji F_S i F_A (rys. 5.1 i 5.2) oraz rejestrowanych charakterystyk statystycznych poszczególnych wielkości.

Tabela 5.23. Wartości parametrów funkcji F_{S12} dla użytkowników mniej zdecydowanych

Wielkość, użytkownik, rodzaj elementu infrastruktury, jednostka	Parametr d			Parametr e		
	min	wartość wzorcowa	max	min	wartość wzorcowa	max
v [km/h]:						
pojazdy, ulice, $v > 50$,	-9	18	27	39	48	57
pojazdy, ulice, $v < 50$,	-2	5	13	34	41	48
pojazdy, drogi dwujezdniowe,	27	36	45	61	70	79
pojazdy, drogi szybkiego ruchu,	70	95	120	77	102	127
piesi,	2,7	3,5	4,3	5,2	6,0	6,8
rowerzyści.	7	9	11	12	14	16
ACT pojazdy [P/h]	-50	150	350	600	800	1000
E :						
zakres ocen [0, 1],	0,36	0,46	0,56	0,66	0,76	0,86
zakres ocen [1, 6].	2,8	3,3	3,8	4,3	4,8	5,3

Tabela 5.24. Wartości parametrów funkcji F_{A12} dla użytkowników mniej zdecydowanych

Wielkość, użytkownik, rodzaj elementu infrastruktury, jednostka	Parametr b			Parametr c		
	min	wartość wzorcowa	max	min	wartość wzorcowa	max
D [s]:						
pojazdy, sygnalizacja,	6	11	16	17	22	27
pojazdy, bez sygnalizacji,	-1	3	7	4	8	12
piesi / rowerzyści, sygnalizacja,	14	17	20	21	25	28
piesi / rowerzyści, bez sygnalizacji.	10	13	16	18	21	24
XT :						
piesi,	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
pojazdy.	-0,1	0,1	0,3	0,7	0,9	1,1
E :						
zakres ocen [0, 1],	0,13	0,23	0,33	0,43	0,53	0,63
zakres ocen [1, 6].	1,6	2,2	2,6	3,2	3,6	4,0

Tabela 5.25. Wartości parametrów funkcji F_{S20} dla użytkowników bardziej wymagających

Wielkość, użytkownik, rodzaj elementu infrastruktury, jednostka	Parametr d			Parametr e		
	min	wartość wzorcowa	max	min	wartość wzorcowa	max
v [km/h]:						
pojazdy, ulice, $v > 50$,	33	42	51	51	60	69
pojazdy, ulice, $v < 50$,	28	35	42	46	53	60
pojazdy, drogi dwujezdniowe,	54	63	72	74	83	92
pojazdy, drogi szybkiego ruchu,	76	101	126	80	105	130
piesi,	4,7	5,5	6,3	6,2	7,0	7,8
rowerzyści.	11	13	15	14	16	18
ΔCT pojazdy [P/h]	450	650	850	850	1050	1250
E :						
zakres ocen [0, 1],	0,59	0,69	0,79	0,79	0,89	0,99
zakres ocen [1, 6].	4,0	4,5	5,0	5,0	5,5	6,0

Tabela 5.26. Wartości parametrów funkcji F_{A20} dla użytkowników bardziej wymagających

Wielkość, użytkownik, rodzaj elementu infrastruktury, jednostka	Parametr b			Parametr c		
	min	wartość wzorcowa	max	min	wartość wzorcowa	max
D [s]:						
pojazdy, sygnalizacja,	1	6	11	8	13	18
pojazdy, bez sygnalizacji,	-3	1	5	0	4	8
piesi / rowerzyści, sygnalizacja,	11	14	17	16	19	22
piesi / rowerzyści, bez sygnalizacji.	7	10	13	12	15	18
XT :						
piesi,	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3
pojazdy.	-0,4	-0,2	0,0	0,1	0,3	0,5
E :						
zakres ocen [0, 1],	0,00	0,10	0,20	0,20	0,30	0,40
zakres ocen [1, 6].	0,9	1,5	1,9	1,9	2,5	2,9

Zasady rozmywania (fuzzyfikacji) stosować można dla innych wielkości (niezestawianych w tabelach wzorcowych). Taką wielkością są na przykład długości sygnałów zielonych (G). Dla takiej wielkości istotne jest rozdzielenie łącznej dostępnej długości sygnału zielonego pomiędzy wszystkie grupy użytkowników. Podziału dokonuje się proporcjonalnie do liczebności grup, stosownie do strat czasu generowanych przez dany podział lub równo pomiędzy grupy. Obliczona w ten sposób dostępna długość sygnału jest bazą dla wyznaczenia wartości długości akceptowanej jako wystarczająca (zadowalająca). Po rozmyciu tej wartości uzyskuje się parametry funkcji F_S (w tym przypadku). Na przykład, jeżeli do podziału jest 60 s sygnału zielonego pomiędzy 4 opozycyjne grupy użytkowników, to zakładając równy podział otrzymuje

się po 15 s na grupę. Przyjmując 10 s jako dolną granicę przedziału długości zadowalających. Po rozmyciu tej wartości otrzymuje się wartości parametrów: $d = 8$ s, $e = 12$ s. Przy uwzględnieniu długości sygnałów czerwonych (R) podobnej kalibracji dokonuje się dla parametrów funkcji F_A .

Tabela 5.27. Wartości parametrów funkcji F_{S30} dla użytkowników mniej wymagających

Wielkość, użytkownik, rodzaj elementu infrastruktury, jednostka	Parametr d			Parametr e		
	min	wartość wzorcowa	max	min	wartość wzorcowa	max
v [km/h]:						
pojazdy, ulice, $v > 50$,	9	18	27	27	36	45
pojazdy, ulice, $v < 50$,	4	11	18	22	29	36
pojazdy, drogi dwujezdniowe,	28	37	46	48	57	66
pojazdy, drogi szybkiego ruchu,	70	95	120	74	99	124
piesi,	2,7	3,5	4,3	4,2	5,0	5,8
rowerzyści.	7	9	11	10	12	14
ΔCT pojazdy [P/h]	-50	150	350	350	550	750
E :						
zakres ocen [0, 1],	0,33	0,43	0,53	0,53	0,63	0,73
zakres ocen [1, 6].	2,6	3,1	3,6	3,6	4,1	4,6

Tabela 5.28. Wartości parametrów funkcji F_{A30} dla użytkowników mniej wymagających

Wielkość, użytkownik, rodzaj elementu infrastruktury, jednostka	Parametr b			Parametr c		
	min	wartość wzorcowa	max	min	wartość wzorcowa	max
D [s]:						
pojazdy, sygnalizacja,	11	16	21	18	23	28
pojazdy, bez sygnalizacji,	1	5	9	4	8	12
piesi / rowerzyści, sygnalizacja,	17	20	23	22	25	28
piesi / rowerzyści, bez sygnalizacji.	13	16	19	18	21	24
XT :						
piesi,	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5
pojazdy.	0,2	0,4	0,6	0,7	0,9	1,1
E :						
zakres ocen [0, 1],	0,26	0,36	0,46	0,46	0,56	0,66
zakres ocen [1, 6].	2,3	2,9	3,3	3,3	3,9	4,3

Dodatkowo, wielkości które są używane w metodach PSR (jak straty czasu lub rezerwa przepustowości), kalibruje się opierając na granicach najwyższych poziomów. Gdy wszystkich poziomów jest sześć, to istotna będzie dolna granica poziomu B. Gdy wszystkich poziomów jest cztery, to uwzględnia się dolną granicę najwyższego poziomu (I). Wartości liczbowe tych granic należy przekształcić w następnym kroku do formy rozmytej. Na przykład jeżeli ocenianym elementem infrastruktury jest wlot na

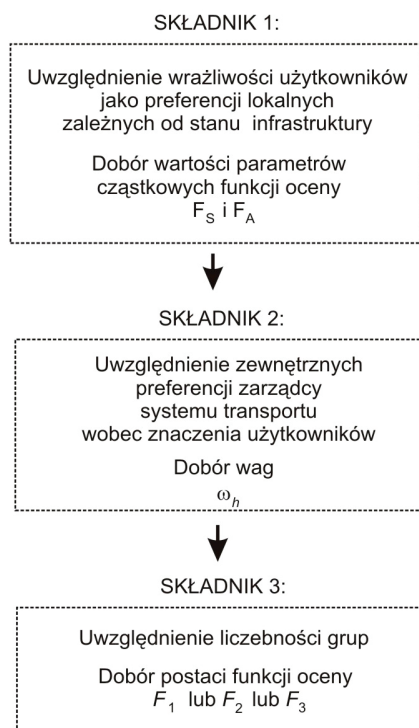
rondo i do oceny wykorzystuje się straty czasu, to dolna granica PSR I równa się 15 s i, rozmywając ją, uzyskuje się wartości parametrów: $b = 10$ s, $c = 20$ s.

Nieco inna jest procedura kalibracji w przypadku uwzględnienia sumy wielkości dla grup opozycyjnych. Wielkości te wykorzystywane są już w funkcjach innych grup. Zostały więc już skalibrowane. Sumuje się wielkości oraz wartości odpowiednich parametrów.

6. Sformułowanie metody oceny

6.1. Konstrukcja i składniki metody

Aby kompleksowo ocenić element infrastruktury, konieczne jest zbudowanie funkcji oceny uwzględniającej cząstkowe oceny grup użytkowników, potencjalne priorytety i inne ingerencje zarządzającego transportem (poprzez wagi) oraz wpływ znaczenia liczebności poszczególnych grup. Wyróżnia się trzy składniki metody oceny uwzględniające powyższe uwarunkowania (rys. 6.1). Pierwszym składnikiem jest dobór parametrów cząstkowych funkcji oceny F_S , F_A uwzględniający wrażliwość



Rys. 6.1. Składniki metody oceny elementu infrastruktury

użytkowników rozumianą także jako uwarunkowania lokalne (w tym zależne od stanu ocenianej infrastruktury). Drugi składnik to dobór wag ω_h odzwierciedlających zewnętrzne preferencje dla konkretnych grup użytkowników, w tym możliwość ingerencji zarządzającego w kierunku nadania priorytetu. Trzecim składnikiem metody jest dobór postaci funkcji oceny z wyważeniem wpływu liczebności użytkowników w poszczególnych grupach.

Jak wskazano w rozdziale 5, kalibracja parametrów cząstkowych funkcji oceny (czyli dobór ich wartości) jest różna w zależności od uwarunkowań lokalnych odpowiadających zarówno stanowi ocenianej infrastruktury, jak i preferencjom konkretnych użytkowników. Mimo iż zbudowano wzorcowe zestawy parametrów przypisane do określonego rodzaju elementu infrastruktury, element takiego samego rodzaju bywa inaczej oceniany, co jest wyrażone innymi wartościami parametrów cząstkowych funkcji oceny. Przykładowo: skrzyżowanie nie wyposażone w sygnalizację o określonych rozmiarach jest oceniane w zależności od stanu nawierzchni, czytelności oznakowania itp. Lokalna wrażliwość użytkowników w odbiorze powyższych uwarunkowań ma przełożenie na wynik oceny. Jeżeli w danej miejscowości prowadzone są działania z zakresu kształtowania zachowań komunikacyjnych promujące wykorzystanie środków transportu alternatywnych względem samochodu, oceny takiego samego elementu w stosownych grupach użytkowników będą odmienne niż w przypadku braku powyższych działań. Zatem pierwszy składnik metody oceny, polegający na odpowiednim doborze parametrów cząstkowych funkcji oceny, pozwala uwzględnić istotne uwarunkowania lokalne.

Poprzez wprowadzenie wag ω_h umożliwia się ingerencję w wynik oceny instytucji (osób) zarządzających systemem transportu, a szerzej, decydujących o jakości i poziomie życia na danym obszarze. Umożliwia to prowadzenie określonej polityki transportowej lub zarządzania mobilnością i wprowadzanie stosownych preferencji dla określonych grup użytkowników, niezależnie od preferencji lokalnych uwzględnionych w pierwszym składniku metody. Wydzielenie tych podejść na poziomie składników metody pozwala także na kontrolę wpływu poszczególnych aspektów oceny na jej wynik i tym samym modyfikowanie zarówno ocen, jak i ocenianego elementu infrastruktury.

Trzeci składnik metody pozwala uwzględnić wpływ liczebności poszczególnych grup użytkowników na proces i wynik oceny elementu infrastruktury. Dokładniej, chodzi o uwzględnienie wpływu zróżnicowania liczebności grup. Ponieważ wynikowa ocena jest uśrednieniem ocen w poszczególnych grupach, a istotna jest liczba użytkowników w danej grupie, należy skonstruować odpowiednie formy ocen uśrednianych. Jest to aspekt oceny niezależny od wyżej opisanych. Stąd zasadne jest wyróżnienie trzeciego składnika metody i wprowadzenie specjalnych formuł na obliczenie oceny końcowej.

Funkcje satysfakcji i akceptacji, F_S i F_A nazywane są w metodzie cząstkowymi funkcjami oceny i reprezentują oceny elementu infrastruktury przez użytkowników

z danej grupy. Zmienne występujące w tych funkcjach dotyczą użytkowników danej grupy lub powiązane są ze zmiennymi z grup opozycyjnych. Pierwsza sytuacja występuje zazwyczaj dla funkcji typu F_S , a druga częściej dla funkcji typu F_A . Funkcji F_S i F_A jest tyle, ile grup wyróżnionych w ramach analizowanego elementu infrastruktury. Liczbę grup oznaczono przez H , a indeks wyróżniający kolejną grupę – h . Częstkowych funkcji oceny jest więc zawsze $2H$.

6.2. Uwzględnienie wrażliwości użytkowników w ocenie elementu infrastruktury

Poprzez wrażliwość użytkowników z poszczególnych grup rozumie się zróżnicowanie oceny takiego samego elementu infrastruktury. W zależności od stopnia wrażliwości uzyskiwane są inne wartości funkcji satysfakcji lub akceptacji. Nawiązuje do tego wyróżnienie różnych podejść w rodzinach tych funkcji oznaczające większe lub mniejsze wymagania oraz większe lub mniejsze zdecydowanie w ocenach. Opowiada temu stosowna kalibracja cząstkowych funkcji oceny i specyficzne wzorcowe zestawy parametrów tych funkcji.

Odmienne wartości parametrów funkcji satysfakcji i akceptacji oraz wybór stosownej funkcji z rodziny określa się jako uwarunkowania lokalne. Uzyskuje się je wykorzystując wyniki badań i pomiarów wykonywane w konkretnym miejscu. Wyniki te poddawane są procesowi grupowania rozmytego, jak przy tworzeniu zestawu podstawowego parametrów. Wpływ na wynik oceny elementu infrastruktury określonego rodzaju (na przykład wlot na rondo będące węzłem) będzie mieć zatem stan tego elementu, czyli oprócz konkretnych wielkości opisujących geometrię także jakość nawierzchni, stan utrzymania itp. Poprzez dobór konkretnego zestawu parametrów cząstkowych funkcji oceny uwzględnia się wielkości nieuwzględnione w modelu opisującym ten element.

Zamiast wykonywania badań możliwe jest arbitralne definiowanie specyficznych grup użytkowników o określonych wymaganiach odnośnie oceny elementu infrastruktury. Wykorzystuje się wtedy wartości parametrów z innych zestawów niż podstawowy.

6.3. Wagi w metodzie oceny

Wprowadza się wagi modyfikujące znaczenie wielkości dla określonej grupy – oznaczone ω . Wagi tego typu oznaczają stopień priorytetu przypisywanego dla określonej grupy. Poprzez większą wagę, ocena elementu infrastruktury w dalej grupie

nabiera większego znaczenia dla końcowej oceny ważonej. Uwzględnia się w ten sposób preferencje dla określonych relacji lub środka lokomocji, np. podróżujących transportem zbiorowym albo dla pieszych. Wartość poszczególnych wag jest zmienna w zależności od wartości innych wielkości (np. zwiększenie wagi przy stratach czasu przekraczających określoną wartość). Poprzez wagi uwzględnia się także czynniki społeczne, środowiskowe, ekonomiczne.

Specyficzną i wyróżnioną w metodzie wagą jest liczebność danej grupy.

Ocena elementu infrastruktury wyrażana przez użytkowników z poszczególnych grup wartościami parametrów funkcji F_S i F_A jest niezależna od przypisywanych im priorytetów i może, ale nie musi, decydować o wyniku rozwiązania zadania. Nadanie priorytetu należy do czynników zewnętrznych względem użytkowników. Jest to rola zarządzającego systemem transportu, wykonywana poprzez ustalanie zasad polityki transportowej, konkretne działania na jakimś ciągu transportowym, inne narzędzia, takie jak uspokojenie ruchu. Uzyskuje się w ten sposób rozwiązanie pożądane przez decydenta, niezależne od lokalnych preferencji użytkowników. Z drugiej strony, wyważając wpływ parametrów funkcji F_S i F_A oraz wartości wag, różnorodnie ujmuje się oddziaływania decydenta i grup użytkowników. Nieco mniejsze jest znaczenie liczebności grup, zwłaszcza wobec przyjętej metody uwzględniania pojedynczych użytkowników (w tym podróżujących w pojazdach), a nie pojazdów. Preferowane są w ten sposób środki transportu zbiorowego przewożące więcej osób w pojedynczym pojeździe oraz ruch pieszy i rowerowy jako zużywające mniej powierzchni w przewozie pojedynczego użytkownika.

6.4. Funkcje oceny

Funkcja oceny w danej grupie użytkowników, F_h jest średnią z cząstkowych funkcji oceny (satisfakcji i akceptacji). Uwzględniając pierwszy składnik metody oceny analizuje się wyłącznie funkcje satisfakcji i akceptacji dla poszczególnych grup. Ocenę w danej grupie, h przedstawia funkcja (6.1). Dzielenie sumy funkcji satisfakcji i akceptacji przez 2 ma na celu uzyskanie wyniku średniej oceny z przedziału $[0,1]$. Funkcja oceny elementu infrastruktury, F przyjmuje postać (6.2). Przy uwzględnianiu kolejnych składników metody oceny elementu infrastruktury wykorzystuje się również średnią z funkcji oceny, według formuły (6.3).

$$F_h = \left[\frac{F_{Sh} + F_{Ah}}{2} \right], \quad (6.1)$$

$$F = \sum_{h=1}^{h=H} F_h, \quad (6.2)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{H} F. \quad (6.3)$$

Po uwzględnieniu wag dla danej grupy, ω_h funkcja oceny w danej grupie przyjmuje postać (6.4). Wagi ω_h należy dobierać tak, aby ich suma wynosiła 1, co wyraża formuła (6.5). Podobnie jest w przypadku uwzględnienia liczebności użytkowników w danej grupie. Liczebność jest wyrażona udziałem u_h , według zależności (6.6). Po uwzględnieniu wag, ω_h oraz udziałów u_h funkcja oceny w danej grupie przyjmuje postać (6.7).

$$F_h = \left[\frac{F_{Sh} + F_{Ah}}{2} \right] \cdot \omega_h, \quad (6.4)$$

$$\sum_{h=1}^{h=H} \omega_h = 1, \quad (6.5)$$

$$u_h = \frac{N_h}{\sum_{h=1}^{h=H} N_h}, \quad (6.6)$$

$$F_h = \left[\frac{F_{Sh} + F_{Ah}}{2} \right] \cdot \omega_h \cdot u_h. \quad (6.7)$$

Autor monografii proponuje trzy podejścia do skonstruowania funkcji oceny elementu infrastruktury. Podejścia te różnią się złożonością oraz wpływem liczebności grup użytkowników na wynik oceny. W pierwszym, matematycznie najprostszym podejściu funkcja oceny (wyróżniana teraz jako F_1) jest sumą ważoną funkcji cząstkowych i przyjmuje postać (6.2) z uwzględnieniem funkcji oceny w poszczególnych grupach według (6.7). Podejście to preferuje grupy użytkowników o większych wagach – dominujące (czyli np. bardziej liczne). Ich ocena ma wyraźny wpływ na ocenę łączną. Grupy użytkowników z mniejszymi wartościami wag mają mniejszy wpływ na ocenę łączną. Jest to korzystne w pewnych sytuacjach, na przykład nadania priorytetu dla określonych użytkowników. Jednak przy braku jasno określonej potrzeby priorytetu, niepotrzebnie (zbyt drastycznie) szykanowane są grupy z mniejszymi wartościami wag (niedominujące).

W celu uniknięcia opisanych wyżej niekorzystnych efektów konstruowane są inne postacie funkcji oceny elementu infrastruktury. Dwa kolejne podejścia charakteryzują zróżnicowane uśrednianie ocen cząstkowych. Ostateczna funkcja oceny odnosi się do tych średnich. Formuły (6.8) i (6.9) opisują funkcje oceny F_2 i F_3 obrazujące to podejście:

$$F_2 = F_1 \cdot \left[1 - \sum_{h=1}^{h=H} (F_h - \bar{F})^2 \right], \quad (6.8)$$

$$F_3 = F_1 \cdot \left[1 - \sum_{h=1}^{h=H} |F_h - \bar{F}| \right]. \quad (6.9)$$

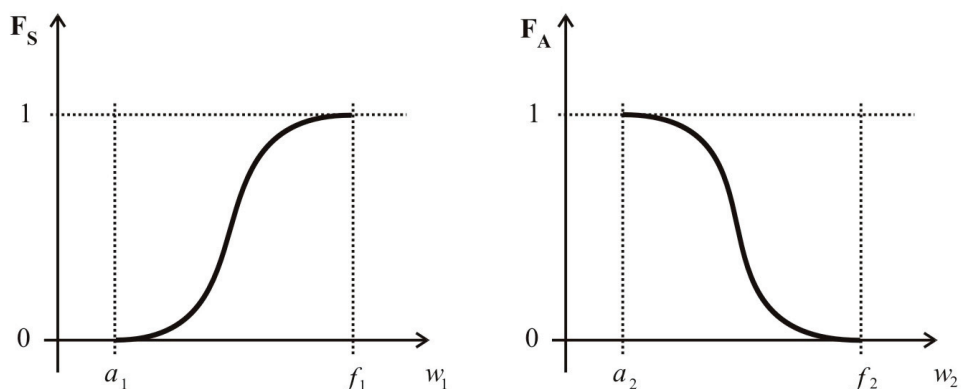
Nieznaczną różnicą pomiędzy tymi funkcjami odzwierciedla stopień znaczenia uśredniania. W funkcji F_2 zastosowano kwadrat różnicy wartości średniej z funkcji cząstkowych i poszczególnych tych funkcji. W funkcji F_3 zamiast kwadratu operuje się wartością bezwzględną wyżej opisaną różnicą. Podejście z wartością bezwzględną silniej uśrednia wyniki. Oznacza to mniejsze znaczenie grup dominujących i podnoszenie znaczenia niedominujących grup. Podejście opisywane funkcją F_3 jest więc skrajne względem podejścia opisywanego funkcją F_1 . Natomiast podejście opisywane funkcją F_2 jest pośrednie względem wyżej wymienionych. Należy nadmienić, że ocena tego samego elementu infrastruktury (z identycznym zestawem cząstkowych funkcji oceny), ale przy zastosowaniu innej funkcji oceny (F_1 , F_2 lub F_3), prowadzi do odmiennych wyników.

6.5. Wskazanie elementu infrastruktury o najwyższej ocenie

Metoda oceny elementu infrastruktury wykorzystywana jest do: scharakteryzowania istniejącego elementu o konkretnych wartościach wielkości go opisujących, porównania konkretnych wariantów ze zróżnicowanymi wartościami tych wielkości, poszukiwania takiego zbioru wartości wielkości, dla którego uzyska się najwyższą ocenę. Ten ostatni aspekt zastosowania metody oznacza wskazanie elementu infrastruktury opisanego przez zbiór wartości charakteryzujących go wielkości zgodnie z zapisem modelu. W szczególności oznacza zatem odpowiednie ukształtowanie elementu infrastruktury stosownie do ocen użytkowników oraz innych składników metody oceny. Ukształtowanie elementu oznacza tu geometrię, sterowanie ruchem i inne aspekty modelu.

Poszukiwanie elementu infrastruktury o najwyższej ocenie użytkowników (najwyższej wartości funkcji oceny) formułuje się w tej sytuacji jako zadanie optymalizacyjne. Zestaw wielkości, w wyniku zastosowania którego otrzymuje się najwyższą wartość funkcji oceny, będzie rozwiązaniem optymalnym. Funkcja oceny oznacza funkcję celu, zmienne występujące w tej funkcji – zmienne decyzyjne, a uwarunkowania narzucone na zmienne – warunki ograniczające. W zadaniu optymalizacyjnym, niezależnie od przyjęcia jednej z trzech proponowanych postaci funkcji oceny, poszukuje się maksimum funkcji celu w przestrzeni rozwiązań opisanych zmiennymi decyzyjnymi w_n . Do rozwiązania zadania optymalizacyjnego i zarazem wskazania elementu infrastruktury o najwyższej ocenie wykorzystuje się narzędzia analityczne lub heurystyczne.

Rozwiązanie analityczne zadania polega na znalezieniu ekstremum (maksimum) funkcji celu poprzez sprawdzenie wartości drugich cząstkowych pochodnych tej funkcji w punktach (miejscach o określonych wartościach zmiennych decyzyjnych) zerowania się pierwszych pochodnych funkcji celu. Mimo stosunkowo prostej postaci funkcji celu (składa się ona z cząstkowych funkcji o jednej zmiennej) już w przypadku liczby zmiennych większej od dwóch trudno jest znaleźć ściśle rozwiązanie analityczne. Problematyka ta pokazana jest na prostym przykładzie funkcji celu o dwóch zmiennych decyzyjnych, której składnikami są: jedna funkcja typu F_S i jedna funkcja typu F_A . Przyjęto nieliniowy opis tych funkcji, pierwszą formę funkcji oceny (F_1) oraz brak wag. Założono także brak odcinków funkcji o wartościach 0 lub 1 (co oznacza równość parametrów $a = d$ i $e = f$ dla funkcji typu F_S oraz $a = b$ i $c = f$ dla funkcji typu F_A). Wykresy funkcji cząstkowych pokazano na rysunku 6.1.



Rys. 6.1. Wykresy funkcji cząstkowych dla analizowanego przykładu

Funkcja oceny zgodnie z definicjami (3.16) i (3.18) oraz (6.1) opisana jest przez formułę (6.10):

$$F = \frac{0,5 \sin \left[\frac{\pi}{f_1 - a_1} \left(w_1 - \frac{a_1 + f_1}{2} \right) \right] + 0,5 + 0,5 \cos \left[\frac{\pi}{f_2 - a_2} (w_2 - a_2) \right] + 0,5}{2}. \quad (6.10)$$

W rozwiązaniu analitycznym obliczane są dwie pierwsze pochodne cząstkowe funkcji F , względem zmiennych: w_1 oraz w_2 oraz trzy drugie pochodne cząstkowe tej funkcji, dwukrotnie względem zmiennej w_1 , dwukrotnie względem zmiennej w_2 oraz raz względem obu zmiennych. Pochodne te są wyrażone formułami: (6.11)–(6.15). Warunkiem koniecznym występowania ekstremum funkcji dwóch zmiennych jest zerowanie pierwszych pochodnych cząstkowych. Punkty oznaczające wartości zmiennych decyzyjnych w_1 , w_2 , dla których pierwsze pochodne cząstkowe przyjmują warto-

ści równe zero, są potencjalnymi ekstremami funkcji. Warunek wystarczający występowania ekstremum przedstawia formuła (6.16). Przy czym aby wystąpiło maksimum, druga pochodna cząstkowa liczona dwukrotnie względem jednej bądź drugiej zmiennej musi być ujemna.

$$\frac{\partial F}{\partial w_1} = 0,25 \frac{\pi}{f_1 - a_1} \cos \left[\frac{\pi}{f_1 - a_1} \left(w_1 - \frac{a_1 + f_1}{2} \right) \right], \quad (6.11)$$

$$\frac{\partial F}{\partial w_2} = -0,25 \frac{\pi}{f_2 - a_2} \sin \left[\frac{\pi}{f_2 - a_2} (w_2 - a_2) \right], \quad (6.12)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial w_1^2} = -0,25 \left(\frac{\pi}{f_1 - a_1} \right)^2 \sin \left[\frac{\pi}{f_1 - a_1} \left(w_1 - \frac{a_1 + f_1}{2} \right) \right], \quad (6.13)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial w_2^2} = -0,25 \left(\frac{\pi}{f_2 - a_2} \right)^2 \cos \left[\frac{\pi}{f_2 - a_2} (w_1 - a_2) \right], \quad (6.14)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial w_1 \partial w_2} = 0, \quad (6.15)$$

$$W = \frac{\partial^2 F}{\partial w_1^2} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial w_2^2} - \left[\frac{\partial^2 F}{\partial w_1 \partial w_2} \right]^2 > 0. \quad (6.16)$$

W analizowanym tu przykładzie warunek wystarczający dla występowania ekstremum upraszcza się do postaci (6.17):

$$W = \frac{\partial^2 F}{\partial w_1^2} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial w_2^2} > 0. \quad (6.17)$$

Znalezienie maksimum funkcji oceny sprowadza się więc do przyrównania pierwszych pochodnych do zera i obliczeniu z układu równań wartości współrzędnych (w_1 , w_2). Następnie dla tych wartości należy obliczyć wielkość W stosując formułę (6.17). Jeżeli dla któregoś z punktów (w_1 , w_2) wielkość W będzie dodatnia i wartość drugiej pochodnej w tym punkcie będzie ujemna, to w tym punkcie wystąpi maksimum funkcji oceny. Jeżeli wielkość W jest ujemna, to nie występuje ekstremum funkcji oceny (w badanym punkcie). Jeżeli wielkość ta jest równa zero, to występuje przypadek wątpliwy wymagający dodatkowych badań.

Element infrastruktury opisywany jest zazwyczaj przez większą od dwóch liczb zmiennych, co powoduje trudności w znalezieniu rozwiązania o najwyższej ocenie metodami analitycznymi. W takiej sytuacji wykorzystywane są narzędzia heurystycz-

ne, a w niniejszej metodzie, algorytmy genetyczne. Z uwagi na specyficzną terminologię stosowaną w algorytmach genetycznych dokonano przypisania składników metody oceny oraz modelu opisu elementu infrastruktury do pojęć wykorzystywanych w algorytmie genetycznym. Konkretna wartość danej zmiennej cząstkowej funkcji oceny nazywana jest chromosomem. Zbiór konkretnych wartości wszystkich zmiennych wykorzystywanych w opisie danego elementu infrastruktury to osobnik – zbiór chromosomów. Zbiorów takich jest tyle, ile kombinacji poszczególnych wartości zmiennych, co zależy od zakresu zmienności poszczególnej zmiennej. W algorytmie genetycznym uwzględnia się zestaw określonej liczby zbiorów i nazywa populacją, czyli zestawem osobników. Dla konkretnego zestawu zbiorów wartości wielkości cząstkowej oceny elementu infrastruktury, czyli dla konkretnej populacji, oblicza się wartość funkcji oceny nazywanej w algorytmie funkcją przystosowania. Specyficznymi procedurami modyfikuje się skład populacji i dąży do uzyskania takiej populacji, dla której przystosowanie będzie największe, a w toku kolejnych modyfikacji nie będzie już rosło. Populacja taka jest zestawem zbiorów wartości wielkości oceny elementu infrastruktury oznaczającym najwyżej oceniane ukształtowanie tego elementu. Procedury modyfikujące populację to: selekcja, krzyżowanie i mutacja.

Wobec specyfiki zadań oceny elementów infrastruktury opracowano autorskie modyfikacje klasycznego algorytmu genetycznego (GA) opisywanego między innymi w [85], [217], [221]. Podstawowe różnice pomiędzy klasycznym GA a algorytmem zastosowanym w niniejszej pracy to: wartości zmiennych wyrażone są w systemie dziesiętnym, a nie w binarnym, selekcja oparta jest na specyficznym zasadzie likwidacji osobników o najniższym przystosowaniu i duplikowaniu osobników o najwyższym przystosowaniu, krzyżowanie wykonuje się w oparciu o specyficzne wzorce, przy czym z tej procedury wyłącza się osobnika o najwyższym przystosowaniu, mutacja dotyczy osobnika o najniższym przystosowaniu zamiast losowo wybranego. Różnice te, opisane szczegółowo w [163], mają w sposób szybki i niezawodny doprowadzić do wskazania populacji o najwyższym przystosowaniu.

Autorski algorytm genetyczny specyficzny w ocenie elementów infrastruktury drogowej określany jest dalej w skrócie jako GAFRO (od angielskiej nazwy: *Genetic Algorithm For Road Optimisation*). Rezygnacja z zapisu binarnego pozwala uprościć obliczenia, łatwiej interpretować ich wyniki i przede wszystkim specyficznie krzyżować osobniki w populacji, co ma wpływ na szybkość i pewność działania algorytmu.

Populacja liczy N_S osobników o losowo wygenerowanych wartościach zmiennych. Osobnik składa się z $2H$ zmiennych, a każda zmienna przyjmuje Ψ_h różnych wartości. Wszystkich osobników różniących się wartościami przynajmniej jednej zmiennej jest tyle, ile wynosi iloczyn liczebności poszczególnych zmiennych. Liczbę różnych osobników oznacza się jako χ , a wyraża formułą (6.18). Populacja startowa algorytmu powinna być dość liczna, tak aby reprezentowane w niej były wszystkie możliwe wartości poszczególnych zmiennych. Ponieważ populację startową ustala się losując wartości poszczególnych zmiennych, dobrze jest aby liczba jej osobników była większa od

liczebności najbardziej zróżnicowanej zmiennej. W praktyce wystarczy podwojenie tej liczby. Liczbę osobników w populacji startowej oznacza się przez N_S i oblicza według (6.19). Przez Ψ_{\max} oznaczono liczebność najbardziej licznej zmiennej.

$$\chi = \prod_{h=1}^{h=2H} \Psi_h, \quad (6.18)$$

$$N_S = 2 \cdot \Psi_{\max}. \quad (6.19)$$

Podstawą dalszych kroków jest obliczenie przystosowania poszczególnych osobników (oraz całej populacji). Przystosowanie liczy się wykorzystując funkcje oceny według postaci podanych w rozdziale 6.4. Populacja startowa jest pierwszym pokoleniem algorytmu. W wyniku procedur: selekcji, krzyżowania i mutacji powstaje kolejne pokolenie. Selekcja polega na zlikwidowaniu określonej liczby najgorszych osobników (o najniższym przystosowaniu) i duplikacji (podwojeniu) takiej samej liczby osobników najlepszych (o najwyższym przystosowaniu). Kolejne pokolenie jest więc tak samo liczne jak poprzednie. Liczba osobników likwidowanych i duplikowanych zależy od liczebności populacji. Autor przyjmuje te liczby po około 5% N_S . Przy bardziej licznych populacjach procent ten może być mniejszy. Liczbowo likwidowanych i duplikowanych osobników powinno być co najmniej po trzech.

Krzyżowanie odbywa się pomiędzy prawie wszystkimi osobnikami spośród pozostałych po selekcji. Tworzy się $(N_S - 2)/2$ par. Pozostałe dwa osobniki: najlepszy i najgorszy nie biorą udziału w krzyżowaniu. Pary dobierane są losowo. Nie stosuje się punktu krzyżowania, a określa się specyficzne wzorce krzyżowania, które oznaczają wymianę poszczególnych chromosomów pomiędzy osobnikami w parze. Wymianie ulegają pojedyncze chromosomy, po dwa lub po trzy i tak dalej aż do wymiany $n - 1$ chromosomów. Wybór wzorca krzyżowania dla każdej pary jest losowy. Określa się prawdopodobieństwo zaistnienia poszczególnego wzorca i tym preferuje wymianę większej liczby chromosomów. Zastosowana tu metoda pozwala wymieniać wartości pomiędzy tymi samymi zmiennymi, a nie na krzyż – pomiędzy różnymi zmiennymi. Jest to ważne, ponieważ zmienne mają często odmienny charakter. Wymiana pomiędzy zmiennymi o różnym charakterze prowadziłaby do obniżenia przystosowania osobników i populacji.

Najgorszy osobnik z populacji nie bierze udziału w krzyżowaniu, a podlega mutacji. W toku mutacji zmienia się wartość jednego z chromosomów. Numer zmiennej oraz nowa wartość określane są losowo. Ponieważ operacja ta dotyczy najgorszego osobnika, osobnik po mutacji ma zazwyczaj wyższe przystosowanie, co wpływa korzystnie na przystosowanie całej populacji. Najlepszy osobnik z populacji także nie bierze udziału w krzyżowaniu. W ogóle się nie zmienia. Zasada ta pozwala na zachowanie wszystkich chromosomów. Osobnik taki ma niezmienny zestaw chromosomów dopóki nie pojawi się inny osobnik o wyższym przystosowaniu. Prowadzi to do dominacji osobników o najwyższym przystosowaniu w populacji.

Populacja powstała po zastosowaniu wyżej opisanych procedur podlega kolejnemu cyklowi zmian. Procedura kończy się gdy przystosowanie wszystkich osobników nie zmienia się w istotny sposób (nie przyrasta). Wystąpi to wtedy, gdy dalsze krzyżowanie osobników nie przynosi już żadnych efektów. W takiej sytuacji zazwyczaj wszystkie osobniki w populacji mają ten sam zestaw chromosomów. W tej końcowej populacji znajdują się osobniki o najwyższym możliwym przystosowaniu.

Osobniki o najwyższym przystosowaniu oznaczają zbiór wartości wielkości występujących w funkcji oceny, dla których funkcja oceny przyjmuje najwyższą wartość. Opisują zatem konfigurację elementu infrastruktury o najwyższej ocenie.

7. Przykład zastosowania metody

7.1. Opis analizowanego elementu infrastruktury drogowej

Analizie podlega węzeł w postaci skrzyżowania czterowłotowego według schematu jak na rysunku 4.7 (rozdział 4.5). Dla takiego elementu infrastruktury formułowane są specyficzne problemy (zadania) oraz dokonywana jest ocena ich rozwiązań. Przez skrzyżowanie przeprowadzone są linie tramwajowe na wydzielonym torowisku oraz autobusowe na wspólnych pasach z ruchem ogólnym. Przewidziano przejścia dla pieszych na wszystkich wlotach oraz przejazdy dla rowerzystów. Wyróżnia się następujące grupy użytkowników: według środka lokomocji – P, B, TT, TB, V oraz według trasy podróży – wszystkie dopuszczone relacje. W zależności od specyfiki rozważanego problemu wyróżnia się różne liczby grup użytkowników. Opisu każdej trasy dokonuje się wykorzystując układ współrzędnych w przestrzeni dwuwymiarowej (x, y) .

Ocenę przedmiotowego elementu infrastruktury i jego części wykonuje się na podstawie zestawu wielkości dobranej stosownie do specyfiki problemu. Wybranymi problemami są:

- dobór i podział długości sygnałów zielonych pomiędzy poszczególne grupy użytkowników,
- przeznaczenie pasów ruchu na wlotach skrzyżowania, w tym dobór szerokości pasów ruchu,
- dobór kolejności faz i parametrów zmian cyklu sygnalizacyjnego w sygnalizacjach dostosowujących się do zmian ruchu użytkowników.

W celu pogłębienia analiz testowano wpływ trzech składników metody na uzyskiwane rozwiązania. Pokazano w ten sposób zasady uwzględniania wpływu:

- znaczenia liczebności grup użytkowników poprzez wybór postaci funkcji oceny,
- zewnętrznych priorytetów dla poszczególnych grup, określanych na przykład przez zarządzającego systemem transportu, poprzez wprowadzenie wag,
- preferencji użytkowników z poszczególnych grup, czyli uwarunkowań lokalnych, wyrażonych wartościami parametrów funkcji oceny.

Ocena elementu polega na obliczeniu wartości funkcji oceny z uwzględnieniem ocen cząstkowych wyrażonych wartościami funkcji satysfakcji i akceptacji oraz wag. Jako zmienne cząstkowych funkcji oceny wykorzystuje się identyfikowane wcześniej wielkości, dobierane stosownie do specyfiki konkretnego problemu.

Zasób elementu infrastruktury oraz cząstkowe funkcje oceny przy podziale dostępnego sygnału zielonego formułuje się za pomocą zależności (7.1)–(7.3),

$$G = \sum_{h=1}^{h=H} G_h, \quad (7.1)$$

$$F_S = f(G), \quad (7.2)$$

$$F_A = f(D), \quad (7.3)$$

gdzie:

G – łączny sygnał zielony,

G_h – sygnały przydzielane poszczególnym grupom użytkowników (h).

Dla funkcji satysfakcji i akceptacji jako zmienne przyjęto: długość sygnału i straty czasu. Straty czasu są wielkością zależną od długości sygnałów oraz od natężenia ruchu. Wykorzystuje się także bardziej złożone wielkości, jakimi są ekwiwalenty oceny. Wyżej wymienione wielkości wykorzystywane są w problemach: sterowania w sygnalizacji czterofazowej (w rozdziałach 7.3 i 7.5) oraz podziału sygnału pomiędzy pieszych a pojazdy (w rozdziale 7.4).

Podstawowe uwarunkowania przy podziale dostępnej przestrzeni elementu infrastruktury formułuje się za pomocą zależności (7.4)–(7.6),

$$s = \sum_{h=1}^{h=H} s_h, \quad (7.4)$$

$$F_S = f(s), \quad (7.5)$$

$$F_A = f(X), \quad (7.6)$$

gdzie:

s – całkowita szerokość jako przestrzeń elementu infrastruktury,

s_h – części tej przestrzeni przydzielane poszczególnym grupom użytkowników (h).

Formuła (7.4) określa limit dostępnego zasobu (w tym przypadku szerokości pasa drogowego), a wzory: (7.5) i (7.6) ogólnie formułują funkcje satysfakcji i akceptacji, gdzie jako zmienne przyjęto: szerokość pasa drogowego i stopień wykorzystania przepustowości. Stopień wykorzystania przepustowości jest wielkością zależną od szerokości pasa drogowego oraz od natężenia ruchu. Jako zmienne w cząstkowych funkcjach oceny wykorzystywane są także ekwiwalenty oceny. Rozważane są dwa

problemy: doboru elementów przekroju poprzecznego dla poszczególnych grup użytkowników oraz przydziału pasów ruchu dla poszczególnych relacji (oba w rozdziale 7.5).

Zastosowanie autorskiej metody oceny elementów infrastruktury drogowej do problemów związanych z sygnalizacjami dostosowującymi swoją pracę do zmian ruchu wykorzystuje jako podstawową zmienną dopuszczalne wydłużenie poszczególnych sygnałów g_h . Suma tych wydłużeń rozdzielana pomiędzy poszczególne fazy ruchu bądź grupy sygnałowe użytkowników jest w takim przypadku zasobem elementu infrastruktury, co określa formuła (7.7). Wydłużenie sygnałów g jest zmienną dla funkcji satysfakcji (7.8), a straty czasu D zmienną dla funkcji akceptacji (7.9). Specyficznie, w jednym z zadań pokazana zostanie także możliwość skonstruowania zmiennej pozytywnej dla funkcji satysfakcji konkretnej grupy użytkowników jako sumy zmiennych negatywnych grup opozycyjnych. Analizy prowadzone są na przykładzie dwóch charakterystycznych problemów: wydłużania i skracania faz (w rozdziale 7.4) oraz zamiany kolejności faz (w rozdziale 7.5).

$$g = \sum_{h=1}^{h=H} g_h, \quad (7.7)$$

$$F_S = f(g), \quad (7.8)$$

$$F_A = f(D). \quad (7.9)$$

Zbudowano zestawy wielkości bazujące na porównywalnych jednostkach dla użytkowników poruszających się różnymi środkami lokomocji. Zagadnienia te wprowadzono w publikacji [159] oraz w kilku podobnych [158], [164]. Konsekwencją założenia unifikacji wielkości jest między innymi odejście od analiz pasów ruchu, a przeliczanie na jednostkę długości lub powierzchni. Wielkości dotyczą jednolitych przedziałów czasowych – najczęściej jednej godziny. Dla takiego przedziału zarezerwowano pojęcie natężenia ruchu przewidując możliwość używania dłuższych lub krótszych przedziałów czasowych z określeniem ich w nazwie wielkości, np. liczba pieszych w kwadransie. Przykładowy zestaw wielkości, odpowiadających im jednostek oraz charakterystycznych wartości dla użytkowników podróżujących pieszo oraz w samochodach osobowych zamieszczono w tabeli 7.1. Indeksy przy wielkościach oznaczają: h – grupę użytkowników, t – przedział czasowy jakiego dotyczy dana wielkość.

Do obliczenia konkretnych wartości w tabeli 7.1 przyjęto następujące założenia: liczby użytkowników to wartości przykładowe zarejestrowane dla okresu 15 minut (przy napelnieniu samochodu = 1,2 osoby zarejestrowano 75 pojazdów), natężenie ruchu pojazdów = 300 P/h, natężenie nasycenia obliczono według [100] oraz przy założeniu szerokości pasa ruchu $3,5 \text{ m} = 2280 \text{ u/h/pas}$ oraz 1900 P/h/pas , szerokości chodnika przyjęto 1,5 m, prędkości przyjęto jako wartości przykładowe dla ruchu

miejskiego, a gęstość ruchu obliczono z zależności $k = Q/v$ (fundamentalne równanie ruchu).

Tabela 7.1. Proponowane zunifikowane wielkości, jednostki oraz charakterystyczne wartości

Wielkość		Jednostki i charakterystyczne (ekstremalne lub przykładowe) wartości	
symbol	nazwa	dla pieszych	dla podróżujących w pojazdach (samochody osobowe)
$N_{h,t}$	liczba użytkowników	$N_{p,15min} = 90$ u	$N_{v,15min} = 90$ u
Q_h	natężenie ruchu	$Q_p = 360$ u/h	$Q_v = 360$ u/h
Sm_h	natężenie nasycenia na metr (pasa ruchu)	$Sm_p = 4500$ u/h	$Sm_v = 651$ u/h
CT_h	przepustowość elementu infrastruktury	$CT_p = 6750$ u/h	$CT_v = 2280$ u/h
XT_h	stopień wykorzystania przepustowości	$XT_p = 0,053$ [-]	$XT_v = 0,158$ [-]
$v_{h,t}$	prędkość	$v_{p,1h} = 1,4$ m/s	$v_{v,1h} = 13,9$ m/s
$k_{h,t}$	gęstość	$k_{p,1h} = 0,048$ u/m ²	$k_{v,1h} = 0,002$ u/m ²
$kmax_{h,t}$	gęstość maksymalna	$kmax_{p,1h} = 1,333$ u/m ²	$kmax_{v,1h} = 0,046$ u/m ²
$k/kmax$	udział gęstości w gęstości maksymalnej	0,036 [-]	0,043 [-]

Dla przykładowych strumieni ruchu cechujących się identyczną liczbą użytkowników pieszych oraz podróżujących w pojazdach po pojedynczych pasach ruchu (dla pieszych jest to chodnik o minimalnej szerokości 1,5 m, a dla pojazdów pas o szerokości 3,5 m) wyliczono wskaźniki charakteryzujące stopień wykorzystania przepustowości ($XT_{h,t}$) oraz udział faktycznej gęstości ruchu do gęstości maksymalnej ($k/kmax$) wyrażone w takich samych jednostkach – zatem porównywalne. Jak widać, przemieszczanie się takich użytkowników pieszo cechują niższe: stopień wykorzystania przepustowości oraz udział gęstości względem podróży samochodem, co oznacza potencjalnie lepsze warunki ruchu oraz wyższą ocenę elementu infrastruktury. Dla uzyskania takich warunków ruch pieszy wymaga mniej przestrzeni (mniejsza szerokość pasa ruchu), ale także odbywa się z mniejszą prędkością.

7.2. Ocena elementu infrastruktury według dotychczasowych metod

Metody oceny warunków ruchu stosowane oficjalnie w Polsce pozwalają dla prezentowanego tu węzła (w formie skrzyżowania czterowłotowego) określić PSR na

podstawie strat czasu dla użytkowników poruszających się w pojazdach (dla pojazdów ruchu ogólnego). Straty czasu w ruchu pojazdów wyznacza się w oparciu o stosowane w Polsce metody zawarte w instrukcjach [190]–[192]. W poniższych obliczeniach zastosowano prezentowane już wcześniej (rozdział 5) wzory (5.10) i (5.11) zaczerpnięte z tych instrukcji po dostosowaniu oznaczeń do konwencji niniejszej monografii. Wzór (5.10) przekształca się do formuły uwzględniającej: rodzaj sterowania (r_s) i obecność sąsiednich skrzyżowań z sygnalizacją świetlną (w_s):

$$D = 0,5 \cdot (G + R) \cdot \frac{(1 - \lambda)^2}{1 - X \cdot \lambda} + 900 \cdot \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{7 \cdot r_s \cdot w_s \cdot X^2}{C}} \right]. \quad (7.10)$$

Uzyskując wartości strat czasu mniejsze lub równe 20 s, warunki ruchu kwalifikuje się jako bardzo dobre (PSR I). Straty czasu z przedziału 20–45 s to warunki dobre (PSR II), 45–80 s, przeciętne (PSR III), a powyżej 80 s, niekorzystne (PSR IV). Stosując terminologię niniejszej monografii utożsamia się warunki bardzo dobre z wysoką oceną elementu infrastruktury przez użytkowników podróżujących w pojazdach (ruchu ogólnego), a kolejne PSR przypisuje do niższych poziomów oceny. Wielkości wpływające na wartości strat czasu modyfikowane są w taki sposób, aby uzyskać jak najwyższy PSR, a tym samym najwyższą ocenę użytkowników (z tym że zawężonych do podróżujących pojazdami osobowymi). Dla podróżujących w pojazdach transportu zbiorowego oblicza się straty czasu, ale bez uwzględniania ich liczebności (napelnienia pojazdów). Cytowana metoda nie uwzględnia także postojów (składowej strat czasu) na przystanku, często nadmiernie długich (przekraczających czas wymiany pasażerów), zwolnień, przyspieszeń w ruchu, oczekiwania na wyjazd z zatoki, czy czasu przejazdu przez zwrótnice (przy mniejszej prędkości). W efekcie uzyskuje się zatem wartości strat czasu niemiernodajne wobec oceny użytkownika.

W korelacji do rozpatrywanych dalej zadań w niniejszym przykładzie obliczeniowym przyjęto: długość cyklu $G + R = 80$ s, długości poszczególnych faz G_h z przedziału 8–25 s (przyjęto od razu jako długość efektywną, G_{he}), natężenia ruchu pojazdów N_h z przedziału od 100 do 300 P/h. Założono także możliwość zmian (modyfikacji) szerokości pasów ruchu w zakresie 2,5–3,5 m.

Do obliczenia strat czasu oprócz określenia wielkości związanych z pracą sygnalizacji świetlnej konieczne jest wyznaczenie przepustowości (wlotu, pasa, relacji). Przepustowość zaś zależy od natężenia nasycenia (por. wzór 5.1). Procedura wyznaczania natężeń nasycenia jest dosyć złożona. Stosuje się zróżnicowane formuły w zależności od przeznaczenia pasa ruchu oraz szczegółów sterowania sygnalizacją. Najogólniej wartości natężeń nasycenia zależą od wielkości związanych zarówno z geometrią elementu infrastruktury, jak i ze sterowaniem ruchem. Przykładowa formuła (7.11) pozwala wyznaczyć natężenie nasycenia dla pasa ruchu

w relacji na wprost, S_W [192] (z zastosowaniem oznaczeń używanych w niniejszej monografii):

$$S_W = [S_0 + 200 \cdot (s - 3,5) - 30 \cdot \delta \cdot i] \cdot \frac{1}{1 + u_C}, \quad (7.11)$$

gdzie:

S_0 – wyjściowe natężenie nasycenia, gdy relacja na wprost korzysta sama z pasa lub wspólnie z inną relacją bezkolizyjną = 1900 P/h, gdy zaś relacja na wprost korzysta ze wspólnego pasa z relacją skrętną o kolizyjnym przebiegu w danej fazie sygnalizacji = 1700 P/h,

s – szerokość pasa ruchu [m],

i – średnie pochylenie wlotu na odcinku ustawiania się kolejki pojazdów [%],

δ_i – wskaźnik kierunku pochylenia, = 1 dla wlotu położonego na wzniesieniu, = 0 dla wlotu położonego na spadku,

u_C – udział pojazdów ciężkich w ruchu.

Przy założeniu ruchu jedynie na wprost ($S_0 = 1900$ P/h), braku pochylenia podłużnego wlotu i braku pojazdów ciężkich uzyskuje się następujące wartości natężeń nasycenia, S_W : 1700 P/h przy szerokości pasa ruchu = 2,5 m, 1800 P/h przy szerokości pasa ruchu = 3,0 m i 1900 P/h przy szerokości pasa ruchu = 3,5 m.

Wartości przepustowości, stopnia jej wykorzystania oraz strat czasu, przy założeniu zróżnicowanych wartości długości sygnału zielonego i liczby pojazdów zestawiono w tabelach 7.2–7.4. Obliczenia wykonano przy założeniu funkcjonowania sygnalizacji stałoczasowej oraz braku wpływu sąsiednich skrzyżowań. Wyróżniono przypadki w których występuje niewystarczająca przepustowość (jest PSR IV, ale przy niedopuszczalnym standardzie obsługi) poprzez zacieniowanie odpowiednich pól.

Tabela 7.2. Wyniki obliczeń dla pojazdów i natężenia nasycenia 1700 P/h

$S_W = 1700$ P/h						
G_{he} [s]	N_h [P/h]	C [P/h]	X	λ	D [s]	PSR
8	100	170	0,588	0,100	42,1	II
16	100	340	0,294	0,200	27,8	II
25	100	531	0,188	0,313	20,2	II
8	200	170	1,176	0,100	415,3	IV
16	200	340	0,588	0,200	32,9	II
25	200	531	0,376	0,313	22,1	II
8	300	170	1,765	0,100	1452,6	IV
16	300	340	0,882	0,200	58,3	III
25	300	531	0,565	0,313	25,1	II

Tabela 7.3. Wyniki obliczeń dla pojazdów i natężenia nasycenia 1800 P/h

$S_W = 1800 \text{ P/h}$						
G_{he} [s]	N_h [P/h]	C [P/h]	X	λ	D [s]	PSR
8	100	180	0,556	0,100	40,3	II
16	100	360	0,278	0,200	27,6	II
25	100	563	0,178	0,313	20,1	II
8	200	180	1,111	0,100	308,0	IV
16	200	360	0,556	0,200	31,8	II
25	200	563	0,356	0,313	21,8	II
8	300	180	1,667	0,100	1274,3	IV
16	300	360	0,833	0,200	48,0	III
25	300	563	0,533	0,313	24,4	II

Zastosowane wyżej metody oceny warunków ruchu pozwalają wyznaczyć PSR dla podróżujących w pojazdach na podstawie średnich strat czasu oraz wielkości charakteryzujących oceniany element infrastruktury (w tym przypadku wlot skrzyżowania). Prezentowany przykład pokazuje, że w zależności od przydzielonej długości sygnału zielonego oraz natężenia ruchu pojazdów występują krańcowo różne PSR. Pozwala to ocenić aktualne lub projektowane warunki ruchu, a także odpowiednio dobrać wielkości charakteryzujące element infrastruktury (na przykład szerokość pasa ruchu). Testowany przykład pokazuje, że przy dużych natężeniach ruchu PSR będzie niekorzystny niezależnie od przydzielanej długości sygnału zielonego i dobieranej szerokości pasa ruchu. W celu poprawy PSR konieczne byłoby zwiększenie liczby pasów ruchu lub działania zmierzające do ograniczenia natężeń.

Tabela 7.4. Wyniki obliczeń dla pojazdów i natężenia nasycenia 1900 P/h

$S_W = 1900 \text{ P/h}$						
G_{he} [s]	N_h [P/h]	C [P/h]	X	λ	D [s]	PSR
8	100	190	0,526	0,100	39,0	II
16	100	380	0,263	0,200	27,4	II
25	100	594	0,168	0,313	20,0	I
8	200	190	1,053	0,100	220,6	IV
16	200	380	0,526	0,200	31,0	II
25	200	594	0,337	0,313	21,6	II
8	300	190	1,579	0,100	1115,1	IV
16	300	380	0,789	0,200	42,3	II
25	300	594	0,505	0,313	23,8	II

Metody obowiązujące w Polsce nie pozwalają na wyznaczenie warunków ruchu pieszych. Wykonuje się to zatem z wykorzystaniem HCM [100], gdzie PSR (LOS) jest uzależniony od strat czasu wyznaczanych według formuły (7.12):

$$D_p = 0,5 \cdot \frac{R_p^2}{G_p + R_p} \quad (7.12)$$

Jest to klasyczna formuła według modelu Pretty'ego [233] zakładająca równomierny dopływ pieszych w czasie cyklu bez uwzględniania liczebności pieszych. W literaturze [162] spotyka się także inne formuły na wyznaczanie strat czasu pieszych oczekujących na sygnał zielony (w tym z uwzględnieniem liczebności, na przykład według wzoru 5.13 przytoczonego już w niniejszej monografii). Zasady identyfikacji PSR (LOS) podano w tabeli 4.2 (rozdział 4) z uwzględnieniem 6 poziomów oceny.

Przyjmując podobne założenia jak wyżej obliczono straty czasu pieszych dla kilku charakterystycznych wartości wielkości wpływających na wysokość strat czasu. Dodatkowo wykorzystano wzór (5.13) uwzględniający liczebność pieszych (przy założeniu że w trakcie sygnału czerwonego do przejścia dochodzi o 20% mniej pieszych niż wynikałoby z założenia dopływu równomiernego). Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 7.5.

Tabela 7.5. Wyniki obliczeń dla użytkowników pieszych

G	R	N	N_R	D (7.12)	LOS	D (5.13)	LOS
8	72	100	72	32,4	D	25,9	C
16	64	100	64	25,6	C	20,5	C
25	55	100	55	18,9	B	15,1	B
8	72	200	144	32,4	D	25,9	C
16	64	200	128	25,6	C	20,5	C
25	55	200	110	18,9	B	15,1	B
8	72	300	216	32,4	D	25,9	C
16	64	300	192	25,6	C	20,5	C
25	55	300	165	18,9	B	15,1	B

W wyniku zastosowania metody HCM [100] uzyskano ocenę elementu infrastruktury (przejścia przez jezdnię na skrzyżowaniu) wyrażoną przez poziom obsługi (LOS). W zależności od przydzielonej długości sygnału zielonego oraz liczby pieszych uzyskuje się lepszą lub gorszą ocenę. Istotne jest, że w zależności od stosowanej formuły warunki ruchu klasyfikowane są do różnych poziomów oceny.

Jak wspomniano już wcześniej, w metodach stosowanych w Polsce nie jest możliwa ocena warunków ruchu z punktu widzenia pieszych. Piesi oraz podróżujący w pojazdach ujmowani są w odrębnych metodach, których wyniki nie mogą być w prosty sposób porównywane z uwagi na różną liczbę klas ocen. Już w artykułach [155] i [158] autor niniejszej monografii wskazał na potrzebę unifikacji obliczeń strat

czasu dla pieszych i pojazdów (podróżujących w pojazdach) w celu wyznaczenia optymalnego podziału sygnału zielonego na przejściu przez jezdnię. Sposób ten nie znalazł dotąd zastosowania w metodach praktycznych.

Przyjęty sposób kwalifikacji do PSR (LOS) bazujący na sztywnych granicach poszczególnych poziomów oznacza, że w ramach tej samej kategorii oceny znaleźć się mogą rozwiązania o dosyć różnym standardzie (na przykład o średnich stratach czasów w wysokości 21 lub 44 s) albo jako różne poziomy kwalifikowane będą zbliżone warunki ruchu (na przykład o średnich stratach czasów w wysokości 19 lub 21 s).

Ocena według powyższych metod sprowadza się do wyliczenia średnich strat czasu (na ich podstawie dokonuje się kwalifikacji do PSR). W ocenie nie uwzględnia się więc: liczebności grup użytkowników, ich indywidualnych (lokalnych) preferencji, w tym wpływu stanu infrastruktury na ocenę oraz charakterystycznego dla percepcji człowieka rozmycia i niepewności ocen. Nie ma także w procesie oceny możliwości uwzględnienia preferencji (priorytetów) dla wybranych grup użytkowników, a szerzej uwzględnienia wpływu zarządzającego systemem transportu na proces oceny elementu infrastruktury.

W kolejnych rozdziałach (7.3–7.5) prezentuje się zastosowanie metody autora do oceny elementów infrastruktury testując wpływ kolejnych jej składników na wynik oceny.

7.3. Testowanie wpływu wyboru postaci funkcji oceny

Trzeci składnik autorskiej metody oceny elementu infrastruktury umożliwia, poprzez dobór postaci funkcji oceny (F_1 , F_2 lub F_3), uwzględnienie w różny sposób wpływu liczebności poszczególnych grup użytkowników. Na bazie analizowanego tu elementu infrastruktury oraz zadania związanego z doбором długości sygnałów w sygnalizacji stałoczasowej testowany jest wpływ tego składnika metody na ocenę elementu infrastruktury oraz pokazane są zasady doboru i modyfikacji wielkości go opisujących.

W problemie sterowania ruchem za pomocą sygnalizacji czterofazowej (por. rozdział 4.3) dla analizowanego elementu infrastruktury buduje się osiem cząstkowych funkcji oceny (po 4 typu F_S i F_A). Jako grupy użytkowników przyjęto ruch pojazdów z poszczególnych wlotów w dowolnym kierunku. Funkcje typu F_S bazują na zmiennych niezależnych, jakimi są długości odpowiednich sygnałów zielonych (G). Funkcje typu F_A wykorzystują zmienne zależne jakimi są straty czasu (D). Opozycja w tym przykładzie wynika z konkurencji o podział łącznego sygnału zielonego. Dłuższy sygnał zielony na określonym wlocie zwiększa poczucie satysfakcji użytkowników konkretnej grupy. Wzrost długości sygnałów zielonych na innych wlotach (w innych fazach) zmniejsza akceptację użytkowników opozycyjnej grupy.

Funkcje typu F_S określa się tu jako satysfakcja z długości przydzielonego sygnału zielonego. Funkcje typu F_A jako akceptacja strat czasu. Jeżeli długość fazy z wlotu (grupy) h oznaczy się jako G_h , to zmienne funkcji typu F_S (zmienne niezależne) opisuje się według (7.13), a zmienne funkcji typu F_A (zmienne zależne) według (7.14), dla $h = 1, 2, 3, 4$.

$$w_h = G_{h_2} \quad (7.13)$$

$$w_{h+4} = D_h. \quad (7.14)$$

Zadanie oceny posiadać będzie zatem 4 niezależne zmienne. Straty czasu użytkownika z grupy h (D_h) obliczane są na podstawie formuły (5.10) opisaną w rozdziale 5.4 oraz zależności: (7.15), (7.16) i (5.11). Wartości strat czasu zależą od długości poszczególnych sygnałów zielonych (G_h), oraz od natężenia ruchu na poszczególnych wlotach wyrażonego poprzez stopień obciążenia XT_h .

$$G + R = G + 20, \quad (7.15)$$

$$C_h = 1600 \cdot \lambda_h. \quad (7.16)$$

Parametry a, f cząstkowych funkcji oceny wynikają z przyjętych ograniczeń na długość sygnału zielonego. Założono takie same ograniczenia dla wszystkich faz. Jako minimum przyjęto 8 s, a jako maksimum 25 s. Wartości te są wartościami parametrów a, f dla funkcji typu F_S . Dla funkcji typu F_A wartości parametrów a, f powstają poprzez pomnożenie powyższych ograniczeń przez 3 (czyli $a = 24, f = 75$). Parametry d, e funkcji F_S przyjęto dzieląc i rozmywając dostępny łączny sygnał zielony (określony wartościami parametrów a, f funkcji F_S). Parametry b, c funkcji F_A przyjęto jako wartości strat czasu charakterystyczne dla PSR II lub III (por. rozdział 4.2). Dokonano arbitralnego zróżnicowania preferencji (wartości parametrów) dla poszczególnych faz. Wyższe wartości parametrów d, e funkcji typu F_S oznaczają większe wymagania użytkowników danego wlotu co do długości sygnału zielonego – wysoka satysfakcja osiągnięta jest dopiero przy dużych wartościach długości sygnału zielonego. Wyższe wartości parametrów b, c funkcji typu F_A oznaczają mniejsze wymagania co do udziału długości sygnału zielonego na danym wlocie, ponieważ akceptowane są większe długości sygnałów dla opozycyjnych wlotów. Rozpatrywane tu wartości parametrów zamieszczono w tabeli 7.6. W nawiasach podano wartości alternatywne dla wlotu 3 – uwzględniane w analizach opisanych w dalszej części rozdziału. Cząstkowe funkcje oceny opisane są formułami: (3.15) lub (3.16) – dla zmiennych w_1-w_4 oraz (3.17) lub (3.18) – dla zmiennych w_5-w_8 .

Do znalezienia rozwiązania o najwyższej ocenie użytkowników wykorzystano autorski algorytm genetyczny GAFRO. Każda z niezależnych zmiennych przyjmuje 18 różnych wartości, ponieważ założono że długości sygnałów zielonych różnicuje się z dokładnością do 1 s. W związku z tym liczba różnych osobników (zestawów zmiennych) χ wynosi około 105 000. (dokładnie $18^4 = 104\,976$). Poprzez zastosowanie algorytmu genetycznego dąży się do skrócenia czasu obliczeń.

Tabela 7.6. Zestaw parametrów cząstkowych funkcji oceny do problemu sterowania za pomocą sygnalizacji czterofazowej

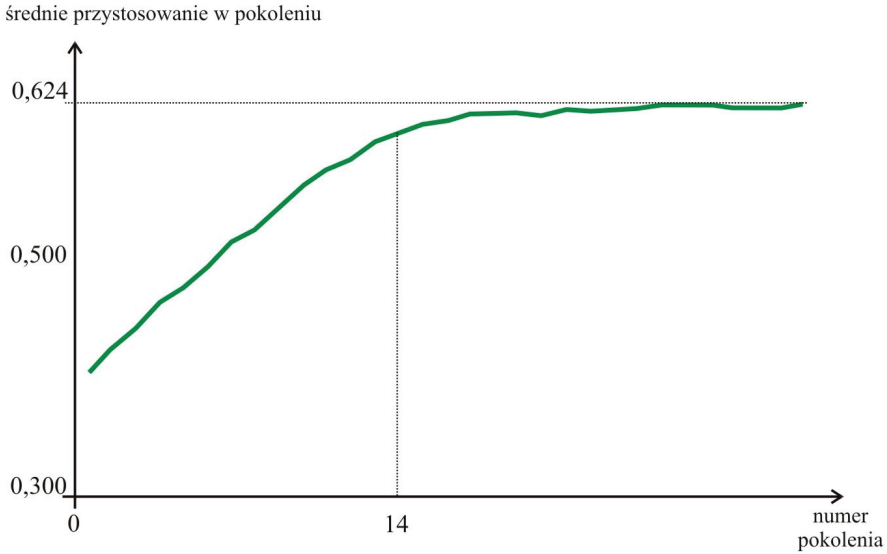
Funkcja (typu F_S)	Parametr:		Funkcja (typu F_A)	Parametr:	
	d	e		b	c
F_1	10	20	F_5	30	70
F_2	8	16	F_6	42	75
F_3	14 (10)	25 (18)	F_7	24 (32)	61 (69)
F_4	10	16	F_8	40	70

Liczebność populacji startowej algorytmu wyznacza się z formuły (6.19). Ostatecznie przyjęto 30 osobników. W operacji selekcji odrzuca się trzech najsłabszych i duplikuje trzech najlepszych osobników. Do krzyżowania przystępuje 14 par. W toku krzyżowania zamianie podlegają: 1, 2, 3 lub 4 zmienne. Wzorzec krzyżowania dla każdej pary określany jest losowo. W operacji mutacji wylosowana zmienna mutowanego osobnika przyjmuje nową wartość, również dobraną losowo.

Przeanalizowano sześć zestawów parametrów. Zestawy różnią się: rodzajem funkcji oceny (typ F_1 lub F_3), postaciami cząstkowych funkcji oceny, F_S i F_A (liniowa i nieliniowa) oraz wartościami parametrów tych funkcji. W tabeli 7.7 zestawiono parametry dla wszystkich zestawów. Zestaw bazowy (a) wykorzystuje funkcję oceny F_3 wyrażoną formułą (6.9), co odpowiada podejściu kompromisowemu względem znaczenia grup dominujących. Zastosowano nieliniowe postacie cząstkowych funkcji oceny według zależności (3.16) i (3.18). Parametry tych funkcji przyjęto według tabeli 7.6 bez uwzględniania wartości umieszczonych w nawiasach.

W wyniku zastosowania zestawu (a) dla pokolenia startowego z losowo dobranymi wartościami zmiennych poszczególnych osobników uzyskano łączne przystosowanie $\Sigma F = 12,055$. Oznacza to średnie przystosowanie w populacji na poziomie: 0,402. Najlepszy osobnik populacji startowej posiadał przystosowanie $F = 0,577$. W kolejnych pokoleniach uzyskano przyrosty średniego (rys. 7.1) i łącznego przystosowania. Po około 20 iteracjach zaobserwowano brak istotnych zmian średniego przystosowania. Algorytm osiągnął stabilizację. Funkcja przystosowania jest zbieżna do wartości 0,624.

Uzyskano zestaw zmiennych: $G_1 = 16$ s, $G_2 = 13$ s, $G_3 = 21$ s i $G_4 = 14$ s. Przystosowanie osobnika o takim składzie chromosomów wynosi $F = 0,624$ i jest to maksimum funkcji oceny w rozpatrywanej przestrzeni zmiennych. Pokolenia o numerze wyższym jak 20 składają się prawie wyłącznie z najlepiej przystosowanych osobników. Warto także zauważyć, że w pokoleniu startowym nie występował osobnik o takim zestawie chromosomów. Chromosomy o najlepszych wartościach były rozrzucone pomiędzy różne osobniki. Dopiero w toku pracy algorytmu oraz operacji: selekcji, krzyżowania i mutacji pojawił się najlepszy osobnik (w pokoleniu 14) i dosyć szybko zdominował populację.



Rys. 7.1. Przyrost przystosowania osobników w kolejnych pokoleniach

Tabela 7.7. Zestawy parametrów dla zadania sterowania za pomocą sygnalizacji czterofazowej

Zestaw	Funkcja oceny	Postać funkcji cząstkowych	Parametry funkcji cząstkowych
(a)	F_3	nieliniowe	bez wartości (...)
(b)	F_1	nieliniowe	bez wartości (...)
(c)	F_3	liniowe	bez wartości (...)
(d)	F_1	liniowe	bez wartości (...)
(e)	F_3	nieliniowe	z wartościami (...)
(f)	F_3	liniowe	z wartościami (...)

W innych zestawach parametrów wykorzystano funkcję oceny F_1 według formuły (6.2), liniowe postacie cząstkowych funkcji oceny oraz parametry tych funkcji z uwzględnieniem wartości umieszczonych w nawiasach (z tabeli 7.6). Te wartości, mniejsze dla wlotu numer 3 oznaczają mniejsze niższe wymagania użytkowników odnośnie do satysfakcjonującego rozwiązania i akceptację dłuższych sygnałów w grupach opozycyjnych. Wyniki dla poszczególnych zestawów zamieszczono w tabeli 7.8.

Po zastosowaniu funkcji oceny F_1 uzyskano w zestawie (b) odmienne niż w zestawie (a) rozwiązanie z najwyższą oceną elementu infrastruktury. Wartości zmiennych są bardziej zróżnicowane. Widać to wyraźnie na przykładzie zmiennej (grupy, wlotu) numer 3. Grupa ta jest w przypadku zastosowania pierwszej wersji funkcji oceny bardziej szykanowana. Podejście z funkcją oceny F_3 według formuły (6.9) daje bardziej zrównoważone wyniki dla ogółu użytkowników (tras, wlotów). Stosowanie funkcji oceny w formie F_1 może być nieefektywne.

Tabela 7.8. Wyniki zadania sterowania za pomocą sygnalizacji czterofazowej

Zestaw	G_1	G_2	G_3	G_4	ΣG	$G + R$	F
(a)	16	13	21	14	64	80	0,624
(b)	19	15	8	15	57	73	0,750
(c)	16	14	21	14	65	81	0,579
(d)	20	16	8	16	60	76	0,725
(e)	17	15	16	15	63	79	0,747
(f)	18	14	16	15	63	79	0,688

Przy wykorzystaniu liniowych postaci cząstkowych funkcji oceny (zestawy: c, d) uzyskano wyniki nieznacznie się różniące od wyników z użyciem postaci nieliniowych (odpowiednio zestawy: a, b). Zastosowanie prostszych liniowych postaci cząstkowych funkcji oceny nie prowadzi do diametralnie różnych rozwiązań. Różnice w wartościach zmiennych oznaczających najwyżej ocenione rozwiązanie, wynoszą tylko jedną sekundę (dla jednej lub trzech zmiennych w zależności od typu funkcji oceny).

Użycie alternatywnych wartości parametrów cząstkowych funkcji oceny (zestawy: e, f) dla wlotu 3 oznacza pogorszenie warunków ruchu dla tego wlotu (przyznano krótsze sygnały zielone), co jest zgodne z intuicją. Długość sygnału zielonego dla wlotu 3 jest mniejsza o 5 sekund. Dla pozostałych wlotów uzyskano fazy dłuższe o sekundę lub dwie. Powyższy przypadek dowodzi że rozwiązanie jest silnie uzależnione od preferencji użytkowników.

7.4. Testowanie wpływu wag jako preferencji dla określonych grup użytkowników

Drugi składnik metody umożliwia preferowanie określonych grup użytkowników (nadawanie im priorytetów) przez decydenta zarządzającego systemem transportu, poprzez wprowadzenie wag, ω_h . Wydzielenie tego składnika jest niezależne od lokalnych ocen użytkowników z poszczególnych grup oraz od ich liczebności. Nadanie priorytetu, na przykład dla podróżujących w pojazdach transportu zbiorowego, zgodne będzie z zasadami prowadzonej polityki transportowej, a niezależne od liczby osób podróżujących określonym środkiem lokomocji i niezależne od wrażliwości tych osób w ocenie elementu infrastruktury. Wpływ tego składnika metody oceny jest testowany na bazie analizowanego elementu infrastruktury oraz dwóch problemów związanych z: podziałem sygnału zielonego pomiędzy wyraźnie różniące się preferencjami grupy użytkowników (tu pokazano sytuację braku wag, ω_h) i przydziałem wydłużeń sygnałów zielonych w sygnalizacji dostosowującej się do zmian ruchu (z przydzielaniem wag, ω_h).

Jako wyraźnie różniące się preferencjami grupy użytkowników analizuje się: pieszych i podróżujących w pojazdach. Zgodnie z opisem w rozdziale 3.4, jako zmienna funkcji satysfakcji używa się ekwiwalentu E_2 , a funkcji akceptacji – E_1 . Te złożone zmienne uwzględniają faktycznie po dwie wielkości, toteż w obliczeniach poszukiwane jest rozwiązanie dla zestawu 4 zmiennych dla każdej z grup użytkowników. Przyjęcie ekwiwalentów E_2 i E_1 pozwala uwzględnić w ocenie: prędkość przemieszczania się, rezerwę przepustowości (a więc zarówno przepustowość, jak i natężenie ruchu), straty czasu i stopień wykorzystania przepustowości.

Ograniczenie zasobu elementu infrastruktury zdefiniowanego w niniejszym zadaniu wyraża się poprzez założenie, że suma konkretnych ekwiwalentów dla obu grup zawsze równa jest jedności. W ten sposób działania poprawiające ocenę dla jednej z grup oznaczają pogorszenie oceny w grupach opozycyjnych. Założenie to wyraża się za pomocą zależności: (7.17) i (7.18) oraz w rozwiniętych formach (7.19) i (7.20).

$$E_{1P} + E_{1V} = 1, \quad (7.17)$$

$$E_{2P} + E_{2V} = 1, \quad (7.18)$$

$$r_{DP} \cdot \rho_{DP} + XT_P \cdot \rho_{XP} + r_{DV} \cdot \rho_{DV} + XT_V \cdot \rho_{XV} = 1, \quad (7.19)$$

$$r_{VP} \cdot \rho_{VP} + r_{\Delta CTP} \cdot \rho_{\Delta CTP} + r_{VV} \cdot \rho_{VV} + r_{\Delta CV} \cdot \rho_{\Delta CV} = 1. \quad (7.20)$$

Powyższe założenia oznaczają ograniczenie niezależnych zmiennych zadania do 6. Liczba cząstkowych funkcji oceny równa jest natomiast 4 (po dwie funkcje satysfakcji i akceptacji).

Jako bazowy tworzony jest zestaw równomiernych wymagań, gdzie zakłada się brak ważenia poszczególnych składników ekwiwalentów jakości. Sumy wag w poszczególnych cząstkowych funkcjach oceny będą więc równe jedności, toteż współzależności pomiędzy zmiennymi wynikające z formuł: (7.19) i (7.20) upraszczają się do:

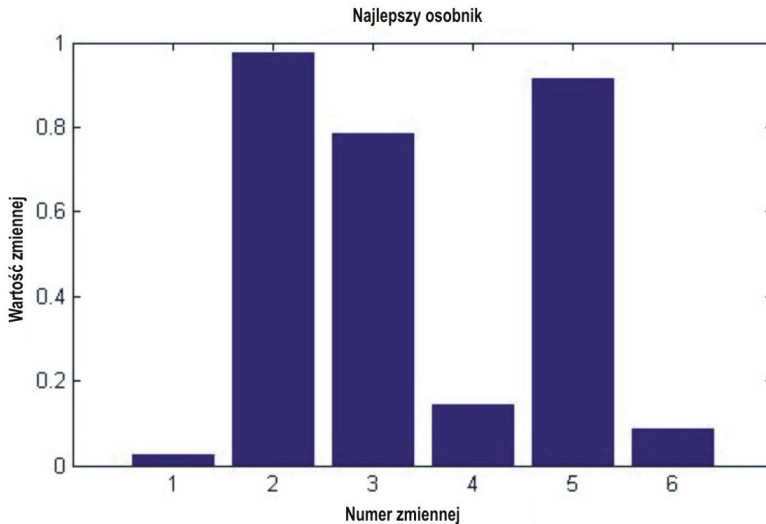
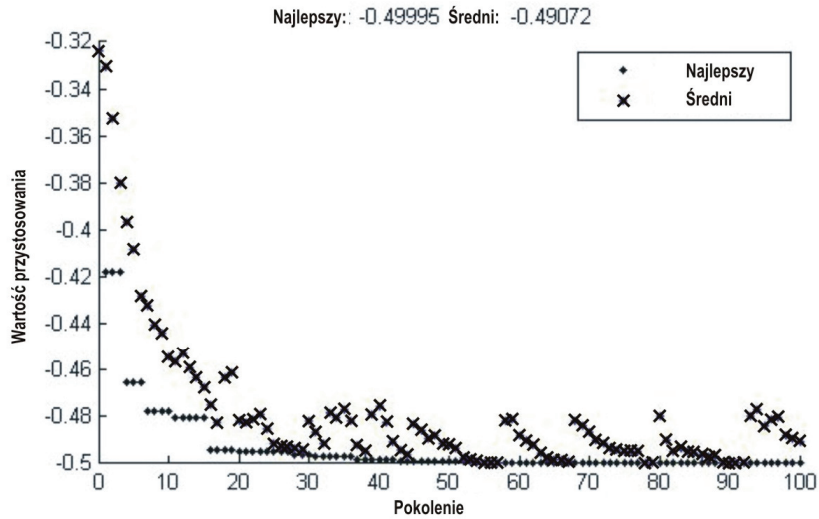
$$r_{DP} + XT_P + r_{DV} + XT_V = 1, \quad (7.21)$$

$$r_{VP} + r_{\Delta CTP} + r_{VV} + r_{\Delta CV} = 1. \quad (7.22)$$

Dodatkowo, w pierwszym kroku analiz przyjmuje się identyczne preferencje użytkowników z obu grup wyrażone wartościami parametrów opisujących funkcje satysfakcji i akceptacji.

Dla tak zdefiniowanych danych wejściowych przeprowadzono obliczenia z wykorzystaniem pakietu GATool programu Matlab, w który wpisano zasady autorskiego algorytmu genetycznego. Przebieg obliczeń pokazano na rysunku 7.2. Uzyskane wartości zmiennych zamieszczone w tabeli 7.9 należy poddać interpretacji. Na rysunkach 7.3–7.6 dokonano ogólnej interpretacji geometrycznej każdego typu zmiennej. Konkretna interpretacja liczbowa wymaga dodatkowo przyjęcia stosownych wartości mi-

nimalnych i maksymalnych poszczególnych wielkości. Wartości te wyprowadza się na podstawie stosowanych obecnie metod oceny jakości sterowania ruchem (np. według metody LOS z HCM, czy polskiego odpowiednika PSR).

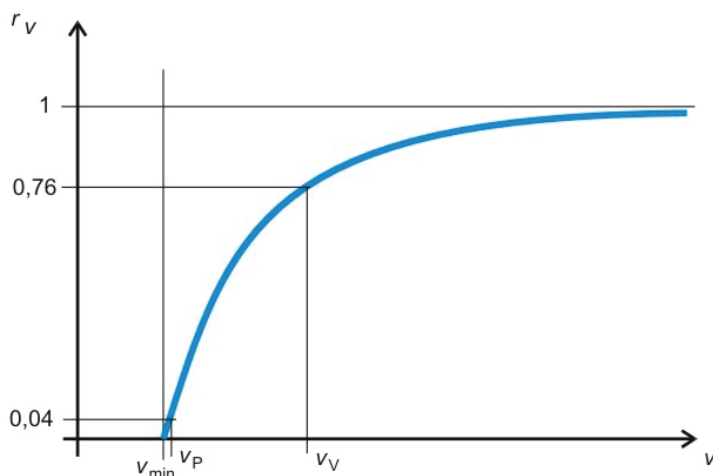
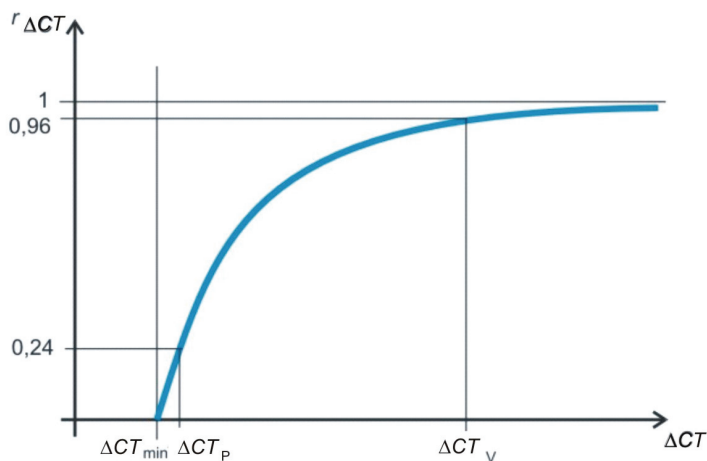


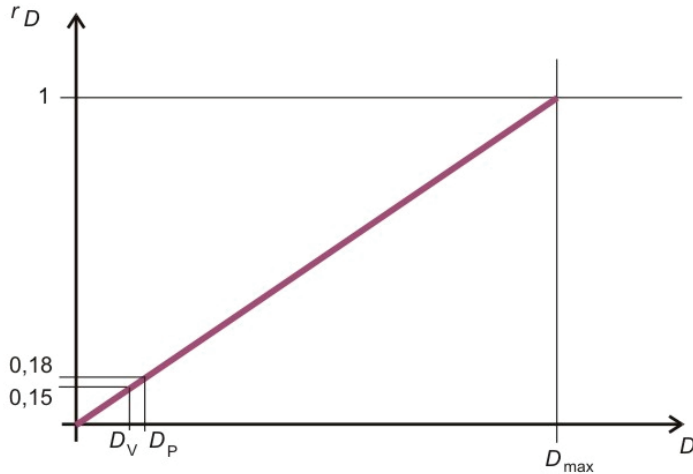
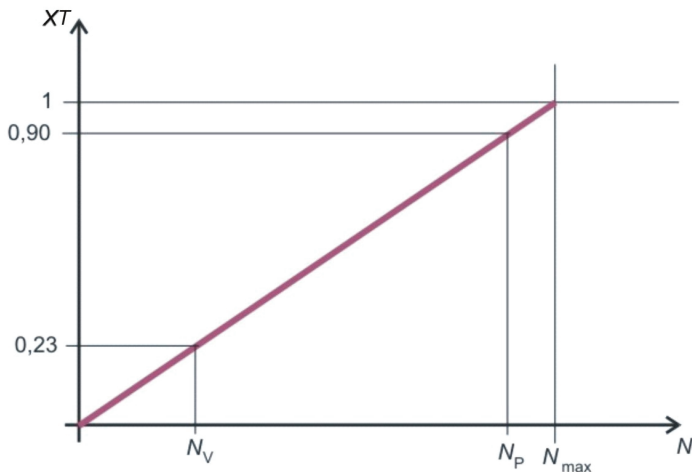
stop

Rys. 7.2. Rozwiązanie zadania podziału sygnału zielonego dla zestawu równomiernych wymagań względem podziału tego sygnału

Tabela 7.9. Wyniki dla zestawu równomiernych wymagań zadania podziału sygnału zielonego

Zmienna	Wynik	Zmienna	Wynik
zmiennie niezależne			
r_{vP}	0,04	r_{DP}	0,18
$r_{\Delta CT P}$	0,96	X_P	0,90
r_{vV}	0,76	r_{DV}	0,15
zmiennie zależne			
$r_{\Delta CT V}$	0,24	X_V	0,23

Rys. 7.3. Graficzna interpretacja wyników dla zmiennej v Rys. 7.4. Graficzna interpretacja wyników dla zmiennej ΔCT

Rys. 7.5. Graficzna interpretacja wyników dla zmiennej D Rys. 7.6. Graficzna interpretacja wyników dla zmiennej XT

Powyższe uwarunkowania ilustruje się przykładem obliczeniowym uproszczonym do analizy strat czasu (oraz udziału r_D). Przykładowo, gdyby założyć: przecięcie jezdni dwupasowej (dwukierunkowej) przejściem dla pieszych, długość cyklu $G + R = 80$ s (zasób, czyli sygnał zielony do podziału wynosić będzie w tej sytuacji około 70 s), liczebność grupy pieszych oraz podróżujących w pojazdach na podobnym poziomie (300 u/h) i podział sygnału zielonego w wymiarze 25 s dla pojazdów, a 45 s dla pieszych, stosując zależności prezentowane w rozdziale 7.2 (i wcześniejszych) uzyskuje się średnie straty czasu dla podróżujących w pojazdach, $D_V = 24,4$ s, a dla pieszych,

$D_p = 7,7$ s (według wzoru 7.12). Przyjmując w dalszej kolejności pułap maksymalnych akceptowanych strat czasu w wysokości $D_{\max} = 80,0$ s (identycznie dla obu grup użytkowników), otrzymuje się udziały $r_{DV} = 0,30$ i $r_{DP} = 0,10$. Są to wartości różniące się od zestawu zapisanego w tabeli 7.8, przy czym dla użytkowników pieszych wartość udziału r_D w przykładzie jest mniejsza od wartości z tabeli, a dla użytkowników podróżujących w pojazdach – większa. Wskazuje to na fakt, że straty czasu pieszych są mniejsze od dopuszczalnych przez użytkowników, a podróżujących w pojazdach – większe.

Z powyższego wynika, że aby poprawić ocenę ocenianego elementu infrastruktury, należy tak zmienić wielkości go charakteryzujące, aby wartości strat czasu dla pieszych nieco się zwiększyły, a wartości strat czasu dla podróżujących w pojazdach – zmalały. Najprościej można to osiągnąć modyfikując podział sygnału zielonego. Korzystając z wykresu 7.5 wyznaczyć można pożądane wartości strat czasu, na poziomie: 12,0 s dla pieszych i 14,4 s dla podróżujących w pojazdach. Konieczny jest taki dobór podziału sygnału zielonego, aby uzyskać powyższe wartości strat czasu. Pamiętać jednak należy, że analizowany wyżej udział strat czasu, to tylko jeden z czterech składników ekwiwalentów jakości – wielkości będących podstawą przeprowadzonej oceny. Modyfikacja podziału sygnału zielonego, jako jednej z wielkości opisującej element infrastruktury, będzie niewystarczająca dla uzyskania pożądanych wartości wszystkich składowych ekwiwalentów. Aby to uzyskać, konieczne są modyfikacje innych wielkości opisujących element infrastruktury, takich jak: szerokości i liczba pasów ruchu, sposób sterowania ruchem, natężenia ruchu.

Problem wydłużania i skracania sygnałów zielonych przy sygnalizacji dostosowującej się do ruchu jako zmienną decyzyjną wykorzystuje wydłużenie poszczególnych faz g_h (por. rozdział 4.5). Efekt skrócenia fazy modeluje się określając minimalną długość danej fazy G_h z uwzględnieniem maksymalnego jej skrócenia. Na wydłużenia każdej z faz nakłada się warunek ograniczający wartość ich sumy. Suma g będzie wtedy zasobem elementu infrastruktury dla przedmiotowego zadania, a ograniczenie wyrazi się formułą (7.7).

Wydłużenie faz jest zmienną funkcji satysfakcji F_S . Kalibracja parametrów tej funkcji zależy od przyjętej wartości zasobu oraz od dopuszczalnego zakresu zmienności wydłużenia poszczególnych faz. W niniejszym zadaniu przyjęto, że wydłużenie fazy nie może przekraczać 20 s. Określono zestaw podstawowy parametrów cząstkowych funkcji oceny, w którym wartości parametrów są identyczne dla wszystkich grup użytkowników utożsamianych tu z fazami ruchu. Zmienną dla funkcji akceptacji są straty czasu obliczane według zależności (5.10)–(5.13). Parametry b , c funkcji F_A dobrano jako wartości strat czasu charakterystyczne dla PSR I lub III. Duży rozrzut w wartościach tych parametrów nawiązuje do definicji rodzin funkcji dla użytkowników mniej zdecydowanych i bardziej wymagających. Sygnały zielone dla poszczególnych faz uwzględniają minimalną stałą długość oraz wydłużenie. Wartość strat czasu zależy także od łącznej długości cyklu, a więc i od długości poszczególnych faz, w tym opo-

zycyjnych. Stąd wartości funkcji akceptacji dla danej grupy (fazy) maleją wraz ze wzrostem długości wydłużeń faz opozycyjnych. Podobnie jak w przypadku funkcji satysfakcji przyjęto zestaw podstawowy parametrów dla funkcji akceptacji o takich samych wartościach dla wszystkich grup. W tabeli 7.10 zestawiono wartości tych parametrów dla zestawu podstawowego.

Tabela 7.10. Wartości parametrów cząstkowych funkcji oceny w zestawie podstawowym zadania wydłużania i skracania sygnałów zielonych

Parametr	b	c	d	e
Wartość w zestawie podstawowym	0	60	-20	40

Nie modyfikuje się wartości parametrów cząstkowych funkcji oceny. Priorytet dla określonej grupy użytkowników uwzględnia się poprzez modyfikacje wartości wag w funkcji oceny. Wagi oznaczane jako ω_h przypisywane są dla poszczególnych funkcji F_S i F_A według formuł przedstawionych w rozdziale 6 monografii. Zwiększenie wagi funkcji F_S i F_A dla konkretnej grupy użytkowników oznacza wzrost stopnia priorytetu dla tej grupy. Zestawy danych inne niż podstawowy nie różnią się w tym zadaniu wartościami parametrów cząstkowych funkcji oceny, a wartościami wag.

W pierwszej kolejności testowano brak priorytetu dla którejkolwiek z faz. Wagi przyznawane poszczególnym grupom są w tym przypadku równe sobie, a z uwagi na liczbę grup i cząstkowych funkcji oceny przyjmują wartość $1/6$. Rozwiązanie zadania, przedstawione w formie graficznej na rysunku 7.7 wskazuje najwyżej oceniane wydłużenie wszystkich faz w wysokości około 10,5 s.

W kolejnych krokach analiz określono zróżnicowane wartości wag zakładając wzrastające preferencje dla fazy I. Wzrost wartości wag dla tej grupy oznacza zmniejszenie wartości wag dla pozostałych i opozycyjnych grup. Testowane wartości wag zestawiono w tabeli 7.11. W rozwiązaniu uzyskano większe wartości wydłużeń faz dla grupy z priorytetem, rosnące wraz ze wzrostem wartości wag. Na rysunkach: 7.8 i 7.9 pokazano wyniki dla zestawów danych z rosnącymi wartościami wag dla fazy I.

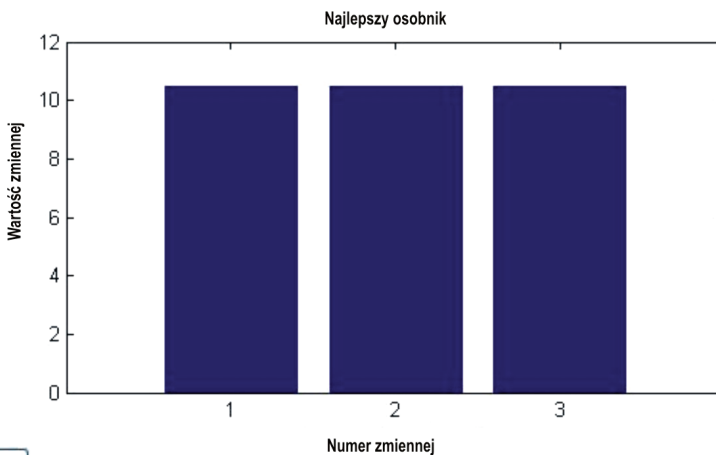
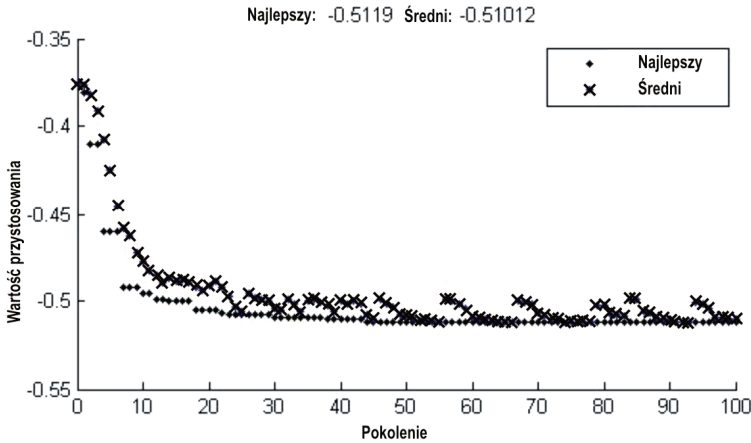
Tabela 7.11. Wartości wag ω_h dla poszczególnych funkcji oraz zestawów danych

Funkcja cząstkowa:	F_{S1}	F_{S2}	F_{S3}	F_{A1}	F_{A2}	F_{A3}
Wyniki na rysunku 7.7	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6
Wyniki na rysunku 7.8	0,26	0,12	0,12	0,26	0,12	0,12
Wyniki na rysunku 7.9	0,28	0,11	0,11	0,28	0,11	0,11

Wykazano, że poprzez wprowadzenie wag można preferować określoną grupę użytkowników niezależnie od specyfiki oceny dokonywanej w grupach. W analizowanym przypadku, poprzez zwiększanie wagi dla wybranej grupy – tu utożsamionej z konkretną fazą ruchu (mogą to być również użytkownicy poruszający się w pojaz-

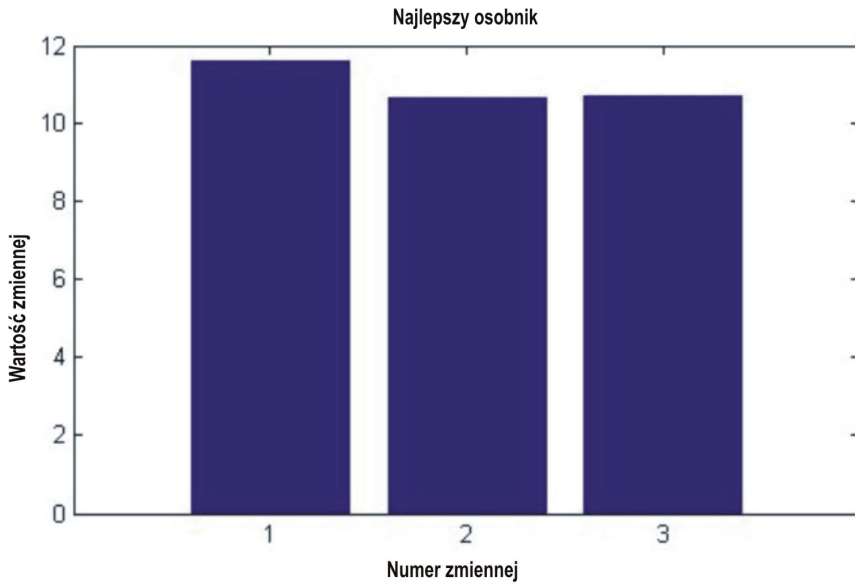
dach transportu zbiorowego), uzyskano wynik związany z większym wydłużeniem sygnału zielonego dla takiej grupy. Najwyższą ocenę otrzyma wariant elementu infrastruktury, w którym dla preferowanej grupy przyznane będzie większe wydłużenie sygnału zielonego.

Na tle zadania prezentowanego w pierwszej części niniejszego rozdziału widać, że składnik metody oceny pozwalający na ingerencję zewnętrzną (priorytetowanie) jest niezależny od innych składników metody. Rozwiązanie o najwyższej ocenie zależy od ocen w poszczególnych grupach użytkowników, ale i także od działań decydentów zarządzających systemem transportu.

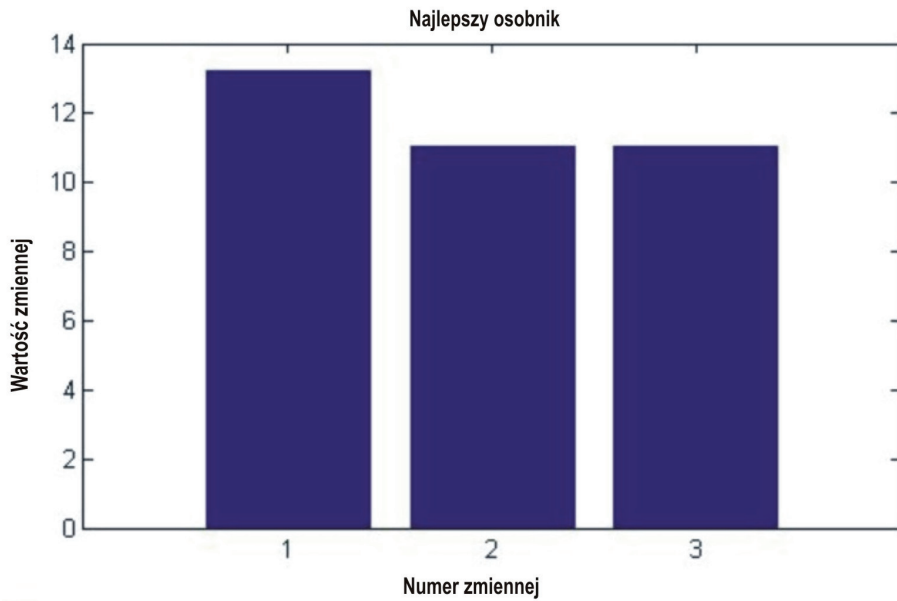


stop

Rys. 7.7. Rozwiązanie zadania dla zestawu równych wag zadania wydłużania i skracania sygnałów zielonych



Rys. 7.8. Rozwiązanie zadania wydłużania i skracania sygnałów zielonych dla zestawu większej wagi dla fazy I



Rys. 7.9. Rozwiązanie zadania wydłużania i skracania sygnałów zielonych dla zestawu największej wagi dla fazy I

7.5. Testowanie wpływu zmian wartości parametrów cząstkowych funkcji oceny

Parametry cząstkowych funkcji oceny (satisfakcji i akceptacji) wyrażają uwarunkowania użytkowników z poszczególnych grup w sensie sposobu oceny (por. grupy mniej lub bardziej zdecydowane albo mniej lub bardziej wymagające). Zróżnicowanie wymagań dotyczy konkretnych elementów infrastruktury. Na przykład inne są oczekiwania, a zatem i inne wartości parametrów, dla skrzyżowań w centrach miast, a inne dla skrzyżowań położonych na peryferiach. Poprzez zróżnicowanie parametrów oddaje się specyfikę lokalną. Na przykład uwzględnia inne oczekiwania pieszych z dużych miast, w których prowadzi się aktywną politykę kształtowania mobilności, odmienne od oczekiwań pieszych z małych miejscowości z dominacją podróży samochodem, przy braku transportu zbiorowego.

Części elementu infrastruktury drogowej kształtowane są z uwzględnieniem zróżnicowania preferencji użytkowników wyrażonych konkretnymi wartościami parametrów cząstkowych funkcji oceny. Przedstawione to jest na przykładach: doboru elementów przekroju poprzecznego wlotu skrzyżowania, przydziału pasów ruchu dla poszczególnych relacji na wlocie i dla problemu doboru długości sygnałów zielonych przy uwzględnieniu sygnalizacji dostosowujących się do zmian ruchu z możliwością zamiany kolejności faz.

W zadaniu doboru elementów przekroju poprzecznego dla poszczególnych grup użytkowników (por. rozdział 4.4) z uwagi na założoną liczbę grup wystąpi 20 zmiennych (część jako zmienne zależne). Zmienne funkcji F_A wyrażające stopień wykorzystania przepustowości (XT) są zależne od zmiennych występujących w funkcjach F_S , którymi są szerokości pasa ruchu (s) przyznawane poszczególnym użytkownikom. Wystąpi 20 cząstkowych funkcji oceny wyrażających satysfakcję z przyznanej szerokości (F_S) i akceptację stopnia wykorzystania przepustowości (F_A) w poszczególnych grupach użytkowników. Wykorzystując metodę opisaną w [159] przyjęto następującą zależność pomiędzy przepustowością, a szerokością pasa ruchu (założono, że przepustowość równa jest natężeniu nasycenia):

$$CT_h = S_h^m \cdot s_h, \quad (7.23)$$

gdzie S_h^m to natężenie nasycenia dla grupy h przy założeniu wykorzystania pasa ruchu o szerokości 1m. Przyjęto napełnienie pojazdu osobowego równe jednej osobie, autobusu jako 20 osób, a tramwaju jako 60 osób. Stąd przyjęto następujące wartości wielkości S_h^m : 5430 u/h w grupie TT, 3620 u/h w grupie TB, 1500 u/h w grupie B, 4500 u/h w grupie P i 543 u/h w grupie V. Szerokości pasów ruchu przyznawane poszczególnym grupom (i kierunkom) limitowane są przez ograniczony zasób elementu infrastruktury, którym jest dostępna szerokość pasa drogi (np. w liniach rozgraniczających

lub pomiędzy istniejącą zabudową). Jeżeli tę dostępną szerokość oznaczy się jako s , to formuła wiążąca poszczególne zmienne s_h przyjmuje postać (7.4). Jest to dodatkowe ograniczenie limitujące wartości poszczególnych zmiennych (szerokości). Każda zmienna niezależna, czyli szerokość pasa ruchu dla konkretnej grupy użytkowników podlega ograniczeniom w postaci (7.24):

$$s_{h \min} \leq s_h \leq s_{h \max} . \quad (7.24)$$

Przyjęto ograniczenie dostępnej szerokości drogi dochodzącej do skrzyżowania (wlotu i wylotu) w wysokości 25 m. Parametry funkcji F_S przyjęto na podstawie dokonanej wcześniej kalibracji szerokości pasa ruchu (tab. 5.18) modyfikując ich wartości jak dla użytkowników mniej zdecydowanych. Parametry funkcji F_A odpowiadają wartościom stopnia wykorzystania przepustowości dla zestawu użytkowników mniej zdecydowanych (tab. 5.24). Dokonano zróżnicowania wartości parametrów w poszczególnych grupach (z pomiędzy dopuszczanego minimum i maksimum) celem obserwacji wpływu takiego zróżnicowania na uzyskany wynik. Zestaw podstawowy tych parametrów dla niniejszego zadania przedstawiono w tabeli 7.12.

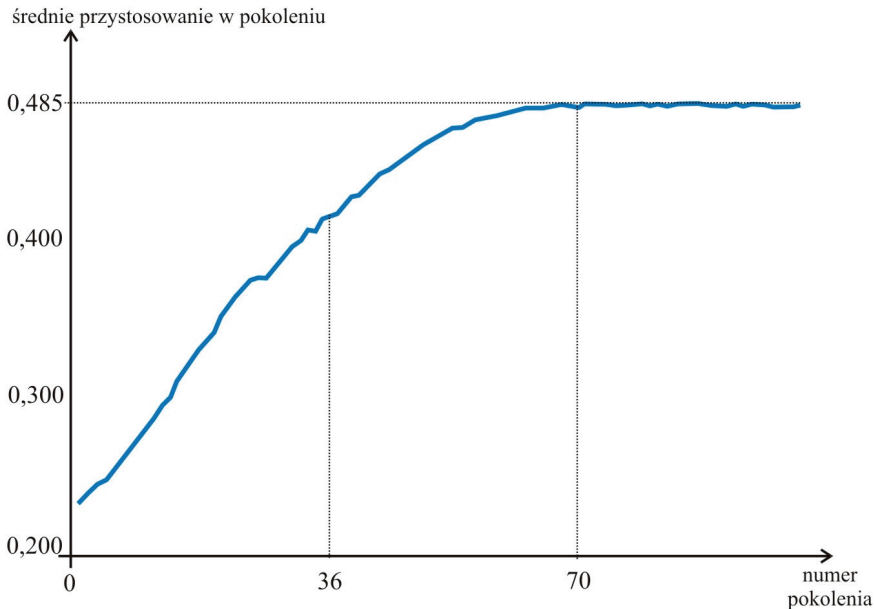
Tabela 7.12. Zestaw podstawowy parametrów cząstkowych funkcji oceny dla zadania doboru elementów przekroju poprzecznego

Grupa użytkowników	F_S		F_A	
	d	e	b	c
TT, 1	0	6	0,05	0,85
TB, 2	0	6	0,08	0,87
B, 3	0	3	0,08	0,87
P, 4	0	3	0,20	0,50
V, 5	0	7	0,18	0,97
TT, 6	0	6	0,12	0,92
TB, 7	0	6	0,20	1,00
B, 8	0	3	0,15	0,95
P, 9	0	3	0,00	0,30
V, 10	0	7	0,13	0,93

Do wskazania rozwiązania o najwyższej ocenie użyto autorskiego algorytmu genetycznego GAFRO. Nie stosowano wag dla wyróżnienia którejs z grup użytkowników. Liczebność grupy wykorzystywana jest wyłącznie do obliczenia rezerwy przepustowości. W celu ograniczenia czasu obliczeń operowano na populacji liczącej 80 osobników. Jak pokazały dalsze analizy, taka liczebność populacji okazała się wystarczająca do uzyskania poprawnego wyniku. Wartości zmiennych s_h ograniczono do przedziału od 1,0 do 3,0 stosując dokładność do 1 cyfry po przecinku (co oznacza

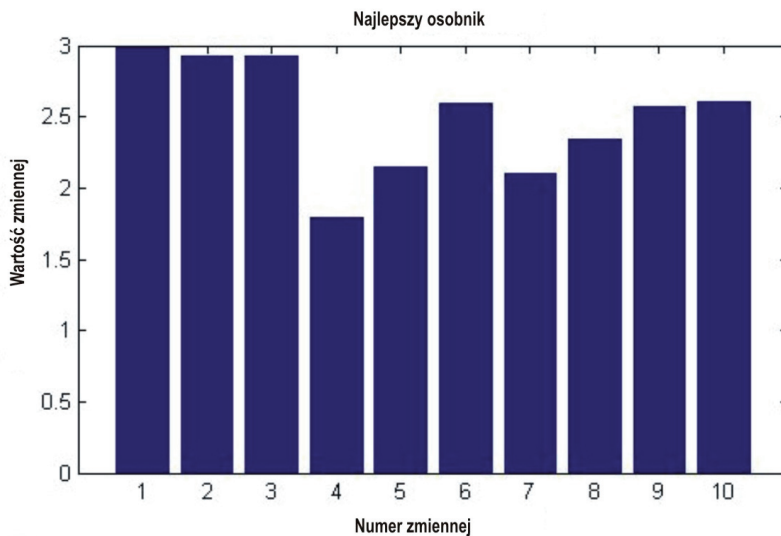
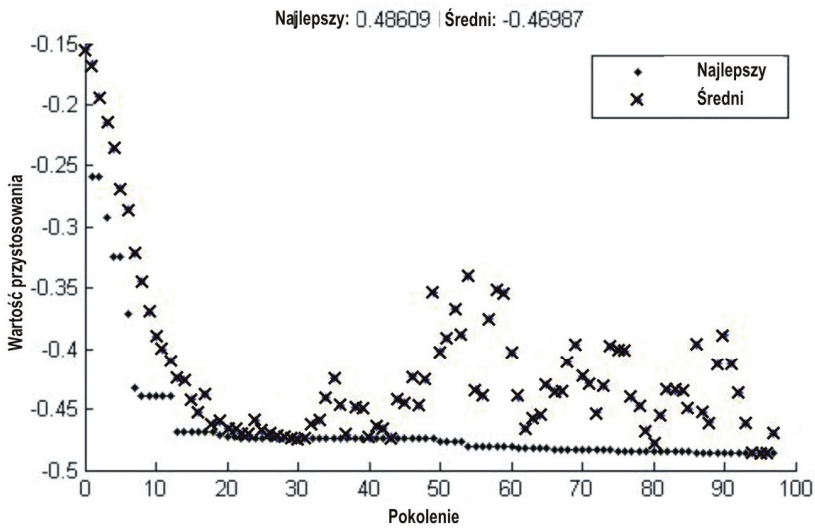
10 cm). Ostatecznie w zadaniu analizuje się 10 zmiennych niezależnych. Z powyższego opisu wynika, że każda ze zmiennych może przyjmować 21 różnych wartości. Prezentowane zadanie ma zatem ponad 16 bilionów rozwiązań (21^{10}).

Przyrost średniego przystosowania w populacji pokazano na rysunku 7.10. Suma przystosowań w populacji startowej wynosiła 18,523. Przeciętne przystosowanie osobnika to 0,232. Osobnik najlepiej przystosowany miał $F = 0,306$. Powyżej pokolenia 70 uzyskano stabilizację średniego przystosowania na poziomie $F = 0,485$. Odpowiada to wartości funkcji przystosowania dla najlepszego osobnika. Uzyskano rozwiązanie w którym zmienne przyjmują wartości: 3,0; 2,9; 2,9; 1,8; 2,2; 2,6; 2,1; 2,3; 2,6; 2,6. Są to szerokości pasów ruchu dla poszczególnych grup użytkowników, które należy zapewnić aby uzyskać rozwiązanie o najwyższej ocenie. Osobnik o najwyższym przystosowaniu pojawił się w 36 pokoleniu.



Rys. 7.10. Przyrost przystosowania osobników w kolejnych pokoleniach

Wykonano 100 iteracji, czyli 8000 obliczeń. Jest to znacząco mniej (ponad 2 miliardy razy) niż w przypadku poszukiwania rozwiązania metodą przeglądu kolejnych możliwości. Jak widać, dosyć złożone zadanie rozwiązane zostało w efektywny sposób. Poświadcza to sprawność algorytmów genetycznych do rozwiązywania złożonych zadań. Rozwiązanie zestawu podstawowego parametrów cząstkowych funkcji oceny wykonano także z użyciem pakietu GATool programu Matlab. Uzyskano podobne wyniki, których graficzną postać prezentuje się na rysunku 7.11.



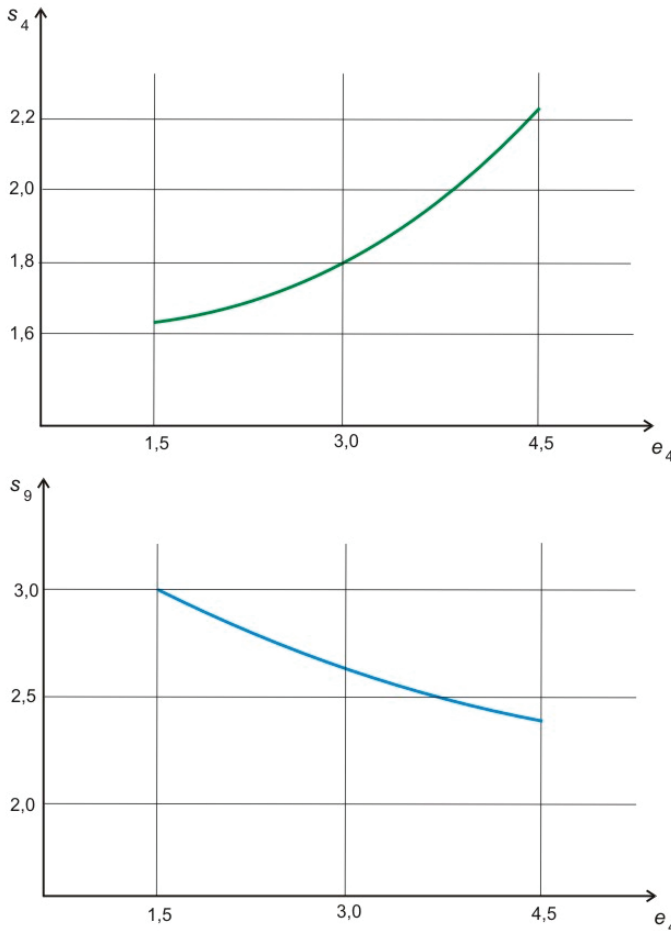
stop

Rys. 7.11. Wyniki dla zestawu podstawowego zadania doboru elementów przekroju poprzecznego uzyskane z programu GATool

Wykazano intuicyjnie rozumianą zależność wzrostu pożądanej szerokości pasa ruchu (i rezerw przepustowości) dla danej grupy od wzrostu wymagań użytkowników w tej grupie. Podobnie wzrost preferencji jednej z grup obniża udział przyznanego

zasobu w grupie opozycyjnej. Duży wpływ na wynik rozwiązania ma więc odpowiednie wyważenie preferencji.

Pakiet GATool programu Matlab wykorzystano także do testowania wrażliwości rozwiązania na zmiany wymagań względem oceny elementu infrastruktury. Przeanalizowano wpływ tych parametrów na przydzielane szerokości pasów ruchu. Dla wybranych grup: TT, P, V jednego z kierunków zmieniano ich wymagania wyrażone wartościami parametru e funkcji F_S oraz liczebność tej grupy. Przykładowo zaostrzenie wymagań w grupie numer 4 (wyrażone wzrostem wartości parametru e_4 funkcji F_{S_4}) wpływa dodatnio na szerokość pasa ruchu przydzielanego dla tej grupy (s_4), a ujemnie na szerokość pasa ruchu dla jednej z opozycyjnych grup (s_9). Zależności te pokazano na rysunku 7.12.



Rys. 7.12. Zależność szerokości pasa ruchu od preferencji wybranych grup użytkowników

W problemie przydziału pasów ruchu dla poszczególnych relacji (por. rozdział 4.4) typuje się natężenie ruchu dla relacji h , N_h jako podstawę do wyznaczenia zmiennych cząstkowych funkcji oceny. Zmienną dla funkcji F_S jest rezerwa przepustowości ΔCT , natomiast zmienną dla funkcji F_A – stopień wykorzystania przepustowości XT . Jako grupy użytkowników rozumie się teraz kierunki reprezentowane przez poszczególne pasy ruchu. Wyróżnia się więc trzy grupy: w lewo – L, na wprost – W i w prawo – P. Użytkownicy każdej z grup formułują odmienne wymagania odnośnie oceny elementu infrastruktury wyrażane parametrami cząstkowych funkcji oceny. Wpływ na wynik rozwiązania zadania ma także natężenie ruchu poszczególnych relacji (liczebność grup). Suma natężeń ruchu poszczególnych relacji, N podlega ograniczeniu, co tworzy zasób elementu infrastruktury niniejszego zadania. Wyraża to formuła (7.25):

$$N_L + N_W + N_P = N. \quad (7.25)$$

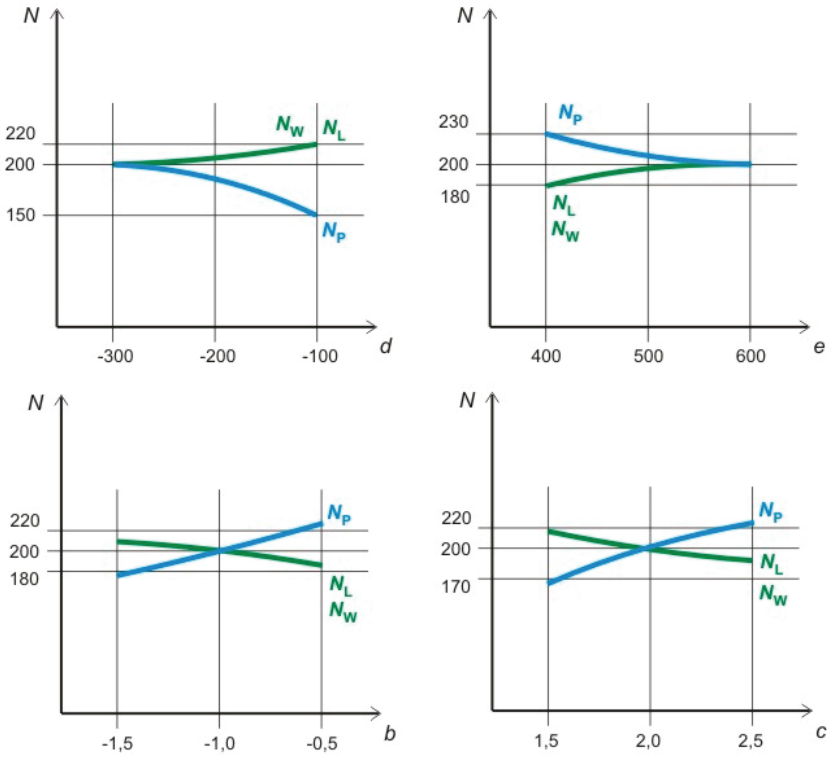
Rozwiązując zadanie otrzymuje się zestaw natężeń ruchu dla poszczególnych relacji określających graniczną wielkość ruchu przy której požądane, z punktu widzenia użytkowników jest wydzielenie pasa ruchu dla konkretnej relacji. Gdy rzeczywiste lub prognozowane natężenia ruchu przekraczają wartości graniczne, to powinno się wydzielić pas ruchu.

W ogólnym podejściu rozwiązanie zadania polega na znalezieniu zestawu wartości dwóch niezależnych zmiennych, którymi są natężenia ruchu dla dwóch wybranych relacji. Natężenie ruchu dla trzeciej relacji jest zmienną zależną, powiązaną ze zmiennymi niezależnymi formułą (7.25). W niniejszych rozważaniach przyjęto, że zmiennymi niezależnymi są natężenia ruchu dla relacji skrętnych w lewo i w prawo. Zadanie można więc traktować jako problem wydzielenia pasów ruchu dla relacji skrętnych. W niniejszym przykładzie skoncentrowano się na szerokim badaniu wpływu preferencji użytkowników wyrażonych poprzez różne wartości parametrów cząstkowych funkcji oceny.

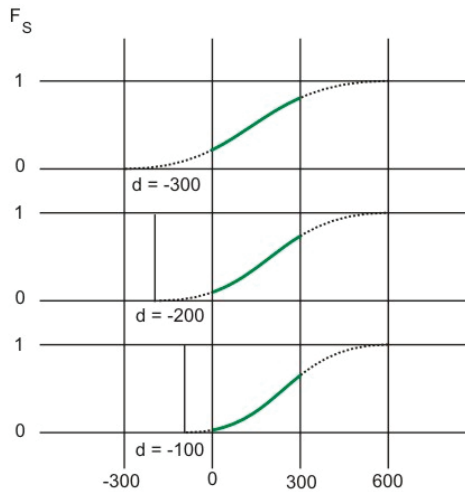
Parametry funkcji F_S i F_A przyjęto z szerokiego zakresu zmienności (wykraczając nawet poza ramy wartości z zestawów wzorcowych). Punktem wyjścia analiz jest zestaw podstawowy parametrów cząstkowych funkcji oceny o wartościach zestawionych w tabeli 7.13. Dla takiego zestawu oznaczającego identyczne preferencje w grupach użytkowników uzyskuje się w najwyżej ocenianym rozwiązaniu takie same wartości granicznych natężeń ruchu dla każdej z grup. Przyjęto ograniczenie łącznego natężenia ruchu $N = 600$ P/h. Zakres zmienności natężeń w poszczególnych grupach jest przedziałem od 0 do 300 P/h. Z uwagi na ograniczenie zasobu maksymalne natężenia ruchu nie mogą wystąpić jednocześnie na wszystkich relacjach.

Tabela 7.13. Zestaw podstawowy parametrów cząstkowych funkcji oceny dla zadania przydziału pasów ruchu dla poszczególnych relacji

Funkcja	F_{SL}		F_{SW}		F_{SP}		F_{AL}		F_{AW}		F_{AP}	
Parametr	d	e	d	e	d	e	b	c	b	c	b	c
Wartość	-300	600	-300	600	-300	600	-1,0	2,0	-1,0	2,0	-1,0	2,0

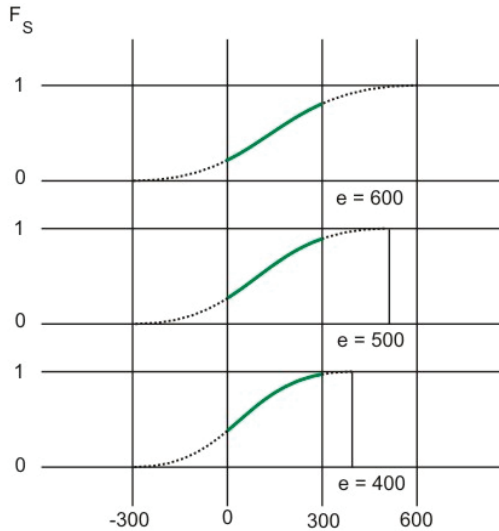


Rys. 7.13. Wyniki zadania przydziału pasów ruchu dla poszczególnych relacji dla różnych wartości parametrów funkcji F_S i F_A

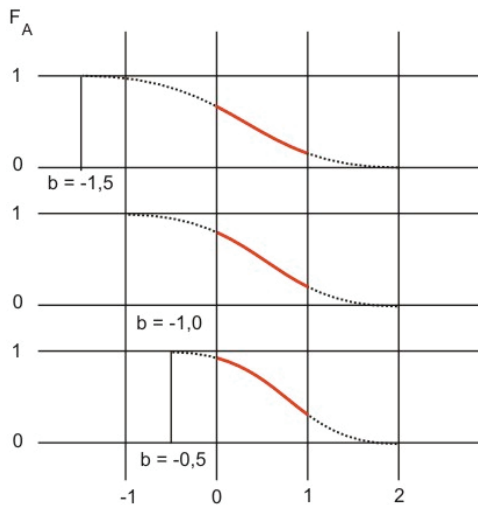


Rys. 7.14. Wpływ zmian wartości parametru d na wartości funkcji F_S

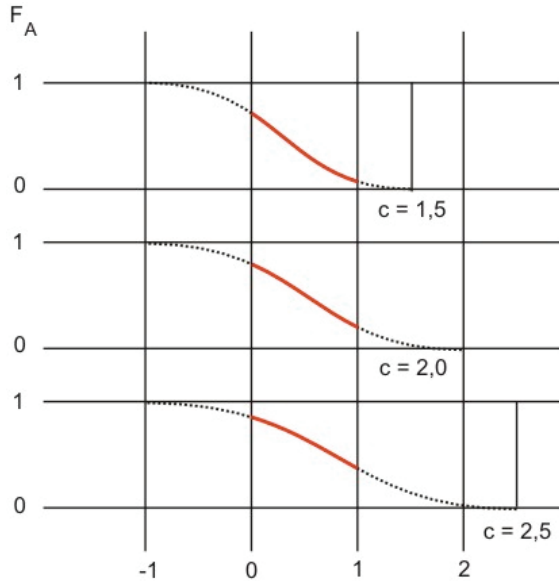
W kolejnym kroku opracowano kilka zestawów parametrów cząstkowych funkcji oceny. Wartości parametrów zmieniano dla relacji prawoskrętnej, a dla dwóch pozostałych relacji pozostawiono takie jak w zestawie podstawowym. Wpływ zmian poszczególnych parametrów na rozwiązanie zadania pokazano na rysunku 7.13. Zmienność parametrów i jej wpływ na wartości cząstkowych funkcji oceny pokazano na rysunkach: 7.14–7.17. Rozwiązanie zadania uzyskano wykorzystując pakiet GATool programu Matlab.



Rys. 7.15. Wpływ zmian wartości parametru e na wartości funkcji F_S



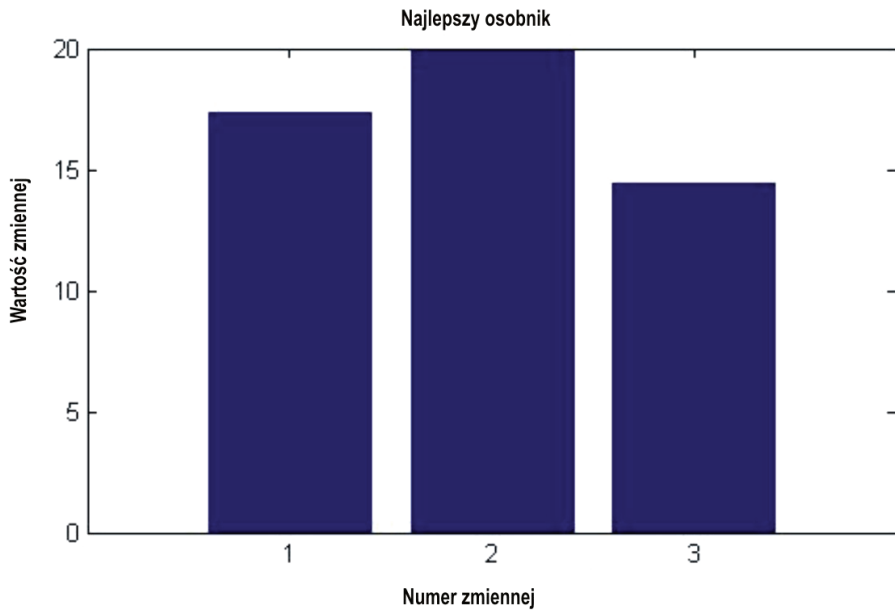
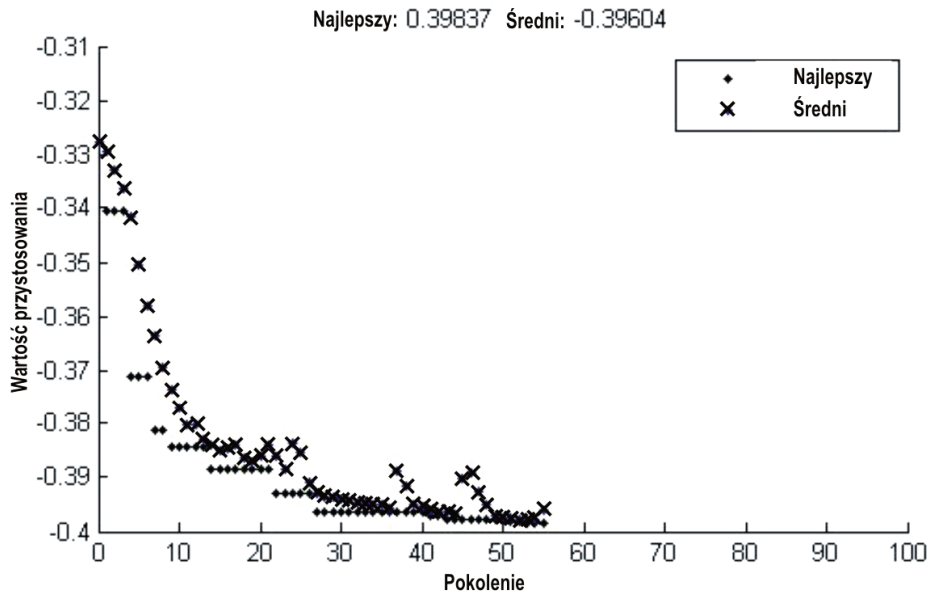
Rys. 7.16. Wpływ zmian wartości parametru b na wartości funkcji F_A



Rys. 7.17. Wpływ zmian wartości parametru c na wartości funkcji F_A

Interpretacja rysunków 7.13–7.17 wskazuje, że gdy rosną wartości parametrów d i e funkcji satysfakcji, czyli że zaostrzają się wymagania użytkowników, maleją wartości natężenia granicznego na pasie do skrętu w prawo, N_p . Konieczność wydzielenia takiego pasa pojawia się przy niższych natężeniach ruchu. Podobnie jest gdy maleją wartości parametrów b i c funkcji akceptacji. Aby osiągnąć określoną ocenę, przy niższej akceptacji konieczne jest wydzielenie pasa do skrętu już przy niższych natężeniach granicznych, niż byłoby to konieczne na wyższym poziomie akceptacji (wtedy gdyby parametry b i c funkcji F_A miały większe wartości, a parametry d i e funkcji F_S – mniejsze).

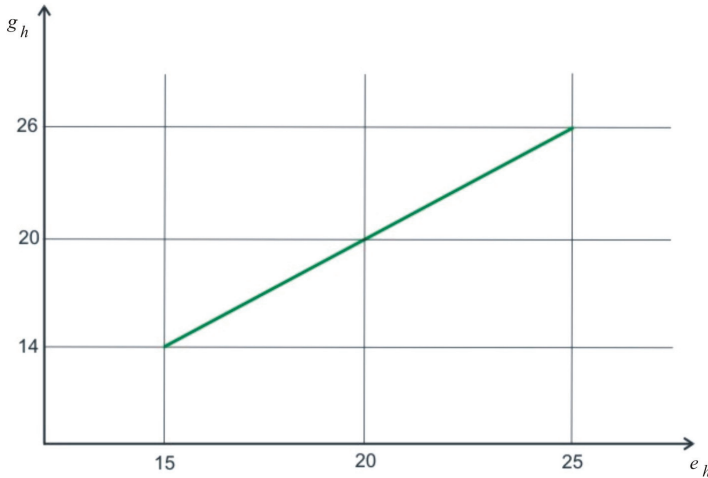
Prezentowany już wcześniej (rozdział 7.3) problem sterowania ruchem za pomocą sygnalizacji czterofazowej przeanalizowano także pod kątem testowania wpływu zmian wartości parametrów funkcji satysfakcji i akceptacji na wynik rozwiązania. Wykorzystano tu pakiet GAToolBox programu Matlab. W tym przypadku przyjęto stałą długość cyklu, $G + R = 80$ s, co pozwoliło ograniczyć liczbę zmiennych do 3. Długości poszczególnych sygnałów ograniczono do przedziału od 10 do 30 sekund. Testowano wrażliwość rozwiązania na zmiany preferencji użytkowników wyrażone wartościami parametrów d , e funkcji F_S oraz b , c funkcji F_A oraz na zmiany natężeń ruchu na relacjach wyrażonych wielkością XT . Zbudowano kilka zestawów zmiennych i po rozwiązaniu zadania dla poszczególnych zestawów sporządzono wykresy zależności długości przydzielanego sygnału od wartości parametru e wyrażającego stopień satysfakcji z efektów sterowania ruchem oraz od natężenia ruchu. Przykładowy efekt pracy algorytmu GATool, funkcję przystosowania dla poszczególnych generacji oraz sygnały zielone przydzielone w końcowej generacji, pokazano na rysunku 7.18.



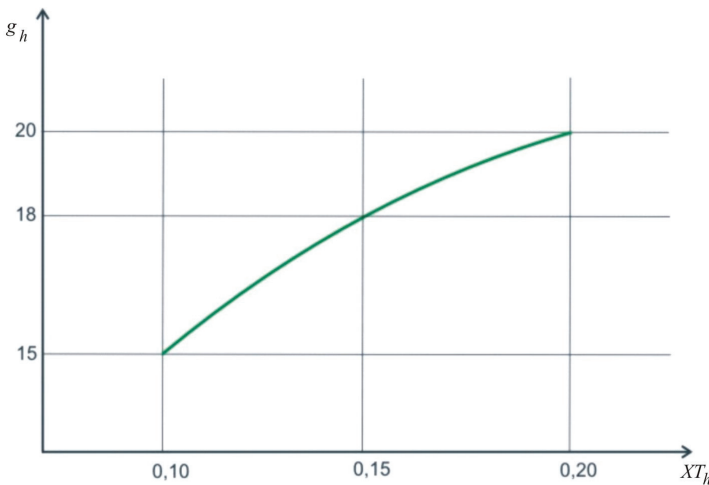
stop

Rys. 7.18. Rozwiązanie przykładowego zadania sterowania sygnalizacją czterofazową

Wartość parametru e funkcji F_S względem przyjmowanych wartości zmiennej g_h wyraża wymagania danej grupy wobec efektów sterowania ruchem. W tym konkretnym przypadku, im wyższa wartość parametru e , tym większe wymagania odnośnie przydzielanego sygnału zielonego. Dana grupa osiąga pełną satysfakcję ($F_S = 1$) dopiero przy dużych wartościach sygnału zielonego. Zależność pomiędzy wartościami parametru e a długością przydzielanego sygnału g_h pokazano na rysunku 7.19.



Rys. 7.19. Zależność długości przydzielanego sygnału zielonego od preferencji użytkowników w zadaniu sterowania ruchem za pomocą sygnalizacji czterofazowej



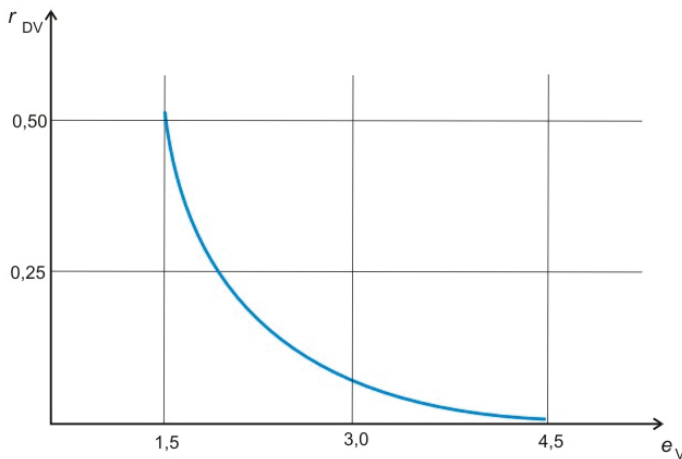
Rys. 7.20. Zależność długości przydzielanego sygnału zielonego od stopnia obciążenia wlotu w zadaniu sterowania ruchem za pomocą sygnalizacji czterofazowej

Wpływ natężenia ruchu na wartości przydzielanego sygnału zielonego pokazano na rysunku 7.20. Natężenie ruchu wyrażono poprzez stopień obciążenia wlotu XT zakładając identyczne przepustowości na poszczególnych wlotach. Grupa użytkowników (wlot) o większym natężeniu ruchu wymaga dłuższego sygnału zielonego, aby osiągnąć satysfakcję ze sterowania ruchem. W tym przypadku przyjęto takie same wartości dla parametrów funkcji F_S i F_A dla każdej z grup.

Stwierdzono liniową zależność długości przydzielanych sygnałów od preferencji użytkowników wyrażonych parametrem e funkcji F_S (przy zastosowaniu funkcji oceny F_3) oraz nieliniową zależność tej długości od natężenia ruchu wyrażonego przez wielkość XT . Im wyższe wymagania oraz natężenie ruchu, tym dłuższy przydzielany sygnał.

Dla problemu podziału sygnału zielonego pomiędzy różne grupy użytkowników (por. rozdział 7.4) skonstruowano zestawy wyrażające zmienne preferencje użytkowników jednej z grup. Rosnące wymagania w ocenie elementu infrastruktury zamodelowano poprzez wzrastające wartości parametru e funkcji F_{SV} . Przykładowy wykres zależności zmiennej r_{DV} od wymagań użytkowników pokazano na rysunku 7.21.

Wskazano, że niezależnie od stosowanego zestawu wielkości oraz od charakteru zadania, poprzez specyficzny dobór wartości parametrów cząstkowych funkcji oceny można modyfikować wynik oceny elementu infrastruktury w przypadkach stosowania prostych sytuacji sterowania ruchem (sygnalizacja stałoczasowa) i problemów polegających na podziale dostępnej przestrzeni (przepustowości).



Rys. 7.21. Zależność zmiennej r_{DV} od parametru e_V w zadaniu podziału sygnału zielonego

Jako zmienną w problemie zamiany kolejności faz (por. rozdział 4.5) przyjęto straty czasu D_h . Jest to jednocześnie zmienna dla cząstkowych funkcji oceny wyrażających akceptację niedogodności sterowania ruchem – F_A . Im wyższe straty czasu dla

danej fazy h , tym mniejsza wartość funkcji akceptacji w tej grupie. Suma strat czasu dla grup opozycyjnych względem h jest zmienną funkcji satysfakcji dla grupy h . Stąd łączna wartość strat czasu, limitowana dopuszczalnymi długościami poszczególnych faz jest specyficznym zasobem elementu infrastruktury rozpatrywanego w niniejszym zadaniu.

Zakładając określone wartości graniczne strat czasu skonstruowano zestaw podstawowy parametrów funkcji satysfakcji i akceptacji. Parametry b , c funkcji F_A dobrano z zestawu użytkowników mniej wymagających (tab. 5.28, jako maksimum dopuszczalnych wartości). Parametry d , e funkcji F_S obliczono na podstawie wartości parametrów b , c (sumy dla grup opozycyjnych). Wartości parametrów zestawiono w tabeli 7.14.

Tabela 7.14. Wartości parametrów cząstkowych funkcji oceny w zestawie podstawowym zadania zamiany kolejności faz

Parametr	b	c	d	e
Wartość	21	28	63	84

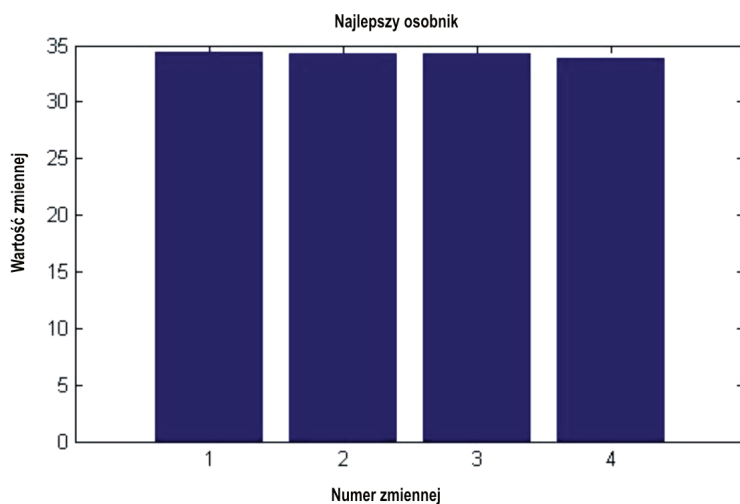
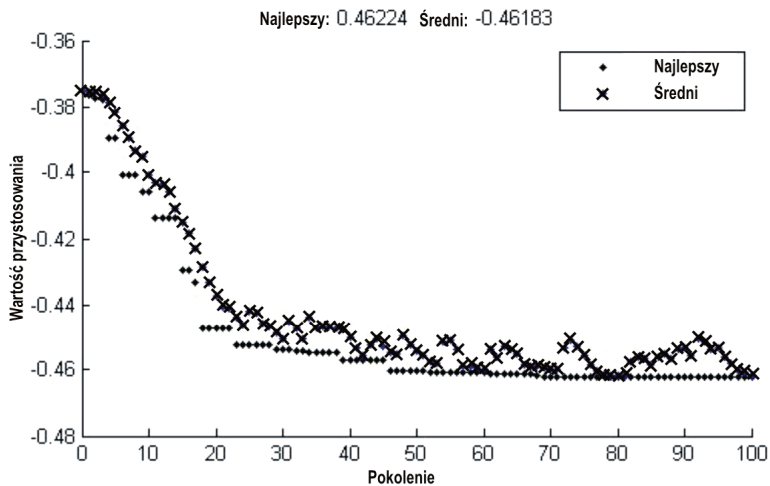
Wykorzystując parametry cząstkowych funkcji oceny zestawu podstawowego (tab. 7.14) oraz przyjmując je jako identyczne dla każdej z faz uzyskano zestaw testowy, którego rozwiązanie w formie graficznej pokazano na rysunku 7.22. Uzyskano zgodne z intuicją identyczne wartości granicznych strat czasu dla wszystkich faz. Odpowiada to sytuacji gdy żadnej z grup nie nadano priorytetu.

W dalszej kolejności analiz założono priorytet dla grupy użytkowników powiązanych z fazą I odpowiednio modyfikując parametry funkcji F_S i F_A . Zmodyfikowane wartości parametrów zestawiono w tabeli 7.15. Uzyskano wynik pokazany na rysunku 7.23. Grupa z priorytetem ma graniczne straty czasu o niższej wartości od pozostałych grup. Faza skojarzona z tą grupą powinna być przywoływana wcześniej od pozostałych.

Tabela 7.15. Zmodyfikowane wartości parametrów cząstkowych funkcji oceny zadania zamiany kolejności faz

Parametr	b	c	d	e
Wartość	12	19	36	57

Opracowano także zestaw zróżnicowany, gdzie do poszczególnych faz przypisano priorytety o odmiennym stopniu. W niniejszym zadaniu oznacza to zróżnicowane wartości parametrów cząstkowych funkcji oceny. Wartości te zestawiono w tabeli 7.16. Wynik rozwiązania zadania ilustruje rysunek 7.24. Uzyskano różne wartości granicznych strat czasu stosownie do założonego stopnia priorytetu.

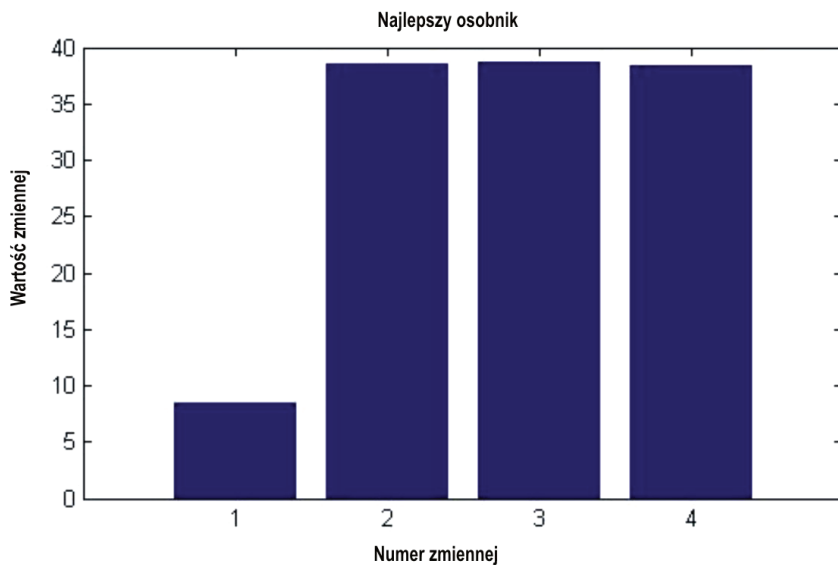
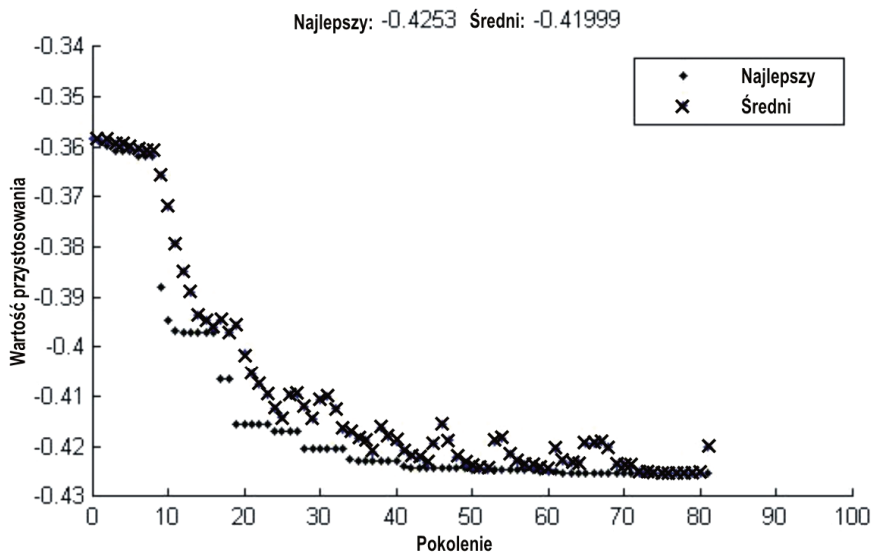


stop

Rys. 7.22. Wyniki dla zestawu testowego zadania zamiany kolejności faz

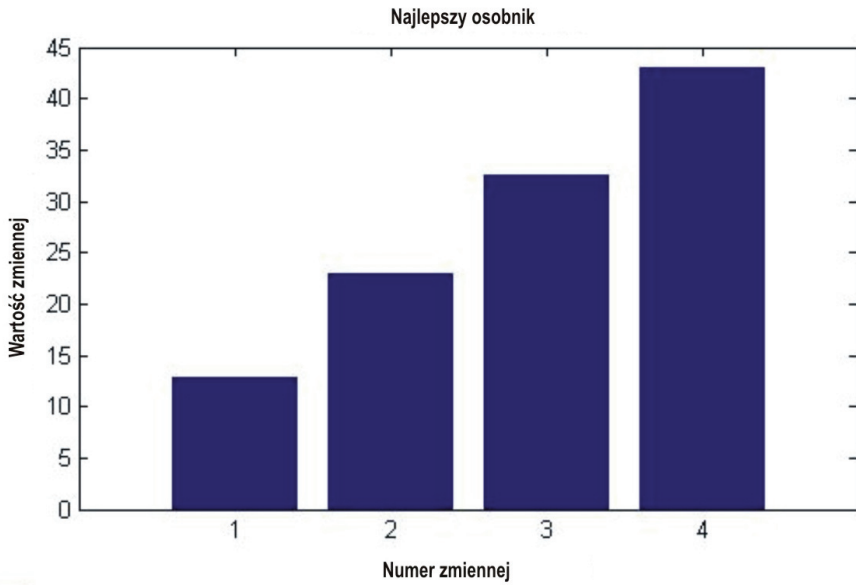
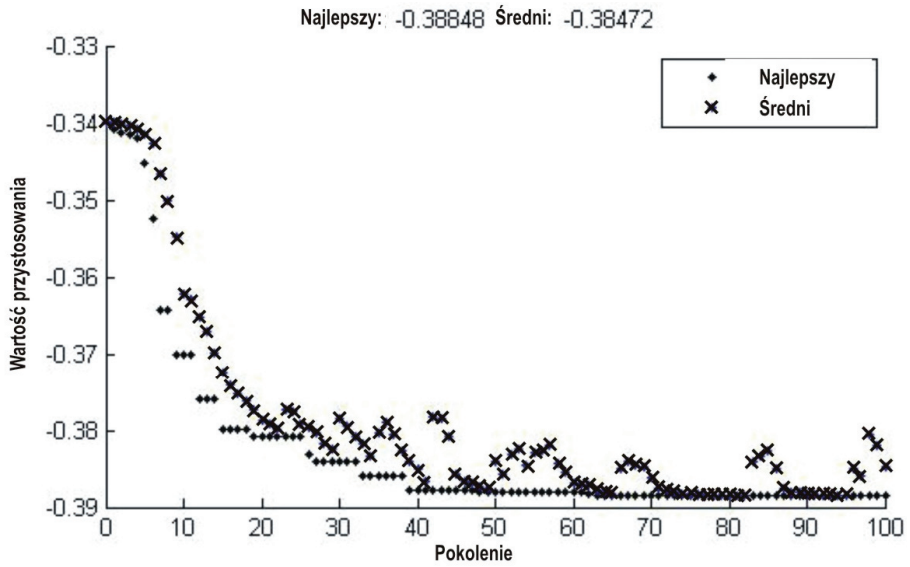
Tabela 7.16. Wartości parametrów cząstkowych funkcji oceny w zestawie zróżnicowanym zadania zamiany kolejności faz

Parametr	b	c	d	e
Faza I (grupa 1)	12	19	36	57
Faza II (grupa 2)	15	22	45	66
Faza III (grupa 3)	18	25	54	75
Faza IV (grupa 4)	21	28	63	84



stop

Rys. 7.23. Modyfikacja zestawu podstawowego zadania zamiany kolejności faz



stop

Rys. 7.24. Wyniki dla zestawu zróżnicowanego zadania zamiany kolejności faz

Sterownik sygnalizacji dostosowującej się do zmian ruchu ma modyfikować kolejność wyświetlania faz stosownie do zapotrzebowania zgłaszanego poprzez grupy użytkowników. Założono że będzie to wykonywane z wykorzystaniem granicznych wartości strat czasu wyznaczanych w toku rozwiązania zadania. Wartości graniczne strat czasu wynikają z wielkości opisujących ruch, takich jak jego natężenie, czy natężenie nasycenia. Wyznaczając je uwzględnia się także wpływ geometrii wlotu, czy efekt koordynacji z innym skrzyżowaniem. Wynik rozwiązania zadania zależy tu także od preferencji użytkowników wyrażonych wartościami parametrów cząstkowych funkcji oceny – F_S i F_A . Brak różnic w preferencjach wyrażony identycznymi wartościami wszystkich parametrów oznacza takie same wartości granicznych strat czasu dla każdej z faz. Sterownik uruchamia wtedy poszczególne fazy według pierwotnej i niezmiennianej kolejności. Gdy preferencje w danej grupie rosną, to znacząco się zmieniają wymagania użytkowników w ocenie elementu infrastruktury, co realizuje się poprzez zmniejszanie wartości parametrów funkcji F_A i zwiększanie wartości parametrów funkcji F_S , wtedy maleją wartości granicznych strat czasu. Sterownik rejestrujący aktualne wartości strat czasu na danym wlocie musi wtedy inaczej realizować kolejność faz. Przy mniejszych wartościach granicznych strat czasu konkretna faza ruchu powinna być przywoływana szybciej, przy założeniu, że pozostałe wielkości charakteryzujące ruch są identyczne lub zbliżone.

W powyższym zadaniu poprzez specyficzny dobór parametrów funkcji satysfakcji i akceptacji uwzględniono wprowadzenie priorytetu dla określonej grupy użytkowników. Taki sposób uwzględniania priorytetów ma jednak inny charakter niż poprzez stosowanie wag. W tym drugim przypadku (por. rozdział 7.4) preferencje mają charakter zewnętrzny i wyrażają wpływ decydenta zarządzającego systemem transportu na ocenę elementu infrastruktury i jego ostateczny kształt. Preferencje wyrażane doborem parametrów cząstkowych funkcji oceny odpowiadają lokalnej specyfice oceny elementu infrastruktury przez jej użytkowników, w tym także uwzględniając odbiór aktualnego stanu infrastruktury. Decydujące w tym przypadku są cechy związane z percepcją populacji korzystającej z ocenianego elementu infrastruktury.

8. Podsumowanie

Podstawowym osiągnięciem niniejszej monografii jest skonstruowanie uniwersalnej metody opisu elementów infrastruktury drogowej. Oprócz ujęcia tradycyjnych wielkości charakteryzujących geometrię drogi oraz ruch jej użytkowników uwzględniono rolę wymagań poszczególnych grup użytkowników. Analizy różnych grup użytkowników, w tym podróżujących w pojazdach transportu zbiorowego, pieszych i rowerzystów, wymagały stworzenia zestawu zunifikowanych wielkości i związanych z nimi jednostek. Jest to kolejnym, ważnym osiągnięciem autora monografii. Konsekwentnie koncentrowano się na użytkowniku, jako podstawowej jednostce analiz, co odpowiada humanistycznemu podejściu do projektowania i oceny elementów infrastruktury drogowej. Wielkości wykorzystywane i konstruowane w pracy mają charakter rozmyty i jako takie lepiej przybliżają opis techniczny do ludzkiej percepcji konkretnych zjawisk. Kalibracja określonych wielkości, dla konkretnych elementów infrastruktury, wnosi kolejne, oryginalne elementy opisu obiektów budowlanych (rzeczywistości).

Stworzony w monografii model elementu infrastruktury drogowej obejmuje wszystkich użytkowników oraz nadaje się do opisu elementu sieci drogowej w postaci węzła lub odcinka międzywęzłowego. Skonstruowano więc uniwersalną metodę opisu geometrii drogi i ruchu użytkowników zawierającą także zunifikowane jednostki. Dotychczas stosowane sposoby opisu elementów infrastruktury powinny zostać zmodyfikowane stosownie do zestawu wielkości i jednostek wyprowadzonego przez autora niniejszej monografii. Wobec powyższego udowodniono pierwszą tezę monografii, że możliwy jest zintegrowany opis elementu infrastruktury drogowej w postaci węzła lub odcinka międzywęzłowego uwzględniający specyfikę użytkowników z różnych grup.

Skonstruowano metodę oceny elementu infrastruktury drogowej bazującą na autorskim modelu obejmującym opis elementu infrastruktury oraz poszczególne grupy użytkowników. W metodzie oceny wykorzystano oryginalny zestaw funkcji oraz warunkowań dopasowany do charakteru rozwiązywanych zadań. Metoda nadaje się do korygowania sposobów obliczania przepustowości i warunków oceny ruchu drogowego z rozwinięciem ich na wszystkie grupy użytkowników. Kompleksowy opis wszystkich części elementu infrastruktury pozwala także na ocenę wariantów realizacji bądź zagospodarowania.

Ocena i wybór wariantu są istotnym elementem studiów wykonalności. Wobec dużej dynamiki przyrostu inwestycji, a w tym dofinansowywanych ze źródeł zewnętrznych (na przykład ze środków Unii Europejskiej) zasadne jest wykorzystanie autorskich narzędzi oceny jakości danego projektu (w sensie szeroko rozumianej tu jakości wykonania lub sterowania ruchem). Prezentowana w pracy metoda oceny przydatna będzie przy wyborze wariantów jako element oceny wielokryterialnej. Wartości funkcji oceny dla konkretnych opcji pozwolą uszeregować je stosownie do kryteriów formułowanych przez użytkowników z różnych grup, a składniki wagowe umożliwią ingerencje decydenckie stosownie do prowadzonej polityki transportowej, czy kierunków planowania przestrzennego.

Metoda autora niniejszej monografii stanowić więc może także efektywne narzędzie wdrażania i realizacji zasad polityki transportowej. Wprowadzanie konkretnych sposobów zarządzania ruchem (także w sensie kształtowania geometrii drogi) dla określonych obszarów miasta podlegać będzie racjonalnej ocenie efektywności poprzez szerokie możliwości ważenia preferencji użytkowników oraz wprowadzania dodatkowych priorytetów dla wybranych grup. Konkretnie wielkości opisujące element infrastruktury stają się zasadne w obszarach o zaplanowanych priorytetach dla transportu zbiorowego oraz dla pieszych i rowerzystów. W innych obszarach, takich jak obwodnice, czy trasy wylotowe, korzystniejsze okazuje się preferowanie płynności ruchu ogólnego.

Prezentowane tu podejście może być także wykorzystane jako narzędzie wspomaganie planowania przestrzennego oraz przy tworzeniu studiów zagospodarowania, czy strategii rozwoju określonych obszarów. Z podanych wyżej względów skonstruowana metoda nadaje się do zastosowania przy porównywaniu i ocenie konkretnych sytuacji. Istotna jest tu także możliwość stosowania w metodzie szeregu uproszczeń, indywidualnego doboru zestawu wielkości do charakteru zadania, opisu zarówno poszczególnych jednostek, jak i także zbiorowości, pomijania wybranych grup. Właściwy wybór realizacji zarówno na etapie planowania, projektu, jak i wykonawstwa – w sensie dopasowania efektów rozwiązania do przyjętych oczekiwań użytkowników z różnych grup, ma także aspekt ekonomiczny. Inwestycja dobrze wpasowująca się w oczekiwania użytkowników i jako taka wysoko oceniana, nie musi być korygowana. Niezmiennie służy przez długie lata i wpisuje się w ciąg dobrze zaplanowanych realizacji. Tym samym zaangażowane środki stają się efektywnie wykorzystane.

W ten sposób udowodniono drugą tezę monografii: możliwa jest ocena elementów infrastruktury z uwzględnieniem potrzeb i specyfiki użytkowników różnych grup z uwzględnieniem wpływu liczebności grup i innych aspektów.

Istotnym osiągnięciem pracy jest wykorzystanie algorytmów genetycznych, jako nowoczesnych i efektywnych narzędzi rozwiązywania zadań oceny elementów infrastruktury. Na przykładach pokazano użyteczność skonstruowanego modelu oraz efektywność autorskiej metody oceny, także na tle dotychczas stosowanych metod i włączwszy w to zbudowane narzędzia komputerowe. Dodatkowo pokazano, że modyfikując kon-

kretnie elementy metody, takie jak: wagi, parametry funkcji oceny i jej postać, uwzględnia się różne stopnie priorytetów dla określonych grup użytkowników stosownie do sformułowanych przez nich preferencji oraz oczekiwań decydentów.

Użyte w metodzie autora nowoczesne narzędzia grupowania rozmytego oraz optymalizacji w oparciu o algorytmy genetyczne wpisują się w rozwijane obecnie narzędzia tak zwanych inteligentnych systemów sterowania ruchem (z grupy inteligentnych systemów transportowych – *Intelligent Transportation Systems, ITS*). Prezentowane tu algorytmy nadają się do wprowadzenia do sterowników sygnalizacji drogowej. Metoda oceny oraz kalibracja parametrów stosownych wielkości uwzględniające wymagania użytkowników stają się podstawą strategii i algorytmów obszarowego sterowania ruchem. Parametry strategii takiego sterowania zmienia się w czasie rzeczywistym stosownie do modyfikacji wymagań użytkowników z różnych grup kalibrowanych na podstawie oceny wartości poszczególnych parametrów.

W tej grupie kierunków wykorzystania elementów pracy pojawiają się najbardziej interesujące perspektywy rozwoju. Wymagają one dalszych badań. Udowodniono jednak trzecią tezę monografii, że możliwa jest konstrukcja efektywnych narzędzi heurystycznych: grupowania rozmytego i algorytmów genetycznych do oceny elementów infrastruktury drogowej według sformułowanej metody.

W rozdziale 7 pokazano rozwiązania typowych problemów z zakresu oceny elementów infrastruktury drogowej. Prezentowane problemy podzielono na trzy kategorie, wiążąc je z: czasem w sygnalizacjach stałoczasowych, przestrzenią elementu infrastruktury i z kompleksowym ujęciem czasu i przestrzeni w sygnalizacjach dostosowujących się do zmian ruchu użytkowników drogi. Zastosowana metoda oraz narzędzia pozwalają ocenić element infrastruktury oraz wybrać najlepszą opcję uwzględniając oceny użytkowników dla następujących problemów: przydział długości sygnałów stosownie do zapotrzebowania, podział sygnału pomiędzy opozycyjne grupy użytkowników, modyfikacje planów sygnalizacji polegające na wydłużaniu lub skracaniu faz oraz na zamianie ich kolejności, dobór elementów przekroju poprzecznego drogi stosownie do wymagań użytkowników z różnych grup, przydział pasów ruchu stosownie do zapotrzebowania. Uzyskane rozwiązania kształtują element infrastruktury stosownie do preferencji użytkowników z różnych grup oraz stosownie do wag narzuconych przez zarządzającego systemem transportu. Uwzględnia się przydzielanie priorytetów dla wybranych grup użytkowników, na przykład pieszych lub podróżujących w pojazdach transportu zbiorowego. Pokazano, że preferowanie konkretnych grup użytkowników możliwe jest na kilka sposobów. Testowano wpływ szeregu składników metody na wynik rozwiązania zadań: postaci funkcji oceny (ujmując w tym liczbę użytkowników w danej grupie), preferencji wyrażonych wagowo, wymagań użytkowników wyrażonych parametrami cząstkowych funkcji oceny (satisfakcji, F_S i akceptacji, F_A).

Stosownie do zróżnicowanych uwarunkowań poszczególnych zadań, zastosowano w nich odmienne wielkości będące zmiennymi w procesie oceny. Jako wielkości po-

zytywne (zmienne funkcji satysfakcji) użyto: rezerwę przepustowości, prędkość, długości sygnału zielonego, szerokości pasa ruchu oraz ekwiwalent E_2 . Jako wielkości negatywne (zmienne funkcji akceptacji) wykorzystywano: natężenie ruchu, stopień wykorzystania przepustowości, straty czasu i ekwiwalent E_1 . Najwyżej oceniane wartości zmiennych zależą od stopnia akceptacji i satysfakcji wyrażonego odpowiednimi parametrami funkcji F_S i F_A . Stosowaną jednostką jest użytkownik (osoba). Przeliczenie konkretnych wartości na pojazdy wymaga przyjęcia lub identyfikacji średnich napełnień w pojazdach. Limitowanym zasobem elementu infrastruktury były: łączna długość sygnału zielonego, szerokość pasa drogowego oraz dopuszczalne zmiany w długościach sygnałów. Zasób ma więc charakter zarówno czasu, jak i przestrzeni (przepustowości). Specyficzną wielkością pozytywną stała się także suma strat czasu (a więc wielkości negatywnych) dla grup opozycyjnych. Określiło to oryginalny zasób elementu infrastruktury, jako pułap łącznie akceptowalnej sumy strat czasu wszystkich grup. W sytuacji oparcia zadania na wydłużeniach sygnałów zasób został sformułowany jako maksymalna dopuszczona suma wydłużeń sygnałów dla wszystkich grup. Jednocześnie pokazano problemy w których nie występuje określona wartość zasobu.

Wykazano, że rozwiązanie zadań nie zależy tylko od wielkości opisujących geometrię drogi i zasady sterowania ruchem. Istotne są: wymagania użytkowników, w oparciu o które wyznaczane są parametry cząstkowych funkcji oceny (uwarunkowania lokalne) oraz konkretna postać funkcji oceny inaczej uwzględniająca wpływ grup o większej liczebności. W jednym z problemów pojęcie dominującej grupy utożsamiono z wlotem, którego użytkownicy formułują wysokie wymagania co do satysfakcji z elementu infrastruktury i niskie co do akceptacji strat czasu. Podobne znaczenie ma utożsamienie grupy dominującej z konkretnymi użytkownikami drogi. W dotychczasowych metodach (szczególnie w stosowanych w Polsce) nie było możliwe ujęcie wszystkich wyżej wymienionych aspektów.

Modyfikując wartości parametrów cząstkowych funkcji oceny uzyskuje się efekt zastosowania priorytetu o dowolnym stopniu dla poszczególnych użytkowników (na przykład dokonując zamiany kolejności faz, jeżeli rzeczywiste straty czasu zbliżają się do wartości granicznych wyznaczanych z rozwiązania zadania). Parametry cząstkowych funkcji oceny odzwierciedlają stopień priorytetu dla konkretnych relacji, bądź grupy użytkowników.

Innym sposobem nadania priorytetu jest zastosowanie wag na cząstkowe funkcje oceny – F_S i F_A . Ocena elementu infrastruktury wyrażana przez użytkowników z poszczególnych grup wartościami parametrów funkcji F_S i F_A jest niezależna od przypisywanych im priorytetów. Jak pokazano na przykładowych zestawach danych nawet przy identycznych preferencjach użytkowników w każdej z grup możliwe jest uzyskanie różnych rozwiązań w zależności od przyjętych wag, a tym samym i stopnia priorytetu. Odzwierciedla się w tym przypadku wpływ czynników zewnętrznych – zarządzającego systemem transportu (czy szerzej: miastem) poprzez ustalanie zasad polityki transportowej, konkretne działania na jakimś ciągu transportowym, inne uwa-

runkowania lokalne (na przykład uspokojenie ruchu). W ten sposób uzyskiwane jest rozwiązanie pożądane przez decydenta, niezależnie od lokalnych preferencji użytkowników.

Nieco mniejsze jest znaczenie liczebności grup, zwłaszcza wobec przyjętej metody uwzględniania pojedynczych użytkowników (w tym podróżujących w pojazdach), a nie pojazdów. Preferowane są w ten sposób środki transportu zbiorowego przewożące więcej osób w pojedynczym pojeździe oraz ruch pieszy i rowerowy jako zużywające mniej powierzchni w przewozie pojedynczego użytkownika.

Pokazano wykorzystanie specyficznych zmiennych, którymi są ekwiwalenty agregujące stosowne wielkości opisujące ruch: prędkość, przepustowość i straty czasu. Wyznaczenie wartości tych agregowanych wielkości wymaga przyjęcia określonych wartości minimalnych lub maksymalnych. Tak więc konkretna wartość danej wielkości zależy nie tylko od parametrów zadania (na przykład od parametrów cząstkowych funkcji oceny), ale także od przyjętych poziomów odniesienia dla danej wielkości. Metoda skonstruowana i wykorzystywana w niniejszej monografii pośrednio uwzględnia oddziaływania polityczne i odwzorowuje ich wpływ na proces oceny elementu infrastruktury. Wykorzystanie ekwiwalentów, a nie tradycyjnych wielkości opisujących ruch, pozwala na ujęcie złożoności postrzegania warunków ruchu poprzez użytkowników, którzy nie kierują się ścisłymi wartościami konkretnych wielkości, a jedynie subiektywnym odczuciem, nierzadko mylnie interpretując obserwowaną sytuację.

Na podstawie uzyskanego zestawu wyników modyfikuje się element infrastruktury (w tym sterowanie ruchem), tak aby osiągnąć ocenę użytkowników zbliżoną do rozwiązania o najwyższej ocenie. Zastosowanie proponowanej metody do oceny elementów infrastruktury nie ogranicza się tylko do etapu projektowania takich rozwiązań. W oparciu o prezentowany algorytm określono zasady pracy sterownika sygnalizacji, który aktualizowałby pracę stosownie do preferencji użytkowników dla poszczególnych wlotów (lub relacji). Preferencje oceniane są na bieżąco stosownie do danych z detektorów oraz przyjętej metody przekształcania tych danych na parametry cząstkowych funkcji oceny. Prostota użytego algorytmu pracy pozwala na prowadzenie takich działań w czasie rzeczywistym (*on line*).

Ponadto, jeżeli dysponuje się wariantami zagospodarowania elementu infrastruktury (na przykład przeznaczenia poszczególnych pasów ruchu), to po wyznaczeniu wartości zmiennych dla grup w konkretnych wariantach, bezproblemowy jest wybór opcji najbliższej najwyżej ocenionemu wariantowi. Pokazuje to zastosowanie metody jako narzędzia wyboru wariantów albo sposobu poszukiwania rozwiązania najbardziej efektywnego.

Kierunki dalszych badań wyznaczone opisywaną w pracy metodologią są omówione w rozbiciu na dwa aspekty. Po pierwsze wymienia się składniki metody, które mogą być uzupełniane i doskonalone. Zasadne jest przetestowanie jeszcze innych wielkości opisujących element infrastruktury drogowej jako potencjalnych zmiennych

dla funkcji oceny. Szczególnie dotyczyć to może wielkości dla problemów nie rozpatrywanych w niniejszej monografii. Dla nieporuszanych tu problemów efektywniejsze mogą być inne, od badanych, wielkości. Zasadne jest konstruowanie kolejnych ekwiwalentów jako wielkości agregowanych. Dla nowo wprowadzanych i konstruowanych wielkości konieczna będzie ich kalibracja zgodnie z wprowadzonymi zasadami (kalibracja wielkości opisywanych przez pojedyncze zmienne).

Rozwinięcie proponowanej metodologii wiąże się z wyspecyfikowanymi wyżej potencjalnymi zastosowaniami osiągnięć pracy autora. Rozwijając ten aspekt badań należy opracować skorygowane metody obliczania przepustowości oraz oceny warunków ruchu z uwzględnieniem autorskiego zestawu wielkości oraz przypisanych im jednostek. Rozwój tych metod będzie obejmować aspekty: uwzględniania różnych grup użytkowników drogi, rozmytej oceny jakości elementu infrastruktury, koncentracji analiz na pojedynczych użytkownikach, w tym z grup niechronionych. Na bazie prezentowanych tu przemysłów skonstruować można metodę wielokryterialnej oceny inwestycji drogowych, do porównywania i wyboru wariantów konkretnych inwestycji. Badania w tym zakresie powinny dotyczyć: elementów metody, zakresu stosowanych kryteriów (wielkości), zasadności i zakresu stosowanych wag. Wielokryterialna metoda oceny elementów infrastruktury drogowej z uwagi na jej uniwersalność i elastyczność znalazłaby zastosowanie nie tylko w klasycznych studiach wykonalności, ale także przy innych opracowaniach planistycznych. Badania nad tak szerokim wykorzystaniem metody oceny bazującej na metodologii niniejszej monografii polegać powinny każdorazowo na konstrukcji zestawu kryteriów i wag stosownie do rangi zadania. Konieczne także byłoby odwołanie się do, wyżej wymienionych, badań polegających na identyfikacji wielkości występujących w funkcjach oceny i kalibracji ich parametrów oraz ewentualnie także na innych modyfikacjach metody.

Wyżej określone kierunki badań mogą mieć zarówno charakter analityczny, jak i użytkowy. W aspekcie użytkowym konieczne byłoby opracowanie odpowiednich narzędzi komputerowych (programy, procedury i aplikacje), skonstruowanych na podstawie aspektów analitycznych, które umożliwiłyby popularyzację i wykorzystanie elementów metody. Przyczynkiem do tych prac są pakiety programów FUZZY i GAFRO opracowane i wykorzystywane przez autora monografii.

Powyższe elementy szczególnie dotyczą badań nad zastosowaniem prezentowanej tu metodologii w systemach ITS. Rozwój tych systemów potrzebuje złożonych i uniwersalnych metod oraz narzędzi. Architektura rozbudowanych systemów ITS wymaga z jednej strony umożliwienia kompleksowego zastosowania ich w wielu dziedzinach planowania i zarządzania ruchem drogowym, przy zapewnieniu wymogu koordynacji różnych działań. Z drugiej strony formułowany jest warunek otwartości systemu, który rozumie się jako tworzenie metod i procedur nie przypisywanych konkretnym elementom systemu (w tym konkretnym produktom), lecz identycznych na wszystkich poziomach zarządzania i sterowania ruchem. Wykorzystanie kompleksowej metody o zunifikowanym zestawie wielkości i jednostek oraz obejmującej wszelkie aspekty

sterowania ruchem (w tym ujęcie specyfiki wszystkich grup użytkowników drogi) jest bardzo istotną składową otwartości systemu ITS. Autorska metoda oceny elementów infrastruktury drogowej spełnia powyższe postulaty. Prace nad wykorzystaniem metody autora w systemach ITS wymagają ściślejszej współpracy z producentami elementów systemów ITS, a w szczególności oprogramowania do tych elementów. Badania w tej grupie będą więc mieć bardziej charakter użytkowy niż analityczny.

Literatura

- [1] Adeli H., Karim A., *Fuzzy-wavelet RBFNN model for freeway incident detection*, Journal Of Transportation Engineering, November/December 2000.
- [2] Ahuja R.K., Orlin J.B., Pallottino S., Scutellà M.G., *Minimum Time and Minimum Cost-Path Problems in Street Networks with Periodic Traffic Lights*, Transportation Science, 2002, Vol. 36, No. 3, 326–336.
- [3] Akçelik R., Bennett S., Felton A., *Pedestrian movement characteristics at signalised intersections*, 23rd Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR 2001), Monash University, Melbourne, Australia, 10–12 December 2001.
- [4] Ali Y.M., Zhang Liangchi, *A methodology for fuzzy modeling of engineering systems*, Fuzzy Sets and Systems, 2001, 118, 181–197.
- [5] Allsop R.E., *Delay-minimising settings for fixed-time traffic signals at a single road junction*, Journal of the Institute of Mathematics and its Applications, 1971, 8 (2), 164–185.
- [6] Allsop R.E., *SIGSET: a computer program for calculating traffic signal settings*, Traffic Engineering and Control, 1971, 13 (2), 58–60.
- [7] Allsop R.E., *Estimating the traffic capacity of a signalized road junction*, Transportation Research, 1972, 6 (3), 245–255.
- [8] Allsop R.E., *Delay at a fixed time traffic signal I: theoretical analysis*, Transportation Science, 1972, 6 (3), 260–285.
- [9] Allsop R.E., *Computer program SIGCAP for assessing the traffic capacity of signal-controlled road junctions – description and manual for users*, Transportation Operations Research Group Working Paper, Vol. 11, University of Newcastle upon Tyne, 1975.
- [10] Allsop R.E., Charlesworth J.A., *Traffic in a signal-controlled road network: an example of different signal timings including different routings*, Traffic Engineering Control, 1977, 18 (5), 262–264.
- [11] Allsop R.E., *Computer program SIGSET for calculating delay-minimising traffic signal timings – description and manual for users*, Transport Studies Group Research Report, University College London 1981.
- [12] Alonso I.P., Llorca D.F., Sotelo M.Á., Bergasa L.M., de Toro P.R., Nuevo J., Ocaña M., Garrido M.Á.G., *Combination of Feature Extraction Methods for SVM Pedestrian Detection*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, June 2007, Vol. 8, No. 2.
- [13] Astarita V., Bertini R.L., d’Elia S., Guido G., *Motorway traffic parameter estimation from mobile phone counts*, European Journal of Operational Research, 2006, 175, 1435–1446.
- [14] Athanassoulis G.C., Calogero V., *Optimal location of a new highway from A to B – A computer technique for route planning*, PTRC Seminar Proceedings on Cost Models and Optimization in Highways (Session L9), London 1973.
- [15] Aultman-Hall L., Hall F., Baetz B., *Analysis of bicycle commuter routes using geographic information systems: Implications for bicycle planning*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1578, TRB, National Research Council, Washington, DC., 1997, 102–110.

- [16] Azimi Z.N., *Hybrid heuristics for Examination Timetabling problem*, Applied Mathematics and Computation, 2005, 163, 705–733.
- [17] Bajerowski T., *Niepewność w dynamicznych układach przestrzennych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2003.
- [18] Beckmann M.J., McGuire C.B., Winsten C.B., *Studies in the Economics of Transportation*, Yale University Press, New Haven 1956.
- [19] Belitsky V., Krug J., Neves E.J., Schütz G.M., *A Cellular Automaton Model for Two-Lane Traffic*, Journal of Statistical Physics, 2001, Vol. 103, No. 5/6.
- [20] Bell M.G.H., *Future directions in traffic signal control*, Transport. Res., 1992, 26, 303–313.
- [21] Ben Shahr H., Mazor A., Pines D., *Town planning and welfare maximization: a methodological approach*, Regional Studies, 1969, 3, 105–113.
- [22] Bergendahl G., *Models for investments in a road network*, Bonniers, Stockholm 1969.
- [23] Bernhoft I.M., Carstensen G., *Preferences and behaviour of pedestrians and cyclists by age and gender*, Transportation Research, Part F, 2008, 11, 83–95.
- [24] Białynicki-Birula I., Białynicka-Birula I., *Modelowanie rzeczywistości*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2002.
- [25] Bień J., *Modelowanie obiektów mostowych w procesie ich eksploatacji*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 2002.
- [26] Boarnet M.G., Sarmiento S., *Can land-use policy really affect travel behavior? A study of the link between non-work travel and land-use characteristics*, Urban Studies, 1998, 35, 1155–1169.
- [27] Bonneson J.A., *Lane volume and saturation flow rate for multilane intersection approach*, Journal of Transportation Engineering, 1998, 124 (3), 240–245.
- [28] Bovy P., Bradley P., *Route choice analyzed with stated preference approaches*, Transportation Research Record 1037, TRB, National Research Council, Washington, D.C. 1985.
- [29] Broek van den M.S., van Leeuwen J.S. H., Adan I.J.B.F., Boxma O.J., *Bounds and Approximations for the Fixed-Cycle Traffic-Light Queue*, Transportation Science, November 2006, Vol. 40, No. 4, 484–496.
- [30] Burhardt K.K., *Urban traffic system optimization*, Ph.D. Dissertation, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota 1971.
- [31] Burrow I.J., *OSCADY: a computer program to model capacities, queues and delays at isolate traffic signal junctions*, TRRL Report, Vol. 105, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne 1987.
- [32] Caird J.K., Chisholm S.L., Edwards C.J., Creaser J.I., *The effect of yellow light onset time on older and younger drivers' perception response time (PRT) and intersection behavior*, Transportation Research, Part F, 2007, 10, 383–396.
- [33] Cannon M., Kouvaritakis B., Huang G., *Modelling and optimisation for sustainable development policy assessment*, European Journal of Operational Research, 2005, 164, 475–490.
- [34] Cantarella G.E., Pavone G., Vitetta A., *Heuristics for urban road network design: Lane layout and signal settings*, European Journal of Operational Research, 2006, 175, 1682–1695.
- [35] Cervero R., Gorham R., *Commuting in transit versus automobile neighborhoods*, Journal of the American Planning Association, 1995, 61, 199–219.
- [36] Ceylan H., Bell M.G.H., *Traffic signal timing optimisation based on genetic algorithm approach, including drivers' routing*, Transportation Research, Part B, 2004, 38, 329–342.
- [37] Ceylan H., *Developing Combined Genetic Algorithm—Hill-Climbing Optimization Method for Area Traffic Control*, Journal of Transportation Engineering, August 2006.
- [38] Chakroborty P., *Genetic algorithms for optimal urban transit network design*, Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2003, 18, 184–200.

- [39] Chan C.Y., *Characterization of Driving Behaviors Based on Field Observation of Intersection Left-Turn Across-Path Scenarios*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, September 2006, Vol. 7, No. 3, 322–331.
- [40] Chang T.H., Lin J.T., *Optimal signal timing for an oversaturated intersection*, Transportation Research, Part B, 2000, 34, 471–491.
- [41] Chapra S.C., Canale R.P., *Numerical Methods for Engineers*, McGraw-Hall, Inc., New York 1988.
- [42] Cheng S.F., Epelman M.A., Smith R.L. *CoSIGN: A Parallel Algorithm for Coordinated Traffic Signal Control*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, December 2006, Vol. 7, No. 4.
- [43] Chew E.P., Goh C.J., Fwa T.F., *Simultaneous optimization of horizontal and vertical alignments for highways*, Transportation Research, Part B, 1989, 23 (5), 315–329.
- [44] Chien S., Yang Z., Hou E., *Genetic algorithm approach for transit route planning and design*, Journal of Transportation Engineering, May/June 2001.
- [45] Chiou Yu-Chiun, Lan Lawrence W., *Genetic clustering algorithms*, European Journal of Operational Research, 2001, 135, 413–427.
- [46] Chmielewski J., *Model rozkładu potoków pasażerskich na linie transportu publicznego*, Praca Doktorska (niepublikowana), Akademia Techniczno Rolnicza Bydgoszcz, 2002.
- [47] Chow A.H.F., Lo H.K., *Sensitivity analysis of signal control with physical queuing: Delay derivatives and an application*, Transportation Research, Part B, 2007, 41, 462–477.
- [48] Chung K., Rudjanakanoknad J., Cassidy M.J., *Relation between traffic density and capacity drop at three freeway bottlenecks*, Transportation Research, Part B, 2007, 41, 82–95.
- [49] Clay M.J., Johnston R.A., *Multivariate uncertainty analysis of an integrated land use and transportation model: MEPLAN*, Transportation Research, Part D, 2006, 11, 191–203.
- [50] Coifman B., *Vehicle Level Evaluation of Loop Detectors and the Remote Traffic Microwave Sensor*, Journal of Transportation Engineering, March 2006.
- [51] Coifman B., Krishnamurthy S., *Vehicle reidentification and travel time measurement across freeway junctions using the existing detector infrastructure*, Transportation Research, Part C, 2007, 15, 135–153.
- [52] Cronje W.B., *Optimization model for isolated signalized traffic intersections*, Transportation Research Record, 1983, 905, 80–83.
- [53] Cyrson E. (red.), *Kompendium wiedzy o gospodarce. Wybór ekonomiczny*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Poznań 1996.
- [54] Dans G., Gazis D.C., *Optimal control of oversaturated store-and-forward transportation networks*, Transportation Science, 1976, 10 (1), 1–19.
- [55] Datka S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu*, WKiŁ, Warszawa 1999.
- [56] Demirli K., Molhim M., *Fuzzy dynamic localization for mobile robots*, Fuzzy Sets and Systems, 2004, 144, 251–283.
- [57] Depreitere B., Van Lierde C., Maene S., Plets Ch., Vander Sloten J., Van Audekercke R., Van der Perre G., Goffin J., *Bicycle-related head injury: a study of 86 cases*, Accident Analysis and Prevention, 2004, 36, 561–567.
- [58] Devillez A., Billaudel P., Lecolier G.V., *A fuzzy hybrid hierarchical clustering method with a new criterion able to find the optimal partition*, Fuzzy Sets and Systems, 2002, 128, 323–338.
- [59] Dharia A., Adeli H., *Neural network model for rapid forecasting of freeway link travel time*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2003, 16, 607–613.
- [60] Dickson T.J., *A note on traffic assignment and signal timings in a signal-controlled road network*, Transportation Research, 1981, 15B (4), 267–271.
- [61] Dill J., Carr T., *Bicycle commuting and facilities in major U.S. cities: If you build them, commuters will use them – another look*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 2003.

- [62] Dimitriadou E., Weingessely A., Hornikz K., *A combination scheme for fuzzy clustering*, International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2002, Vol. 16, No. 7, 901–912.
- [63] Dinopoulou V., Diakaki Ch., Papageorgiou M., *Applications of the urban traffic control strategy TUC*, European Journal of Operational Research, 2006, 175, 1652–1665.
- [64] Dion F., Rakha H., Kang Y.S., *Comparison of delay estimates at under-saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections*, Transportation Research, Part B, 2004, 38, 99–122.
- [65] Dion F., Hellinga B., *A rule-based real-time traffic responsive signal control system with transit priority: application to an isolated intersection*, Transportation Research, Part B, 2002, 36, 325–343.
- [66] Drakopoulos A., Ornek E., *Use of vehicle-collected data to calculate existing roadway geometry*, Journal of Transportation Engineering, March/April 2000.
- [67] Drakopoulos A., Lyles R.W., *Preferences for permitted and protected left-turn signal displays*, Journal of Transportation Engineering, May/June 2000, 202–211.
- [68] Durango-Cohen P.L., *A time series analysis framework for transportation infrastructure management*, Transportation Research, Part B, 2007, 41, 493–505.
- [69] Dźwigoń W., *Analiza efektywności środków poprawy jakości w komunikacji miejskiej*, Praca doktorska (niepublikowana), Politechnika Krakowska, 2004.
- [70] Easa S.M., *Selection of roadway grades that minimize earthwork cost using linear programming*, Transportation Research, Part A, 1988, 22 (2), 121–136.
- [71] Elahi S.M., Radwan A.E., Goul K.M., *Knowledge-based system for adaptive traffic signal control*, Transportation Research Record, 1991, 1324, 115–122.
- [72] Elbeltagi E., Hegazy T., Grierson D., *Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms*, Advanced Engineering Informatics, 2005, 19, 43–53.
- [73] Fang C., Elefteriadou L., Pecheux K.K., Pietrucha M.T., *Using fuzzy clustering of user perception to define levels of service at signalized intersections*, Journal of Transportation Engineering ASCE, November/December 2003, 657–663.
- [74] Fang C., Elefteriadou L., *Development of an Optimization Methodology for Adaptive Traffic Signal Control at Diamond Interchanges*, Journal of Transportation Engineering, August 2006.
- [75] Felici G., Rinaldi G., Sforza A., Truemper K., *A logic programming based approach for on-line traffic control*, Transportation Research, Part C, 2006, 14, 175–189.
- [76] Foy M.D., Benekohal R.F., Goldberg D.E., *Signal timing determination using genetic algorithms*, Transportation Research Record 1365 TRB, National Research Council, Washington, DC, 1992, 108–115.
- [77] Friends of Oregon, *Making the Land Use Transportation Air Quality Connection*, vol. 4A: *The Pedestrian Environment*, LUTRAQ, with Cambridge Systematics, Inc., Calthorpe Associates and Parson Brinckherhoff Quade and Douglas, Portland 1993.
- [78] Fuzzy Logic Toolbox – Users Guide, version 2, 2001.
- [79] Fwa T.F., *Highway Vertical Alignment Analysis by Dynamic Programming*, Transportation Research Record 1239, TRB, National Research Council, Washington, DC, 1989, 1–9.
- [80] Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2009.
- [81] Gartner N.H., Stamatiadis C., Tarno P.J., *Development of advanced traffic signal control strategies for intelligent transportation systems: Multilevel design*, Transportation Research Record, 1995, 1494, 98–105.
- [82] Gasz K., Kruszyna M., *Analizy procesu zgłoszeń pieszych do przejścia przez jezdnię*, Drogi i Mosty, 2/2004.
- [83] Gazis D.C., *Optimal control of a system of oversaturated intersections*, Operations Research, 1964, 12, 815–831.

- [84] Gazis D.C., Potts R.B., *The oversaturated intersection*, Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow, Organization for Economic Cooperation and Development, Paris 1965, 221–237.
- [85] Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox – Users Guide, version 2, 2005.
- [86] Goh C.J., Chew E.P., Fwa T.F., *Discrete and continuous model for computation of optimal vertical highway alignment*, Transportation Research, Part B, 1988, 22 (9), 399–409.
- [87] Gomes G., Horowitz R., *Optimal freeway ramp metering using the asymmetric cell transmission model*, Transportation Research, Part C, 2006, 14, 244–262.
- [88] Goossens J.W., van Hoesel S., Kroon L., *On solving multi-type railway line planning problems*, European Journal of Operational Research, 2006, 168, 403–424.
- [89] Green D.H., *Control of oversaturated intersections*, Operational Research Quarterly, 1968, 18 (2), 161–173.
- [90] Guo P., Chen C.L.P., Lyu M.R., *Cluster Number Selection for a Small Set of Samples Using the Bayesian Ying–Yang Model*, IEEE Transactions on Neural Networks, May 2002, Vol. 13, No. 3.
- [91] Guzik J., Leško M., *Sterowanie ruchem drogowym – sygnalizacja świetlna i detektory ruchu pojazdów*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
- [92] Guzik J., Leško M., *Sterowanie ruchem drogowym – sterowniki i systemy sterowania i nadzoru ruchu*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
- [93] Handy S.L., *Urban form and pedestrian choices: study of Austin neighborhoods*, Transportation Research Record, 1996, 1552, 135–144.
- [94] Hawas Y.E., *Development and calibration of route choice utility models: neuro-fuzzy approach*, Journal of Transportation Engineering, March/April 2004.
- [95] Hayman R.W., *Optimization of vertical alignment for highways through mathematical programming*, Highway Research Record, Highway Research Board, 1970, 306, 1–9.
- [96] Heilpern S., *Podejmowanie decyzji w warunkach niepewności*, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej, Wrocław 2001.
- [97] Henn V., *Fuzzy route choice model for traffic assignment*, Fuzzy Sets and Systems, 2000, 116, 77–101.
- [98] Heydecker B.G., Dudgeon I.W., *Calculation of signal settings to minimise delay at a junction*, Proceedings of 10th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, MIT, Elsevier, New York 1987, 159–178.
- [99] Heydecker B.G., *Sequencing of traffic signals*, [in:] *Mathematics in Transport and Planning and Control*, J.D. Griffiths (ed.), Clarendon Press, Oxford 1992, 57–67.
- [100] Highway Capacity Manual (HCM) 2000.
- [101] Hobfoll S.E., *Conservation of resources. A new attempt at conceptualizing stress*, American Psychologist, 1989, 44, 513–523.
- [102] Hopkinson P., Wardman M., *Evaluating the demand for new cycle facilities*, Transport Policy, 1996, 2 (4), 241–249.
- [103] Howard B.E., Brammick Z., Shaw J.F.B., *Optimum curvature principle in highway routing*, Journal of the Highway Division, ASCE 94 (HW1), 1968, 61–82.
- [104] Hunt J.D., Simmonds D.C., *Theory and application of an integrated land use and transport modeling framework*, Environment and Planning, B 20, 1993, 221–234.
- [105] Improta G., Cantarella G.E., *Control system design for an individual signalized junction*, Transportation Research, 18b (2), 1984, 147–167.
- [106] *Instrukcja obliczania przepustowości dróg zamieszkiwych*, GDDP, Warszawa 1991.
- [107] *Instrukcja obliczania przepustowości dróg I i II klasy technicznej*, GDDP, Warszawa 1995.
- [108] Itakura N., Fukeda A., Honda N., Yikai K., *Evaluation Method Using Chaotic Analysis for the Model of Vehicles' Behavior in Road Traffic System*, Mathematical and Computer Modelling, 2001, 33, 771–782.

- [109] Itoh S., *Diurnal variation of urban structure in terms of time distance: A spatio-temporal analysis of an urban area*, GeoJournal, 2001, 52, 223–235.
- [110] Jabłoński M., *Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych i optymalizacji wielokryterialnej w projektowaniu kompozytu ceramicznego o podwyższonej odporności na działanie niskich temperatur*, Praca Doktorska (niepublikowana), Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, 1999.
- [111] Jarzębińska-Dziegiar A., *Optymalizacja nieliniowych sieci transportowych z wykorzystaniem algorytmów genetycznych*, Praca Doktorska (niepublikowana), Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, 2004.
- [112] Jha M.K., *A geographic information systems-based model for highway design optimization*, Ph.D. dissertation, University of Maryland, College Park, 2000.
- [113] Jha M.K., Schonfeld P., *Integrating genetic algorithms and GIS to optimize highway alignments*, Transportation Research Record, 2000, 1719, 233–240.
- [114] Jha M.K., *Criteria-based decision support system for selecting highway alignments*, Journal of Transportation Engineering, 2003, 129 (1), 33–41.
- [115] Jha M.K., Schonfeld P., *A highway alignment optimization model using geographic information systems*, Transportation Research, Part A, 2004, 38 (6), 455–481.
- [116] Jiang Y., Li S., Shamo D.E., *A platoon-based traffic signal timing algorithm for major–minor intersection types*, Transportation Research, Part B, 2006, 40, 543–562.
- [117] Jong J.Ch., *Optimizing highway alignments with genetic algorithms*, Ph.D. dissertation, University of Maryland, College Park, 1998.
- [118] Jong J.Ch., Jha M.K., Schonfeld P., *Preliminary Highway Design with Genetic Algorithms and Geographic Information Systems*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2000, 15.
- [119] Jong J.Ch., Schonfeld P., *An evolutionary model for simultaneously optimizing three-dimensional highway alignments*, Transportation Research, Part B, 2003, 37 (2), 107–128.
- [120] Josefsson M., Patriksson M., *Sensitivity analysis of separable traffic equilibrium equilibria with application to bilevel optimization in network design*, Transportation Research, Part B, 2007, 41, 4–31.
- [121] Kalic M., Teodorovic D., *Trip distribution modelling using fuzzy logic and a genetic algorithm*, Transportation Planning and Technology, June 2003, Vol. 26, No. 3, 213–238.
- [122] Kaltenbach M., Koivo H.N., *Modelling and control of urban traffic flow*, Proceedings of the Joint Automatic Control Conference, University of Texas, Houston, Texas, 1974, 147–154.
- [123] Kang S., Byun H., Lee S.W., *Real-time pedestrian detection using support vector machines*, International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2003, Vol. 17, No. 3, 405–416.
- [124] Karlaftis M.G., Golias I., *Effects of road geometry and traffic volumes on rural roadway accident rates*, Accident Analysis and Prevention, 2002, 34, 357–365.
- [125] Katsuhiko H., Ichihashi H., *Linear Fuzzy Clustering Techniques With Missing Values and Their Application to Local Principal Component Analysis*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, April 2004, Vol. 12, No. 2.
- [126] Kim E., *Modeling intersections and other structures in highway alignment optimization*, Ph.D. dissertation, University of Maryland, College Park, 2001.
- [127] Kim E., *Determinants of Optimal Level of Transportation Infrastructure*, Journal of Urban Planning And Development, September 2002.
- [128] Kim E., Jha M.K., Lovell D.J., Schonfeld P., *Intersection cost modeling for highway alignment optimization*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2004, 19 (2), 136–146.
- [129] Kim E., Jha M.K., Son B., *Improving the computational efficiency of highway alignment optimization models through a stepwise genetic algorithms approach*, Transportation Research, Part B, 2005, 39, 339–360.

- [130] Kim K.S., Benguigui L., Marinov M., *The fractal structure of Seoul's public transportation system*, Cities, 2003, Vol. 20, No. 1, 31–39.
- [131] Kitamura R., Mohktarian P.L., Laidet L., *A micro-analysis of land use and travel in five neighborhoods in the San Francisco Bay Area*, Transportation, 1997, 24, 125–158.
- [132] Klaassen L.H., *The role of traffic in physical planning of urban areas*, CEMT Symposium, Rome, September 1969.
- [133] Kockelman K.M., Cervero R., *Travel demand and the 3Ds: density, diversity and design*, Transportation Research, 1997, D 2, 199–219.
- [134] Kockelman K.M., Shabih R.A., *Effect of light-duty trucks on the capacity of signalized intersections*, Journal of Transportation Engineering, November/December 2000, 506–512.
- [135] Kogut J., *Analiza spektrum odpowiedzi drgań drogowych*, Praca Doktorska (niepublikowana), Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Mechaniki Budowli, 2000.
- [136] Komentarz do warunków technicznych jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, cz.1: Wprowadzenie, Transprojekt, Warszawa 2000.
- [137] Komentarz do warunków technicznych jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, cz.2: Zagadnienia techniczne, Transprojekt, Warszawa 2002.
- [138] Korve M.J., Niemeier D.A., *Benefit-Cost Analysis of Added bicycle Phase at Existing signalized intersection*, Journal of Transportation Engineering, January/February, 2002, 40–48.
- [139] Kosonen I., *Multi-agent fuzzy signal control based on real-time simulation*, Transportation Research, Part C, 2003, 11, 389–403.
- [140] Koyuncu M., Amado S., *Effects of stimulus type, duration and location on priming of road signs: Implications for driving*, Transportation Research, Part F, 2008, 11, 108–125.
- [141] Krawiec S., *Kształtowanie struktury ekonomicznej współczesnego systemu transportowego*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.
- [142] Krefit K., *Komputerowe modele sieci neuronowych jako narzędzia prognozowania w lądowo-morskim łańcuchu transportowym*, Praca Doktorska (niepublikowana), Uniwersytet Gdański, Wydział Ekonomiczny, Instytut Transportu i Handlu Morskiego, 2000.
- [143] Krizek K., *Operationalizing neighborhood accessibility for land use – travel behavior research and regional modeling*, Journal of Planning Education and Research, 2003, 22, 270–287.
- [144] Krizek K.J., Roland R.W., *What is at the end of the road? Understanding discontinuities of on-street bicycle lanes in urban settings*, Transportation Research, Part D, 2005, 10, 55–68.
- [145] Król M., *Optymalizacja parametrów termicznych wybranych typów okien*, Praca Doktorska (niepublikowana), Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, 2004.
- [146] Kruszyna M., Makuch J., Trzciniowicz B., *Autobus na torowisku tramwajowym we Wrocławiu*, Transport Miejski, 9/99.
- [147] Kruszyna M., *Dostępność połączeń jako kryterium konkurencyjności systemów transportu*, Transport Miejski, 11/99.
- [148] Kruszyna M., *Prędkość pieszego na przejściu przez jezdnię*, Bezpieczne Drogi, 12/99.
- [149] Kruszyna M., *Przepustowość elementów sieci komunikacji zbiorowej*, Praca Doktorska, Raport Instytutu Inżynierii Lądowej z serii PRE 41/99, Wrocław 1999.
- [150] Kruszyna M., Lutogniewski J., *Usprawnienia ruchu na konwencjonalnej trasie tramwajowej za pomocą środków inżynierii ruchu*, Transport Miejski, 1/00.
- [151] Kruszyna M., Szydło A., *A simulation research on vehicles flow in public transport network*, Archives of Transport, 4/00.
- [152] Kruszyna M., Szydło A., *Porównanie modeli: deterministycznego i stochastycznego w modelowaniu ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej*, XLVII konferencja naukowa „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Opole–Krynica, 16–21. 09.01.
- [153] Kruszyna M., *Akomodacja na przejściu dla pieszych, cz. 1 – przejścia pojedyncze*, Transport Miejski, 9/2002.

- [154] Kruszyna M., *Akomodacja na przejściu dla pieszych, cz. 2 – przejścia podwójne*, Transport Miejski, 10/2002.
- [155] Kruszyna M., *The green light time split at pedestrian crossing with consideration of different road users*, Archives of Transport, 3/2003.
- [156] Kruszyna M., *Metoda zwiększania przepustowości tras ruchu tramwajowego*, w monografii *Rejestracja i przetwarzanie danych w telematycznych systemach transportu*, wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
- [157] Kruszyna M., *Ocena systemu tras rowerowych i głównych ciągów pieszych w centrum Wrocławia ze szczególnym uwypukleniem barier ciągłości przebiegu*, w „Wrocław 2000 Plus, Studia nad strategią miasta”, zeszyt 7 (51), Wrocław 2003.
- [158] Kruszyna M., Szydło A., *Optymalizacja podziału sygnału zielonego na przejściu dla pieszych w oparciu o średnie straty czasu*, Drogi i mosty, 3/2004.
- [159] Kruszyna M., *Parametry opisujące ruch pieszych na przejściu przez jezdnię wyposażonym w sygnalizację świetlną*, L. konferencja naukowa „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Warszawa–Krynica, 12–17.09.04.
- [160] Kruszyna M., *Priorytety dla komunikacji autobusowej – przegląd metod i rozwiązań wykorzystujących dynamiczne sterowanie ruchem*, VII. Konferencja Komunikacji Miejskiej, Lubin, maj–czerwiec 2005.
- [161] Kruszyna M., *Metody heurystyczne w zagadnieniach inżynierii ruchu drogowego*, Drogownictwo, 10/2005.
- [162] Kruszyna M., Mackiewicz P., Szydło A., *Influence of entry process on pedestrians' delays at a signal controlled crossing*, Journal of Transportation Engineering, 2006, 132.
- [163] Kruszyna M., *Wykorzystanie algorytmów genetycznych w wybranych zagadnieniach inżynierii ruchu drogowego*, LII. konferencja naukowa „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Gdańsk–Krynica, 11–16.09.06; Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej 603, Budownictwo Lądowe Nr 60.
- [164] Kruszyna M., *Optymalizacja sterowania ruchem drogowym nakierowana na wymagania użytkowników z różnych grup*, Poznań 2007.
- [165] Kuo K.Y., Lin J., *Application of fuzzy set theory to the change intervals at a signalized intersection*, Fuzzy Sets and Systems, 2002, 129, 387–403.
- [166] Lam W.H.K., Poon A.C.K., Mung G.K.S., *Integrated model for lane-use and signal-phase designs*, ASCE Journal of Transportation Engineering, 1997, 123, 114–122.
- [167] Laval J.A., *A macroscopic theory of two-lane rural roads*, Transportation Research, Part B, 2006, 40, 937–944.
- [168] Le-Anh T., De Koster M.B.M., *A review of design and control of automated guided vehicle systems*, European Journal of Operational Research, 2006, 171, 1–23.
- [169] Leeuwaarden van J.S.H., *Delay Analysis for the Fixed-Cycle Traffic-Light Queue*, Transportation Science, May 2006, Vol. 40, No. 2, 189–199.
- [170] Leśniak A., *Metoda kalkulacji kosztów pośrednich robót budowlanych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych*, Praca Doktorska (niepublikowana), Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, 2004.
- [171] Li J., Kwan R.S.K., *A fuzzy genetic algorithm for driver scheduling*, European Journal of Operational Research, 2003, 147, 334–344.
- [172] Li L., Lai K.K., *A fuzzy approach to the multiobjective transportation problem*, Computers & Operations Research, 2000, 27, 43–57.
- [173] Li Q., Wang Z., Yang J., Wang J., *Pedestrian delay estimation at signalized intersections in developing cities*, Transportation Research, Part A, 2005, 39, 61–73.
- [174] Liatsis P., Tawfik H.M., *Two-dimensional road shape optimisation using genetic algorithms*, Mathematics and Computers in Simulation, 1999, 51, 19–31.

- [175] Lindblom C.E., *The intelligence of democracy*, The Free Press, New York 1965.
- [176] Liu R.X., Li H., Wang Z.F., *The discontinuous finite element method for red-and-green light models for the traffic flow*, Mathematics and Computers in Simulation, 2001, 56, 55–67.
- [177] Lo H.K., *A Cell-Based Traffic Control Formulation: Strategies and Benefits of Dynamic Timing Plans*, Transportation Science, May 2001, Vol. 35, No. 2, 148–164.
- [178] Lo H.K., *A Reliability Framework for Traffic Signal Control*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, June 2006, Vol. 7, No. 2.
- [179] Lyons G., Hunt J., McLeod F., *A neural network model for enhanced operation of midblock signalized pedestrian crossings*, European Journal of Operational Research, 2001, 129, 346–354.
- [180] Łęski J., *Towards a robust fuzzy clustering*, Fuzzy Sets and Systems, 2003, 137, 215–233.
- [181] Malinowski P., *Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych i sieci neuronowych w inżynierii środowiska*, Praca Doktorska (niepublikowana), Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, 1996.
- [182] Mannheim M.L., Hall F.L., *Abstract representation of goals*, professional Paper P67-24, MIT Department of Civil Engineering, Cambridge 1968.
- [183] Marczak M.A., *Modelowanie ruchu na pasach kierunkowych wlotu na skrzyżowanie*, Praca dyplomowa, Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, 2005.
- [184] Mather R.D., DeLucia P.R., *Testing for effects of racial attitudes and visual contrast on the speed of a driver's response to a pedestrian*, Transportation Research, Part F, 2007, 10, 437–446.
- [185] May A.D.Jr., *Traffic flow theory and the traffic engineer's challenge*, Proceedings of the Institute of Traffic Engineering, 1965, 290–303.
- [186] McNally M.G., Kulkarni A., *Assessment of influence of land use-transportation system on travel behavior*, Transportation Research Record, 1997, 1607, 105–115.
- [187] Medaglia A.L., Fang S.Ch., Nuttle H.L.W., Wilson J.R., *An efficient and flexible mechanism for constructing membership functions*, European Journal of Operational Research, 2002, 139, 84–95.
- [188] Medasani S., Kim J., Krishnapuram R., *An Overview of membership function generation techniques for pattern recognition*, International Journal of Approximate Reasoning, 1998, 19, 391–417.
- [189] Melo J., Naftel A., Bernardino A., Santos-Victor J., *Detection and Classification of Highway Lanes Using Vehicle Motion Trajectories*, IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, June 2006, Vol. 7, No. 2, 188–200.
- [190] *Metoda obliczania przepustowości rond. Instrukcja obliczania*, GDDKiA, Warszawa 2004
- [191] *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej. Instrukcja obliczania*, GDDKiA, Warszawa 2004
- [192] *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Instrukcja obliczania*, GDDKiA, Warszawa 2004
- [193] Michalopoulos P.G., Stephanopoulos G., *Oversaturated signal system with queue length constraints*, Transportation Research, 1977, 11, 413–421.
- [194] Michalopoulos P.G., Stephanopoulos G., *Optimal control of oversaturated intersections theoretical and practical considerations*, Traffic Engineering & Control, 1978, 216–221.
- [195] Middendorf M., Reischle F., Schmeck H., *Multi Colony Ant Algorithms*, Journal of Heuristics, 2002, 8, 305–320.
- [196] Millionig A., Schechtner K., *Developing Landmark-Based Pedestrian-Navigation Systems*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, March 2007, Vol. 8, No. 1.
- [197] Mirchandani P., Head L., *A Real-time traffic signal control system: architecture, algorithms and analysis*, Transportation Research, Part C, 2001, 9, 415–432.
- [198] Mirchandani P.B., Zou N., *Queuing Models for Analysis of Traffic Adaptive Signal Control*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, March 2007, Vol. 8, No. 1.

- [199] Mitchell D.H., Mac Gregor Smith J., *Topological network design of pedestrian networks*, Transportation Research, Part B, 2001, 35, 107–135.
- [200] Mohring H., Harwitz M., *Highway benefits*, Northwestern University Press, Evanston, 111, 1962.
- [201] Moon C., Kim J., Choi G., Seo Y., *An efficient genetic algorithm for the traveling salesman problem with precedence constraints*, European Journal of Operational Research, 2002, 140, 606–617.
- [202] Muramatsu M., Nagatani T., *Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic*, Physica A, 275, 2000, 281–291.
- [203] Murat Y.S., Gedizlioglu E., *A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions*, Transportation Research, Part C, 2005, 13, 19–36.
- [204] Murchland J.D., *Methods of vertical profile optimization for an improvement to an existing road*, PTRC Seminar Proceedings on Cost Models and Optimization in Highways (Session L12), London 1973.
- [205] Nakanishi T., Yikai K., Satoh J., Miyoshi I., Satoh A., Takahashi M., *The development of a road traffic simulation system in broad areas*, Mathematics and Computer in Simulation, 1995, 39, 207–212.
- [206] Nelson A.C., Allen D., *If you build them, commuters will use them*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1578, TRB, National Research Council, Washington, DC, 1997, 79–83.
- [207] Neuburger H., *The evaluation of user benefits on transport projects*, Economic Planning Directorate, Technical Note 2, Ministry of Transport, London 1969.
- [208] Neuburger H., *User benefit in the evaluation of transport and land use plans*, Journal of Transport Economics and Policy, January 1971, 5.
- [209] Nevers B.L., Roupail N.M., *Field Evaluation of Lane Selection Strategies at Signalized Intersections*, Journal of Transportation Engineering, May/June 2002.
- [210] Newell G.F., *Applications of Queuing Theory*, 2nd ed. Chapman & Hall, London, England, 1982, 287–300.
- [211] Nicholson A.J., Elms D.G., Williman A., *A variational approach to optimal route location*, The Journal of the Institution of Highway Engineers, 1976, 23, 22–25.
- [212] Niczyj J., *Wielokryterialna optymalizacja niezawodnościowa oraz szacowanie stanu technicznego konstrukcji prętowych z zastosowaniem teorii zbiorów rozmytych*, Wydawnictwo uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2003.
- [213] Niittymaaki J., *Isolated traffic signals—vehicle dynamics and fuzzy control*, Thesis, Helsinki University of Technology, 1997.
- [214] Niittymaaki J., Kikuchi S., *Application of fuzzy logic of a pedestrian crossing signal*, Transportation Research Record, No 1651, Intelligent Transportation Systems, Automated Highway Systems, Travel Information, and Artificial Intelligence, Washington, DC, 1998.
- [215] Niittymaki J., Pursula M., *Signal control using fuzzy logic*, Fuzzy Sets and Systems, 2000, 116, 11–22.
- [216] Niittymaki J., Turunen E., *Traffic signal control on similarity logic reasoning*, Fuzzy Sets and Systems, 2003, 133, 109–131.
- [217] Obuchowicz A.P., *Evolutionary Algorithms for Global Optimization and Dynamic System Diagnosis*, Lubuskie Towarzystwo Naukowe w Zielonej Górze 2003.
- [218] Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – *Prawo o ruchu drogowym*, DzU Nr 108, poz.908 z 2 czerwca 2005.
- [219] OECD, *Optimisation of Road Alignment by the Use of Computers*, Organization of Economic Co-operation and Development, Paris 1973.
- [220] Oh H., Sisiopiku V.P., *Probabilistic Models for Pedestrian Capacity and Delay at Roundabouts*, Transportation Research Circular E-C018: 4th International Symposium on Highway Capacity.

- [221] Paczkowski W.M., *Wybrane problemy dyskretnej optymalizacji ewolucyjnej*, Wydawnictwo uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1999.
- [222] Pappis C., Mamdani E., *A fuzzy logic controller to a traffic junction*, IEEE Trans. Systems, Man, Cybernet., 1977, 7 (10), 707–717.
- [223] Parker, N.A., *Rural highway route corridor selection*, Transportation Planning and Technology, 1977, 3, 247–256.
- [224] Parks J.R., Schofer J.L., *Characterizing neighborhood pedestrian environments with secondary data*, Transportation Research, Part D, 2006, 11, 250–263.
- [225] Piątkowski G., *Wykrywanie uszkodzeń w elementach konstrukcyjnych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych*, Praca Doktorska (niepublikowana), Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Mechaniki Konstrukcji, 2003.
- [226] Piegat A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 1999.
- [227] Pikora T., Bull F., Jamrozik K., Knuiman M., Giles-Corti B., Donovan R., *Developing a reliable audit instrument to measure the physical environment for physical activity*, American Journal of Preventive Medicine, 2002, 23, 187–194.
- [228] Pless R., *Detecting Roads in Stabilized Video with the Spatio-Temporal Structure Tensor*, GeoInformatica, 2006, 10, 1, 37–53.
- [229] Porter B.E., England K.J., *Predicting Red-Light Running Behavior: A Traffic Safety Study in Three Urban Settings*, Journal of Safety Research, 2000, Vol. 31, No. 1, 1–8.
- [230] *Postaw na rower – podręcznik projektowania przyjaznej dla rowerów infrastruktury*, CROW oraz ZG PKE, Kraków 1999.
- [231] Pownuł A., *Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych do oceny bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych*, Praca Doktorska (niepublikowana), Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych, 2001.
- [232] Pradhan A., Kockelman K., *Uncertainty propagation in an integrated land use-transportation modeling framework: output variation via UrbanSim*, Transportation Research Record, 2002, 1805, 128–135.
- [233] Pretty R., *The Delay to Pedestrians and Vehicles at Signalized Intersections*, ITE Journal, 1979, Vol. 49, Issue 5, 20–23.
- [234] Puy Huarte J., *OPYGAR: Optimization and automatic design of highway profiles*, PTRC Seminar Proceedings on Cost Models and Optimization in Highways, Session L13, London 1973.
- [235] Qiao F., Yi P., Yang H., Devarakonda S., *Fuzzy Logic Based Intersection Delay Estimation*, Mathematical and Computer Modelling, 2002, 36, 1425–1434.
- [236] Quarmby D.A., *An interim procedure for the economic evaluation of transportation networks*, Mathematical Advisory Unit note 136, Ministry of Transport, London 1969.
- [237] Quintero A., Konare D., Pierre S., *Prototyping an intelligent decision support system for improving urban infrastructures management*, European Journal of Operational Research, 2005, 162, 654–672.
- [238] Rakha H., El-Shawarby I., Setti J.R., *Characterizing Driver Behavior on Signalized Intersection Approaches at the Onset of a Yellow-Phase Trigger*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, December 2007, Vol. 8, No. 4.
- [239] Randall T.A., Baetz B.W., *Evaluating Pedestrian Connectivity For Suburban Sustainability*, Journal of Urban Planning And Development, March 2001.
- [240] Rattarangsi A., Chin R.T., *Scale-based detection of corners of planar curves*, IEEE Trans. Patt. Anal. Machine. Intell., PAMI-14(4), 1992, 430–449.
- [241] Replogle, M., *MNCPPC 1988 Logit mode choice model for home to work trips*, Maryland National Parks and Planning Commission, 1988.

- [242] Retting R.A., Chapline J.F., Williams A.F., *Changes in crash risk following re-timing of traffic signal change intervals*, Accident Analysis and Prevention, 2002, 34, 215–220.
- [243] ReVelle C.S., Whitlatch E.E., Wright J.R., *Civil and Environmental Systems Engineering*, Prentice Hall, New Jersey 1997.
- [244] Robinson R., *Automatic design of the road vertical alignment*, PTRC Seminar Proceedings on Cost Models and Optimization in Highways, Session L9, London 1973.
- [245] Roozmond D.A., *Using intelligent agents for pro-active, real-time urban intersection control*, European Journal of Operational Research, 2001, 131, 293–301.
- [246] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (z dnia 14.05.1999, DzU Nr 43, poz. 430).
- [247] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach (z dnia 3.07.2003r., Dz.U.Nr 220, poz.2181), zał. 1: *Szczegółowe warunki techniczne dla znaków drogowych pionowych*, zał. 2: *Szczegółowe warunki techniczne dla znaków drogowych poziomych*, zał. 3: *Szczegółowe warunki techniczne dla sygnałów drogowych*, zał. 4: *Szczegółowe warunki techniczne dla urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego*.
- [248] Rudnicki A., *Jakość komunikacji miejskiej*, Kraków 1999.
- [249] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
- [250] Saito M., Fan J., *Artificial Neural Network–Based Heuristic Optimal Traffic Signal Timing*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2000, 15, 281–291.
- [251] Sambor A., *Priorytety w ruchu dla pojazdów komunikacji miejskiej*, IGKM 1999.
- [252] Sánchez J., Galán M., Rubio E., *Applying a Traffic Lights Evolutionary Optimization Technique to a Real Case: “Las Ramblas” Area In Santa Cruz de Tenerife*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, February 2008, Vol. 12, No. 1.
- [253] Sang A.P., Silcock J.P., *SIGSIGN user manual*, Steer Davies and Gleave Ltd. and Transport Studies Group, University College, London 1989.
- [254] Sasaki M., Nagatani T., *Transition and saturation of traffic flow controlled by traffic lights*, Physica, A, 2003, 325, 531–546.
- [255] Sato T., Akamatsu M., *Influence of traffic conditions on driver behavior before making a right turn at an intersection: Analysis of driver behavior based on measured data on an actual road*, Transportation Research, Part F, 2007, 10, 397–413.
- [256] Sawicki P., *Metoda oceny jakości systemu transportowego z zastosowaniem teorii zbiorów przybliżonych*, Praca Doktorska (niepublikowana), Politechnika Warszawska, 2003.
- [257] Schabowicz K., *Nieniszcząca identyfikacja wytrzymałości na ściskanie betonu z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych*, Praca Doktorska (niepublikowana), Politechnika Wroclawska, 2003.
- [258] Schneider R.J., Ryznar R.M., Khattak A.J., *An accident waiting to happen: a spatial approach to proactive pedestrian planning*, Accident Analysis and Prevention, 2004, 36, 193–211.
- [259] Shafizadeh K., Niemeier D., *Bicycle journey-to-work: travel behavior characteristics and spatial attributes*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1578, TRB, National Research Council, Washington, DC, 1997, 84–90.
- [260] Sharma S., Lingras P., Xu F., Kilburn P., *Application of neural networks to estimate AADT on low-volume roads*, Journal of Transportation Engineering, September/October 2001.
- [261] Shaw J.F.B., Howard B.E., *Comparison of two integration methods in transportation routing*, Transportation Research Record, 1981, 806, 8–13.
- [262] Shaw J.F.B., Howard B.E., *Expressway route optimization by OCP*, ASCE Journal of Transportation Engineering, 1982, 108 (TE3), 227–243.

- [263] Sheu J.B., *A Stochastic Optimal Control Approach to Real-time, Incident-Responsive Traffic Signal Control at Isolated Intersections*, Transportation Science, November 2002, Vol. 36, No. 4, 418–434.
- [264] Silcock J.P., *Designing signal-controlled junctions for group-based operation*, Transportation Research, 31A, 1997, 157–173.
- [265] Skrzypczak I., *Statystyczna i rozmyta kontrola wytrzymałości betonu*, Praca Doktorska (niepublikowana), Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, 2005.
- [266] Smeed R.J., *Road pricing: the economic and technical possibilities*, Her Majesty's Stationery office, London 1964.
- [267] Smith J.F., *The design of a transportation study with regard to the evaluation of its output*, Regional Studies, August 1970, 4.
- [268] SOAP 84, User's Manual, Federal Highway Administration, 1985.
- [269] Spyropoulou I., *Modelling a signal controlled traffic stream Using cellular automata*, Transportation Research, Part C, 2007, 15, 175–190.
- [270] Srinivasan D., Choy M.C., Cheu R.L., *Neural Networks for Real-Time Traffic Signal Control*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, September 2006, Vol. 7, No. 3.
- [271] Steenbrink P.A., *Optymalizacja sieci transportowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1978.
- [272] Szeliga E., *Niezawodność konstrukcji w warunkach niepewności w ujęciu teorii zbiorów rozmytych*, Praca Doktorska (niepublikowana), Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Ośrodek Metod Komputerowych, 2001.
- [273] Tarno P.J., Parsonson P.S., *Selecting traffic signal control at individual intersections*, NCHRP Report 233, TRB, 1981.
- [274] Taylor D., Mahmassani H., *Analysis of stated preference for intermodal bicycle-transit interfaces*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1556, TRB, National Research Council, Washington, DC, 1996, 86–95.
- [275] Thomson N.R., Sykes J.F., *Route selection through a dynamic ice field using the maximum principle*, Transportation Research, Part B, 1988, 22 (5), 339–356.
- [276] Tian Z.Z., Wu N., *Probabilistic Model for Signalized Intersection Capacity with a Short Right-Turn Lane*, Journal of Transportation Engineering, March 2006.
- [277] Tilahun N.Y., Levinson D.M., Krizek K.J., *Trails, lanes, or traffic: Valuing bicycle facilities with an adaptive stated preference survey*, Transportation Research, Part A, 2007, 41, 287–301.
- [278] Timm H., Doring Ch., Kruse R., *Different approaches to fuzzy clustering of incomplete datasets*, International Journal of Approximate Reasoning, 2004, 35, 239–249.
- [279] Tinbergen J., *The appraisal of road construction: two calculation schemes*, The Review of Economics and Statistics, August 1957.
- [280] Tiwari G., Bangdiwala S., Saraswat A., Gaurav S., *Survival analysis: Pedestrian risk exposure at signalized intersections*, Transportation Research, Part F, 2007, 10, 77–89.
- [281] Tracz M., Allsop R.E. *Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną*, WkiŁ, Warszawa 1990.
- [282] TRANSYT-7F, User's Manual, Release 5.0, Federal Highway Administration, 1987.
- [283] Trietsch D., *A family of methods for preliminary highway alignment*, Transportation Science, 1987, 21 (1), 17–25.
- [284] Trietsch D., *Comprehensive design of highway networks*, Transportation Science, 1987, 21 (1), 26–35.
- [285] Tully I.M.S.N.Z., *Synthesis of sequences for traffic signal controllers using techniques of the theory of graphs*, Ph.D. thesis, OUEL Report, 1189/77, University of Oxford, 1976.
- [286] Turner A.K., Miles R.D., *A computer assisted method of regional route location*, Highway Research Record, 1971, 348, 1–15.

- [287] Urbański P.R., *Ocena stopnia zużycia technicznego wybranej grupy budynków mieszkalnych za pomocą sztucznych sieci neuronowych*, Praca Doktorska (niepublikowana), Uniwersytet Zielonogórski, 2002.
- [288] Vigos G., Papageorgiou M., Wang Y., *Real-time estimation of vehicle-count within signalized links*, Transportation Research, Part C, 2008, 16, 18–35.
- [289] Vis I.F.A., *Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems*, European Journal of Operational Research, 2006, 170, 677–709.
- [290] Vlahogianni E.I., Webber Jr. Ch.L., Geroliminis N., Skabardonis A., *Statistical characteristics of transitional queue conditions in signalized arterials*, Transportation Research, Part C, 2007, 15, 392–403.
- [291] Wainaina S., *Modal split modelling in urban travels with consideration of activity chains*, Praca doktorska (niepublikowana), Politechnika Krakowska, Kraków 2003.
- [292] Wan F.Y.M., *Introduction to the Calculus of Variations and its Applications*, Chapman & Hall, New York 1995.
- [293] Webster F.V., *Traffic signal settings*, Road Research Technical Paper, No. 39, HMSO, London 1958.
- [294] Wong C.K., Wong S.C., *Lane-based optimization of signal timings for isolated junctions*, Transportation Research, Part B, 2003, 37, 63–84.
- [295] Wong S.C., *Derivatives of performance index for the traffic model from TRANSYT*, Transportation Research, 29B, 1995, 303–327.
- [296] Wong S.C., *Group-based optimisation of signal timings using the TRANSYT traffic model*, Transportation Research, 30B, 1996, 217–244.
- [297] Wong S.C., *Group-based optimisation of signal timings using parallel computing*, Transportation Research, 5C, 1997, 123–139.
- [298] Wong S.C., Yang C., *An iterative group-based signal optimization scheme for traffic equilibrium networks*, Journal of Advanced Transportation, 1999, 33, 201–217.
- [299] Wong S.C., Wong W.T., Leung C.M., Tong C.O., *Group-based optimization of a time-dependent TRANSYT traffic model for area traffic control*. Transportation Research, Part B, 2000.
- [300] Wong S.C., Yang C., Lo H.K., *A path-based traffic assignment algorithm using the TRANSYT traffic model*, Transportation Research, 35B, 2001, 163–181.
- [301] Wong S.C., Yang C., Tong C.O., Wong C.K., *Group-based optimization of signal timings for traffic equilibrium network*, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2001, 4 (4), 133–148.
- [302] *Wytyczne projektowania ulic (WPU)*, GDDP, Warszawa 1992.
- [303] *Wytyczne projektowania skrzyżowań drogowych*, cz.1, GDDP, Warszawa 2001.
- [304] *Wytyczne projektowania skrzyżowań drogowych*, cz.2, GDDP, Warszawa 2001.
- [305] Xu F., Liu X., Fujimura K., *Pedestrian Detection and Tracking With Night Vision*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, March 2005, Vol. 6, No. 1.
- [306] Yagaanbuyant D., *Ocena stanu technicznego konstrukcji betonowych z zastosowaniem zbiorów rozmytych*, Praca Doktorska (niepublikowana), Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Konstrukcji Budowlanych, 1999.
- [307] Yagil D., *Beliefs, motives and situational factors related to pedestrians' self-reported behavior at signal-controlled crossings*, Transportation Research, Part F, 2000, 3, 1–13.
- [308] Yamazaki G., *Insensitive light traffic in a cellular system with mobile subscribers*, European Journal of Operational Research, 2003, 147, 418–429.
- [309] Yan X., Radwan E., Birriel E., *Geometric Models to Calculate Left-Turn Sight Distance for Signalized Intersections on Horizontal Curves*, Journal of Transportation Engineering, September 2006.
- [310] Yan X., Radwan E., *Effect of restricted sight distances on driver behaviors during unprotected left-turn phase at signalized intersections*, Transportation Research, Part F, 2007, 10, 330–344.

-
- [311] Yao J., Dash M., Tan S.T., Liu H., *Entropy-based fuzzy clustering and fuzzy modeling*, Fuzzy Sets and Systems, 2000, 113, 381–388.
 - [312] Yin H., Wong S.C., Xu J., Wong C.K., *Urban traffic flow prediction using a fuzzy-neural approach*, Transportation Research, Part C, 2002, 10, 85–98.
 - [313] Yu X.H., Recker W.W., *Stochastic adaptive control model for traffic signal systems*, Transportation Research, Part C, 2006, 14, 263–282.
 - [314] Zhang J.S., Leung Y.W., *Improved Possibilistic C-Means Clustering Algorithms*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, April 2004, Vol. 12, No. 2.
 - [315] Zhao L., Thorpe C.E., *Stereo- and Neural Network-Based Pedestrian Detection*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, September 2000, Vol. 1, No. 3.
 - [316] Żukowska J., *Modelowanie ryzyka w ruchu drogowym szeregami czasowymi*, Praca Doktorska (niepublikowana), Politechnika Gdańska, 2003.

The method of evaluation of road infrastructure elements considering the needs and specify of different groups of users

In the monograph, the term of road infrastructure means the construction object (structure), on which is the transportation of people and goods in the road transport branch. The key concepts, such as: road infrastructure element, its types and parts (node and intersection segment) groups of users, route, means of transport, description and evaluation of traffic conditions are introduced. The state of knowledge, divided into: a review of the infrastructure description issues, the importance of traffic signals in the evaluation of traffic conditions, as well as the trends in the use of heuristic methods in the evaluation of road infrastructure is pointed. On the basis of this summary, the contribution of Author to the field of design and evaluation of road infrastructure is determined. Three specific thesis, the aim and the scope of the monograph are formulated.

The main achievement of the monograph is to provide the universal method for the description of road infrastructure. In addition to the recognition of traditional quantities characterizing the geometry of the road and the movement of the users, the role of the requirements of individual users group is considered. Analysis of different users groups, including travelers in vehicles or in public transport means, pedestrians and cyclists, required a unified set of the quantities and related units.

The method of evaluation of road infrastructure elements, based on the model including description of the infrastructure and each groups of users is constructed. The original set of functions and conditions tailored to the nature of the considered problems been taken into account. The method is suitable for correct the ways to calculate the capacity and the traffic conditions for all the groups of users. A complex description of all the parts of an infrastructure element allows also the evaluation of options or management.

An important achievement of the monograph is the use of the fuzzy clustering method to calibrate the parameters of the evaluation functions, and use of the genetic algorithms, as the modern and effective tools for solving the problems of infrastructure element evaluation. The examples demonstrate the usefulness and effectiveness of the constructed model, the author's method of evaluation, also against the background of previous methods, and including the constructed computer tools. In addition, it is shown that by modifying the specific elements of the method, such as: weights, the parameters of the evaluation functions and their forms, take into account the different degrees of priority to certain groups of users formulated according to their preferences and expectations of policymakers.

Spis treści

Stosowane oznaczenia	5
1. Wprowadzenie	7
2. Stan badań nad zagadnieniami oceny elementów infrastruktury oraz charakterystyka monografii	11
2.1. Przegląd zagadnień z zakresu opisu elementu infrastruktury	11
2.2. Znaczenie sygnalizacji drogowej w ocenie warunków ruchu	14
2.3. Tendencje wykorzystania metod heurystycznych w ocenie elementów infrastruktury drogowej	18
2.4. Podsumowanie stanu wiedzy i ukierunkowanie badań autora monografii	22
2.5. Sformułowanie celu i tez monografii	24
2.6. Omówienie zakresu monografii	25
3. Model oceny elementu infrastruktury drogowej przez jej użytkowników	29
3.1. Struktura modelu	29
3.2. Poziom opisu elementu infrastruktury	32
3.3. Poziom oceny warunków ruchu	34
3.4. Zagregowane wielkości oceny elementu infrastruktury	36
3.5. Funkcje satysfakcji i akceptacji	38
4. Identyfikacja zmiennych funkcji satysfakcji i akceptacji	47
4.1. Uwarunkowania dla zmiennych funkcji oceny elementu infrastruktury	47
4.2. Wielkości wykorzystywane w metodzie HCM	48
4.3. Zestaw wielkości związanych z podziałem dostępnego czasu w sygnalizacjach stałoczasowych	52
4.4. Zestaw wielkości związanych z podziałem dostępnej przestrzeni (przepustowości elementów infrastruktury)	56
4.5. Zestaw wielkości związanych z podziałem czasu i przestrzeni w sygnalizacjach dostosowujących się do zmian ruchu	60
5. Kalibracja parametrów funkcji satysfakcji i akceptacji	65
5.1. Opis i przykład klasycznej metody kalibracji	65
5.2. Autorska metoda kalibracji	71
5.3. Kalibracja parametrów wielkości związanych z natężeniem ruchu	72
5.4. Kalibracja parametrów wielkości związanych ze stratami czasu	78
5.5. Kalibracja parametrów wielkości związanych z prędkością	80
5.6. Wzorcowe zestawy parametrów	82
6. Sformułowanie metody oceny	89
6.1. Konstrukcja i składniki metody	89
6.2. Uwzględnienie wrażliwości użytkowników w ocenie elementu infrastruktury	91
6.3. Wagi w metodzie oceny	91
6.4. Funkcje oceny	92

6.5. Wskazanie elementu infrastruktury o najwyższej ocenie	94
7. Przykład zastosowania metody	101
7.1. Opis analizowanego elementu infrastruktury drogowej	101
7.2. Ocena elementu infrastruktury według dotychczasowych metod	104
7.3. Testowanie wpływu wyboru postaci funkcji oceny	109
7.4. Testowanie wpływu wag jako preferencji dla określonych grup użytkowników	113
7.5. Testowanie wpływu zmian wartości parametrów cząstkowych funkcji oceny	122
8. Podsumowanie	139
Literatura	147
Streszczenie w języku angielskim	163

Contents

List of notations	5
1. Introduction	7
2. The state of research on the issues of infrastructure evaluation and characterization of the monograph	11
2.1. A review of the infrastructure description issues	11
2.2. The importance of traffic signals in the evaluation of traffic conditions	14
2.3. The trends in the use of heuristic methods in the evaluation of road infrastructure	18
2.4. Summary of the knowledge and orientation of the author's research	22
2.5. Formulation of the aim and the thesis of the monograph	24
2.6. Discussion of the scope of the monograph	25
3. Model of evaluation of road infrastructure by its users	29
3.1. The structure of the model	29
3.2. The level of description of an infrastructure element	32
3.3. The level of evaluation of traffic conditions	34
3.4. The aggregate quantities of the infrastructure element evaluation	36
3.5. The functions of satisfaction and acceptance	38
4. Identification the variables of the satisfaction and acceptance functions	47
4.1. The conditions for the variables of functions of infrastructure element evaluation	47
4.2. The quantities used in the HCM method	48
4.3. The set of quantities bounded with a division of available time in the fixed-time signalisations	52
4.4. The set of quantities bounded with a division of available space (the capacity of the infrastructure element)	56
4.5. The set of quantities bounded with a division of time and space in the signalisations adapting to changes in traffic	60
5. Calibration of the parameters of the satisfaction and acceptance functions	65
5.1. Description and example of the classical calibration methods	65
5.2. The author's method of calibration	71
5.3. Calibration of the parameters bounded with the traffic volume quantities	72
5.4. Calibration of the parameters bounded with the delays quantities	78
5.5. Calibration of the parameters bounded with the speed quantities	80
5.6. The standard sets of parameters	82
6. Formulation of the evaluation method	89
6.1. The construction and components of the method	89
6.2. Inclusion of the sensibility of users in the infrastructure element evaluation	91
6.3. The weights in the evaluation method	91
6.4. The functions of evaluation	92

6.5. Indication of the highest rated infrastructure element	94
7. An example of application of the method	101
7.1. Description of the analysed infrastructure element	101
7.2. The evaluation of the infrastructure element using the previous methods	104
7.3. Testing the effect of selection a form of the evaluation function	109
7.4. Testing the effect of weights as the preferences for the particular groups of users	113
7.5. Testing the effect of changes in values of the evaluation function parameters	122
8. Recapitulation	139
References	147
Summary in English	163