

РОЗДІЛ 3. ЕКОНОМІЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОМОБІЛІВ

WYKORZYSTANIE METODY TAKSONOMICZNEJ DO WYBORU STRATEGII OPTYMALIZACJI SIECIOWEJ STEROWANIA RUCHEM ULICZNYM NA SKRZYŻOWANIACH Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNA

Prof. dr hab. inż. Kazimierz LEJDA, Mgr inż. Krzysztof ŁAKOTA

Obecne systemy sterowania ruchem ulicznym wykorzystują badanie cech optymalizacyjnych opartych na minimalizacji bądź maksymalizacji parametrów, które w danej chwili procesu transportowego są wykorzystywane do sterowania ruchem. Powszechnie stosowane systemy takie jak brytyjski SCOOT, australijski SCATS lub holenderski SPOT-UTOPIA zawierają algorytmy optymalizacyjne oparte na optymalizacji funkcji celu. W artykule przedstawiono zastosowanie wielokryterialnej analizy porównawczej do wyboru strategii optymalizacji w obszarze sieci ulicznej. Za pomocą metody taksonomicznej Czekanowskiego przedstawiono możliwość wyboru odpowiedniej filozofii sterowania jako alternatywy dla optymalizacji funkcji celu.

1. FORMUŁA ZADANIA OPTYMALIZACYJNEGO

Zadanie optymalizacyjne jest oparte na formule opisu określonej decyzji w języku matematycznym. Aby możliwe było podjęcie właściwej decyzji, należy określić priorytety działań stanowiące o kolejności rozwiązywania problemów. Algorytm konstrukcji modelu matematycznego rozwiązywanego problemu decyzyjnego można przedstawić w następującej formie [1]:

1. Identyfikacja parametrów zadania.
2. Identyfikacja zmiennych decyzyjnych.
3. Określenie ograniczeń podjęcia decyzji.
4. Identyfikacja celu poszukiwań.

Jednym z dopuszczalnych rozwiązań zadania optymalizacyjnego jest kryterium, które spełnia wszystkie warunki ograniczające badaną sytuację. Kryterium wyboru rozwiązania optymalnego będzie pełnił funkcja celu. Zatem rozwiązaniem optymalnym zadania optymalizacyjnego będzie wyznaczenie takiego rozwiązania dopuszczalnego, przy którym funkcja kryterium osiągać będzie wartość ekstremalną.

Jeżeli D^{dop} to zbiór dopuszczalnych rozwiązań, X dowolne rozwiązanie natomiast F funkcja kryterium, to zadanie optymalizacyjne można opisać następująco:

$$F(X) = \max \{F(X): X \in D^{dop}\} - \text{maksymalizacja funkcji kryterium} \quad (1)$$

lub

$$F(X) = \min \{F(X): X \in D^{dop}\} - \text{minimalizacja funkcji kryterium} \quad (2)$$

Zagadnienie optymalizacji sterowania ruchem może być przedstawione za pomocą różnych algorytmów np. sterowniki sygnalizacji świetlnej obliczają decyzje w kolejnych interwałach czasowych określonych przez wewnętrzne moduły z rozdzielczością od 0,1 do 1 sekundy. Skoordynowanie liniowe wymaga zwykle synchronizacji tych punktów czasowych. Uzasadnionym staje się, zatem wykorzystanie formalizmu określającego dyskretną naturę sterowania ruchem.

Próba znalezienia optymalnego stanu sieci w danej chwili wymaga takiego wyszukania zbioru, który stanowi o najniższym lub najwyższym koszcie, w zależności od zadanej funkcji celu. Koszt obliczany jest dla danego horyzontu czasowego, ze względu na przejazd pojazdów przez wiele węzłów w sieci w celu dotarcia do celu podróży. Sprawność takiego systemu transportowego estymowana jest globalnie dla całego obszaru miejskiego.

Sekwencję zmian stanów w badanym horyzoncie czasowym określa koszt. Koszt zmian stanu skrzyżowania może być reprezentowany przez takie wielkości jak [2]:

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

Miary mogą zostać zagregowane z użyciem odpowiednich wag do takich wielkości jak strata czasu, czas podróży bądź negatywny wpływ na środowisko. Koszt przejścia między liczbą skrzyżowań n , w horyzoncie czasowym h , zdefiniowanym, jako zbiór kolejnych chwil $(t_1, t_2 \dots t_h)$ wynosi:

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

Celem optymalizacji jest minimalizacja wartości sumy. Wartość funkcji minimalnej (4) jest szukana dla sekwencji zmian n , w horyzoncie czasowym h , w przestrzeni możliwych stanów sieci.

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

Wszystkie przyjazdy pojazdów na wloty skrzyżowań, miary zakłóceń warunków ruchu oraz koszty zmian są znane w całym horyzoncie czasowym [2]. Tego typu rozwiązania optymalizacji sieciowej są podstawą strategii sterowania ruchem opartych na stałoczasowych planach na podstawie kosztownych pomiarów ruchu drogowego. W rzeczywistych warunkach ruchowych sytuacja zmienia się losowo i z założenia jest procesem stochastycznym. W celu rozwiązania zadania wymagana jest predykcja przebiegu zmian potoków ruchu.

2. METODY WIELKRYTERIALNEJ ANALIZY PORÓWNAWCZEJ

Wykorzystując możliwości obecnych układów detekcji systemowej instalowanej ramach systemów sterowania ruchem ulicznym mamy możliwość estymacji zmian potoków ruchu w zadanym interwale czasowym. Podjęcie określonej decyzji mającej na celu wybór optymalnego zbioru danych ruchowych można przedstawić jako wielokryterialny problem decyzyjny w postaci funkcji optymalizacji celu z_k w postaci zależności:

$$z_k = f_k(x), \quad k = 1, 2, \dots, m; x \in Q \quad (5)$$

gdzie:

$f_k(x)$ – funkcja celu o „ m ” kryteriach,

Q – zbiór rozwiązań dopuszczalnych dla danego problemu decyzyjnego,

x – wektor zmiennych decyzyjnych.

Rozwiązaniem optymalnym modelu wielokryterialnego jest takie $x_0 \in Q$, dla którego nie istnieje $x \in Q$ takie, że:

$$f_k(x) \geq f_k(x_0) \text{ dla } k = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

Matematyczne ujęcie teorii podejmowania decyzji określa, że charakter procesów decyzyjnych pozwala na ich formalizację oraz kwantyfikację. Zadania decyzyjne można podzielić ze względu na charakter wykorzystywanych informacji:

- zadania deterministyczne,
- zadania probabilistyczne,
- zadania ryzykowne.

Zadania deterministyczne to takie zadania, w których na podjęcie decyzji nie mają wpływu czynniki o charakterze losowym. Zadania probabilistyczne opisują sytuację decyzyjną opartą o czynniki losowe (sterowanie obszarowe w sieci ulicznej miasta), natomiast zadania ryzykowne dotyczą czynników trudnych do określenia [3].

Zastosowanie w ocenie wielokryterialnej metod polegających na budowie skalaru wymaga nadania wszystkim kryteriom wartości liczbowych. Dzięki temu można wzajemnie porównywać i oceniać warianty rozwiązań uwzględniające nie tylko cechy ilościowe, ale również jakościowe, jak miary przepustowości ulic czy parametry sterowania. Niektóre algorytmy tej grupy dają realną możliwość uwzględnienia zróżnicowanej ważności kryteriów oceny. System oceniania wariantowych rozwiązań powinien pozwalać na porównanie i ocenę zbiorów dowolnej wielkości pod względem liczby cech oraz kryteriów, umożliwiając w ten sposób jednoznaczny wybór rozwiązań najkorzystniejszych, spełniających założone wymagania [4].

Rozpatrujemy zbiór „ W ” określonych i dopuszczonych wariantów rozwiązań:

$$W = \{W_i; i = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (7)$$

Przyjmujemy zbiór kryteriów „ K ”:

$$K = \{K_j; j = 1, 2, 3, \dots, m\} \quad (8)$$

dla których wyznaczamy miary cząstkowe X_{ij} wariantu W_i według kryterium K_j :

$$X_{ij} = \{x_{ij}; i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m\} \quad (9)$$

W ten sposób otrzymujemy następującą macierz danych:

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{im} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Wiersze macierzy przedstawiają miary cząstkowe poszczególnych wariantów tj. parametry sterowania, zaś kolumny miary cząstkowe wszystkich wariantów według określonego kryterium cząstkowego – lokalizacje skrzyżowań. W danej sytuacji decyzyjnej możliwe są różne decyzje, dlatego też wyboru można dokonać poprzez określenie kryteriów oceny.

Struktura procesu decyzyjnego przyjmuje następujące fazy [5]:

Faza 1:

- **Etap 1** – rozpoznanie sytuacji decyzyjnej i sformułowanie problemu; wyznaczenie parametrów i zmiennych decyzyjnych (parametry ruchowe skrzyżowania),
- **Etap 2** – określenie zbioru kryteriów, ich ważności, charakteru, preferencji dotyczących ich wartości; wagi w modelowaniu posłużą do określenia ważności poszczególnych parametrów wpływających na sprawność skrzyżowania,

Faza 2:

- **Etap 3** – budowa modelu decyzyjnego opartego o wybrane parametry decyzyjne,
- **Etap 4** – rozwiązanie problemu decyzyjnego,

Faza 3:

- **Etap 5** – analiza wyników i ewentualna weryfikacja modelu,
- **Etap 6** – podjęcie decyzji w kwestii wariantu optymalnego.

Podczas podejmowania decyzji o wyborze odpowiedniej strategii sterowanego obiektu poszukujemy takich parametrów obiektu oraz mierników jego efektywności, aby uzyskać najlepsze rozwiązanie przy zadanych kryteriach wyboru. Są to problemy decyzyjne, w których formułuje się jedno kryterium, polegające na wyznaczeniu rozwiązania, dla którego kryterium optymalizacyjne przyjmuje najkorzystniejszą z możliwych wartości.

3. WYBÓR OPTIMALIZACJI SIECIOWEJ POPRZEZ ZASTOSOWANIE METODY CZEKANOWSKIEGO

Metoda Czekanowskiego (diagram Czekanowskiego) to najstarsza taksonomiczna metoda, opublikowana po raz pierwszy w 1909r. przez znanego polskiego antropologa Jana Czekanowskiego. Obecnie stosowana także w innych dziedzinach nauki, jako uniwersalna metoda klasyfikacji statystycznej. Zaletą diagramu jest to, że uwypukla on najważniejsze związki i podobieństwa badanych obiektów, a równocześnie ujmuje wszystkie szczegółowe powiązania między jednostkami obszarowymi [6].

Metoda ta składa się z 4 etapów:

- doboru cech topologicznych,
- standaryzacji,
- utworzenia macierzy podobieństwa dla jednostek badanych,
- wykreślenia diagramu.

Punktem wyjściowym dla utworzenia diagramu jest macierz odległości euklidesowych między sklasyfikowanymi obiektami. Odległości takie są dzielone na klasy, które stanowią przedziały podobieństwa obiektów. Po ustaleniu skali podobieństwa, przyporządkowuje się poszczególnym klasom odpowiednie symbole graficzne, odpowiadające poziomowi odległości między obiektami. Macierz taką przekształca się w ten sposób, że poszczególne odległości zastępuje się symbolami. Wynikiem tej operacji jest nieuporządkowany diagram Czekanowskiego.

Syntetyczna ocena wyboru filozofii sterowania na podstawie zadanych miar efektywności sterowania na skrzyżowaniach, wymaga zastosowania takich metod badawczych, które mogłyby być wykorzystane w warunkach złożoności analizowanych zjawisk. Wykorzystanie metody analizy wielokryterialnej wymaga przebadania zasadnych sparametryzowanych czynników ruchowych pod kątem realizacji określonych planów działań. Porównywanie bowiem stanowi podstawę do optymalizacji zadanych obszarów w których realizowana jest określona strategia.

W prezentowanym artykule zasygnalizowano możliwość doboru odpowiednich strategii sterowania na sieci ulicznej w zależności od wybranych wielkości sterowania. Badania empiryczne dotyczą zarówno potoków ruchu na poszczególnych skrzyżowaniach, jak również sparametryzowanych miar efektywności sterowania takich jak: długość cyklu sygnalizacji, ilość faz ruchu, maksymalny czas międzyzielony, natężenie nasycenia, długość sygnału zielonego, efektywny sygnał zielony, przepustowość oraz stopień wykorzystania przepustowości. Do przeprowadzonych badań przyjęto dane z poszczególnych lokalizacji skrzyżowań, programów działania sygnalizacji świetlnej oraz obliczonych poniższych związków:

Przepustowość C [P/h]:

$$C = S \cdot \frac{G_g}{T} \quad [\text{P/h}] \quad (11)$$

Efektywny sygnał zielony G_g [s]:

$$G_g = G + \dot{Z} - (t_r + t_z) \quad [\text{s}] \quad (12)$$

gdzie:

G	-	długość sygnału zielonego [s],
Z	-	długość sygnału żółtego [s],
t_r	-	czas tracony na początku sygnału zielonego [s],
t_z	-	czas tracony na końcu sygnału żółtego [s].

W celu uproszczenia badań, przyjęto, że zależność $(t_r + t_z)$ efektywnego sygnału zielonego w warunkach swobodnych równa się $2,0$ [s].

Stopień wykorzystania przepustowości:

$$X = \frac{Q}{C} \quad [-] \quad (13)$$

gdzie:

Q	-	natężenie ruchu na wlocie [P/h],
C	-	przepustowość na wlocie [P/h],

W badaniach wykorzystano przeprowadzone pomiary ruchu kołowego oraz parametry wpływające na sterowanie potokami ruchu na wyszczególnionych poniżej skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną:

1. **ul. Witosa – ul. Wiktora – ul. Wyspiańskiego**
 - wlot ul. Witosa
2. **ul. Witosa – ul. Staroniwska – ul. Langiewicza**
 - wlot ul. Witosa
3. **al. Batalionów Chłopskich – ul. Dąbrowskiego – ul. Podkarpacka**
 - wlot al. Batalionów Chłopskich
4. **al. Powstańców Warszawy – al. Sikorskiego**
 - wlot al. Sikorskiego
5. **al. Powstańców Warszawy – ul. Hetmańska**
 - wlot al. Powstańców Warszawy
6. **al. Armii Krajowej – al. Niepodległości**
 - wlot al. Armii Krajowej
7. **ul. Wieniawskiego – ul. Słocińska**
 - wlot Św. Rocha
8. **Trasa Zamkowa – ul. Kopisto**
 - wlot ul. Kopisto
9. **ul. Warszawska – ul. Staromiejska**
 - wlot ul. Warszawska.

Świadomym celem autora było wyselekcjonowanie tych lokalizacji sygnalizacji świetlnej, które docelowo po przedstawieniu diagramu Czekanowskiego, będą wskazywały na różnice. Wybrano skrzyżowania będące ciągami koordynacyjnymi na drodze krajowej nr 4 przez miasto Rzeszów oraz skrzyżowania izolowane realizujące sterowanie pełne akomodacyjne nie stanowiące korytarzy liniowych.

W tabeli 1 przedstawiono parametry, dla których poszczególne skrzyżowania poddane zostały analizie. Pomiar ruchu odnosi się wyłącznie do jazdy na wprost. W tabeli przyjęto następujące oznaczenia: M – motor, O/Dm – osobowe/dostawcze małe, Dd/C – dostawcze duże/cieżarowe, Cp – ciężarowe z przyczepą, A – autobusy. Wartości poszczególnych parametrów sterowania wyliczone zostały odpowiednio na podstawie zależności (11), (12) i (13).

Tabela 1. Parametry pracy sygnalizacji na poszczególnych skrzyżowaniach miasta Rzeszów

Sygnalizacja uliczna	Pomiar: data: 30 maj 2011r. Godz. 7.00 - 8.00										sparаметryzowane miary efektywności sterowania						
	M	O/Dm	Dd/C	Cp	A	nateżenie wlotu (Q)	sumaryczne nateżenie ruchu	dł. Cyklu [T]	ilość faz ruchu	max. czas między zielony [t.mz]	nateżenie nasycenia [S]	długość sygnału zielonego [G]	efektywny sygnał zielony [Ge]	przepustowość [C]	stopień wykorzystania przepustowości [X]		
ul. Witos - ul. Wiktora wlot ul. Witos	0	771	105	62	4	1205	4917	120	6	17	1900	28	29	459	2,63		
ul. Witos - ul. Staromińska wlot ul. Witos	5	623	114	50	7	1149	4369	120	3	14	1900	32	33	522	2,20		
al. Batalionów Chłopskich - ul. Dąbrowskiego wlot al. Batalionów Chłopskich	4	548	89	22	7	836	4086	120	4	12	1900	30	31	490	1,71		
al. Powstańców Warszawy - ul. Hetmańska, wlot al. Powstańców Warszawy	3	870	145	24	21	1264	4123	120	4	13	1900	24	25	395	3,20		
al. Powstańców Warszawy - al. Sikorskiego wlot al. Powstańców Warszawy	0	557	70	28	2	1125	4234	120	5	11	1900	32	33	522	2,16		
al. Armii Krajowej - al. Niepodległości al. Armii Krajowej	2	418	24	19	1	622	3825	120	4	17	1900	23	24	380	1,64		
ul. Wieniawskiego - ul. Słocińska wlot ul. Św. Rocha	1	425	22	0	5	453	1477	80	5	12	1700	42	43	913	0,50		
Trasa Zamkowa - ul. Kopisto wlot ul. Kopisto	0	1107	56	2	7	1172	2732	73	3	11	1900	25	26	650	1,80		
ul. Warszawska - ul. Staromiejska wlot ul. Warszawska	0	952	36	6	17	1011	3289	90	3	9	1900	35	36	760	1,33		

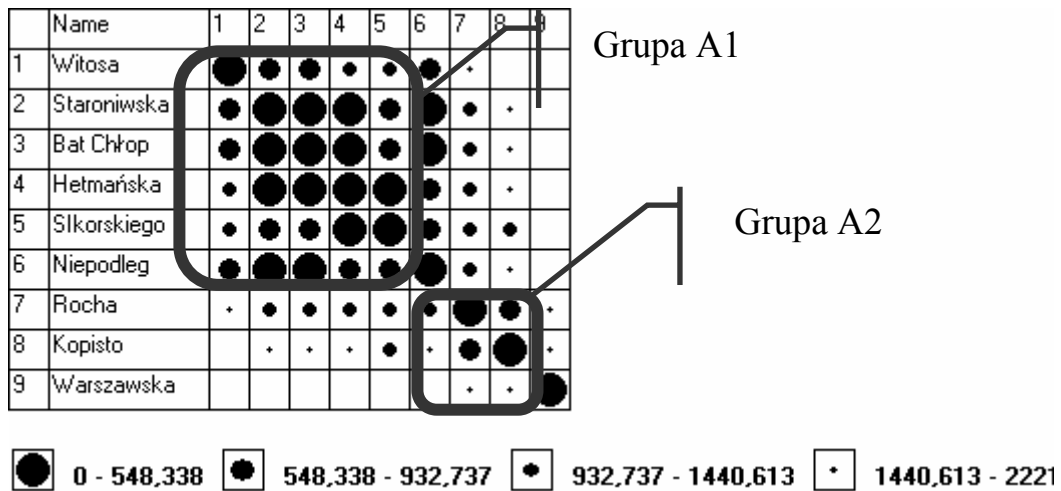
Głównym przeznaczeniem wybranej metody taksonomicznej jest wyodrębnienie podzbiorów jednorodnych obiektów lokalizacji skrzyżowań posiadających podobne właściwości. Na grupy obiektów podobnych wskazują w uporządkowanym diagramie Czekanowskiego zespoły symboli obrazujących najmniejszą odległość między obiektami. Tabela 2 przedstawia wyniki obliczeń odległości euklidesowych.

Tabela 2. Wyniki obliczeń odległości euklidesowych

Record Name	VAR 1	VAR 2	VAR 3	VAR 4	VAR 5	VAR 6	VAR 7	VAR 8	VAR 9	VAR 10	VAR 11	VAR 12	VAR 13	VAR 14	VAR 15
Witosa	0	771	105	62	4	1205	4917	120	6	17	1900	28	29	459	2,63
Staroniwska	5	623	114	50	7	1149	4369	120	3	14	1900	32	33	522	2,2
Bat Chłop	4	548	89	22	7	836	4086	120	4	12	1900	30	31	490	1,71
Hetmańska	3	870	145	24	21	1264	4123	120	4	13	1900	24	25	395	3,2
Silkorskiego	0	557	70	28	2	1125	4234	120	5	11	1900	32	33	522	2,16
Niepodleg	2	418	24	19	1	622	3825	120	4	17	1900	23	24	380	1,64
Rocha	1	425	22	0	5	453	1477	80	5	12	1900	42	43	913	0,5
Kopisto	0	1107	56	2	7	1172	2732	73	3	11	1900	25	26	650	1,8
Warszawska	0	952	36	6	17	1011	3289	90	3	9	1900	35	36	760	1,33

Poszczególnym klasom podobieństwa obiektów przyporządkowano odpowiednie symbole graficzne, otrzymując uporządkowany diagram Czekanowskiego, co pozwala na wzrokową ocenę przebiegu porządkowania obiektów. W tabeli 3 przedstawiono poddany analizie przykład w postaci uporządkowanego diagramu Czekanowskiego.

Tabela 3. Diagram Czekanowskiego



Na podstawie diagramu Czekanowskiego otrzymano 2 zasadnicze grupy typologiczne:

$$A1 = \{1,2,3,4,5,6\},$$

$$A2 = \{7,8,9\}.$$

Z przeprowadzonych badań wynika, że 2 grupy typologiczne charakteryzują się odmiennymi stanami pracy. W wyniku analizy można wywnioskować, że grupa typologiczna A1 to skrzyżowania objęte ciągami koordynacyjnymi posiadającymi parametry sterowania bardzo zbliżone do siebie (tabela 1). Jest to spowodowane m. in. położeniem skrzyżowań w jednym ciągu, które ze względu na pracę w koordynacji liniowej charakteryzują się podobnymi parametrami sterowania. Natomiast cechy grupy typologicznej A2 wskazują odmienne stany pracy, określając skrzyżowania poza sterowanymi korytarzami, pracującymi jako skrzyżowania izolowane.

4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania z wykorzystaniem metody wielokryterialnej analizy porównawczej potwierdzają możliwości jej racjonalnego wykorzystania do wyboru odpowiedniej strategii sterowania dla danego obszaru sieci ulicznej. Zakres analizowanych parametrów ruchowych daje duże możliwości wykorzystania metod taksonomicznych jako alternatywę w zamian za metody optymalizacyjne oparte na maksymalizacji bądź minimalizacji funkcji celu. Tego typu rozwiązania mogą mieć zastosowanie nie tylko w ocenie pracy sygnalizacji na podstawie miar efektywności, ale również mogą służyć do wyboru odpowiedniej filozofii sterowania dla danego obszaru sieci ulicznej. Mając na uwadze bardzo szybki rozwój algorytmów optymalizacyjnych przedstawione w artykule metody taksonomiczne mogą mieć zastosowanie w estymacji oraz prognozowaniu ruchu dla interwałów czasowych sterowania obszarowego lub w nadzorze nad pracą sygnalizacji w postaci możliwości odgraniczenia zaplanowanych scenariuszy sterowania dla warunków nietypowych.

THE UTILIZATION OF TAXONOMIC METHOD TO CHOOSE THE PROPER OPTIMIZATION NETWORK STRATEGY ON CROSSINGS CONTROLLED BY TRAFFIC LIGHTS

Present Urban Traffic Control Systems use optimization features based on minimization or maximization of the parameters which are used to control traffic. Commonly such system as British SCOOT, Australian SCATS or Dutch SPOT- UTOPIA contain optimization algorithms based on objective function. In article one introduced the use of multi-criteria of comparative analysis to choose proper optimization methods in the area of the street network. With taxonomic methods for classification of multi-feature objects one introduced possibility of the choosing suitable strategy of traffic control as the alternative for the optimization of the objective function.

LITERATURA

- [1] Jacyna M.: Wybrane zagadnienia modelowania systemów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [2] Pamuła W.: Metody optymalizacji wykorzystywane przez miejskie systemy sterowania ruchem. Logistyka 3/2011, Katowice 2011.
- [3] Lejda K., Łakota K.: Zastosowanie metody taksonomicznej do oceny natężenia ruchu drogowego. Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia, Rzeszów 2011.
- [4] Szwabowski J., Deszcz J.: Metody wielokryterialnej analizy porównawczej – podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań w budownictwie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
- [5] Łakota K., Lejda K.: Możliwości zastosowania taksonomii numerycznej w sterowaniu ruchem drogowym. Monografia: Systemy i środki transportu samochodowego – wybrane zagadnienia, Rzeszów 2010.
- [6] Pluta W.: Wielowymiarowa analiza porównawcza w badaniach ekonomicznych. PWE, Warszawa 1977.