

**Norbert CHAMIER-GLISZCZYŃSKI**

Politechnika Koszalińska  
Zakład Mechatroniki i Mechaniki Stosowanej  
75-453 Koszalin, ul. Śniadeckich 2  
norbert.chamier-gliszczynski@tu.koszalin.pl

## **KSZTAŁTOWANIE ZRÓWNOWAŻONEGO SYSTEMU TRANSPORTOWEGO W MIASTACH**

### **Streszczenie:**

W pracy zaprezentowano problematykę modelowania zrównoważonego systemu transportowego. Przedstawiono również analizę zachowań komunikacyjnych mieszkańców polskich miast. Analiza została przeprowadzona w odniesieniu do czterech parametrów tj. przedział czasu (pora dnia), odległość przewozu, czas realizacji zadania transportowego i rodzaj środka transportu.

Słowa kluczowe: zrównoważony system transportowy miasta.

### **WPROWADZENIE**

Zmiana stylu życia i uwarunkowań ekonomicznych znacząco przyczyniły się w ostatnim okresie czasu do zmiany zachowań komunikacyjnych mieszkańców miast. Dominującym środkiem transportu stał się samochód osobowy, co skutkuje wzrostem kongestii transportowej w miastach oraz alarmującym poziomem zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego i pogarszania się klimatu akustycznego obszarów miejskich. Problem ten zauważyła Komisja Europejska i wskazała na potrzebę budowy zrównoważonego systemu transportowego, który nie zagraża zdrowiu społeczeństw i ekosystemowi, a równocześnie zaspakaja potrzeby mobilności jego użytkowników. Równocześnie wskazano na realizację celu, jakim jest zrównoważone przemieszczanie się, którego rozwiązaniem jest optymalizacja zachowań komunikacyjnych mieszkańców aglomeracji miejskich.

### **1. ZRÓWNOWAŻONY SYSTEM TRANSPORTOWY MIASTA**

Model zrównoważonego systemu transportowego miasta (*MZSTM*) definiujemy jako uporządkowaną czwórkę postaci:

$$MZSTM = \langle G, F, P, O \rangle \quad (1)$$

gdzie:

*MZSTM* – model zrównoważonego systemu transportowego miasta,  
*G* – graf struktury zrównoważonego systemu transportowego miasta,  
*F* – zbiór funkcji określonych na węzłach i łukach grafu struktury ZSTM,  
*P* – potok ruchu,  
*O* – organizacja.

Strukturę zrównoważonego systemu transportowego miasta będziemy przedstawiać za pomocą grafu *G*, w którym każde połączenie jest odwzorowana w postaci łuku grafu.

Natomiast punkty docelowe odwzorowane są w postaci wierzchołków tego grafu. Graf ten zapisuje się w postaci [1, 2, 3]:

$$G = \langle W, L, R \rangle \quad (2)$$

gdzie:

$G$  – graf struktury zrównoważonego systemu transportowego miasta,

$W$  – zbiór numerów wierzchołków grafu (punktów docelowych podróży mieszkańców miasta)  $G$ , które interpretujemy jako węzły sieci transportowej,

$L$  – zbiór łuków grafu  $G$ , tj. zbiór, którego elementy interpretujemy jako bezpośrednie połączenie między poszczególnymi wierzchołkami (punktami docelowymi podróży mieszkańców miast) o numerach  $i$  oraz  $j$  grafu  $G$ ,

$$L = \{ \{w(i), w(j) \equiv (i, j)\} : i, j \in W, i \neq j \} \quad (3)$$

$R$  – odwzorowanie.

W analizowanym zrównoważonym systemie transportowym miasta wyróżniamy  $I$  wierzchołków grafu oraz  $K$  połączeń (łuków) grafu. Ponadto na iloczynie kartezjańskim  $W \times L \times W$  zadane jest odwzorowanie  $R$ , które jego elementy przeprowadza w zbiór  $\{0, 1\}$ , tj.:

$$R : W \times L \times W \rightarrow \{0, 1\} \quad (4)$$

Między dwoma wierzchołkami grafu  $G$  znajduje się bezpośrednie połączenie transportowe wtedy i tylko wtedy, gdy odwzorowanie  $R(i, k, j) = 1$ , w przeciwnym przypadku  $R(i, k, j) = 0$ .

Modelując zrównoważony system transportowy miast definiujemy charakterystyki ilościowe dla poszczególnych elementów struktury systemu. Wówczas do opisu wykorzystać możemy pojęcie sieci transportowej  $S$ , którą określamy jako trójkę uporządkowaną [1, 2, 3]:

$$S = \langle G, F_W, F_L \rangle \quad (5)$$

gdzie:

$G$  – graf struktury zrównoważonego systemu transportowego miasta,

$F_W$  – zbiór funkcji określonych na zbiorze wierzchołków grafu  $G$ ,

$$F_W = \{ \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_u \}, \quad u = 1, 2, \dots, U \quad (6)$$

$U$  – liczba odwzorowań określonych na zbiorze wierzchołków grafu  $G$ ,

$F_L$  – zbiór funkcji określonych na zbiorze połączeń w grafie  $G$ ,

$$F_L = \{ \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_z \}, \quad z = 1, 2, \dots, Z \quad (7)$$

$Z$  – liczba odwzorowań określonych na zbiorze połączeń grafu  $G$ .

Przemieszczanie się osób przez poszczególne węzły i połączenia tworzące strukturę zrównoważonego systemu transportowego miasta odwzorowuje potok ruchu. Potok ruchu napływa do systemu przez węzły będące punktami nadania określanymi jako wejście do systemu, następnie przemieszcza się przez szereg węzłów pośrednich, a wypływa przez węzły będące punktami odbioru określanymi jako wyjście z systemu. Pomiedzy poszczególnymi punktami zachodzi warunek [2]:

$$W = A \cup V \cup B \quad (8)$$

gdzie:

$W$  – zbiór wierzchołków grafu  $G$ ,

$A$  – zbiór punktów nadania,

$V$  – zbiór punktów pośrednich,

$B$  – zbiór punktów odbioru.

Związek pomiędzy uporządkowaną parą punktów ze zbioru punktów nadania i zbioru punktów odbioru stanowi relację podróży mieszkańców miasta [3]:

$$A \subset W, \quad B \subset W \quad (9)$$

Na tej podstawie możemy zdefiniować zbiór wszystkich relacji podróży  $T$  w sieci transportowej miasta:

$$T \subset (A \times B) = \{(a, b) : a \in A, b \in B\} \quad (10)$$

Równocześnie dla każdej relacji podróży zdefiniowany jest zbiór połączeń łączących poszczególne wierzchołki grafu sieci transportowej miasta. Zbiór ten będziemy oznaczać jako  $P^{ab}$ , gdzie  $P$  jest zbiorem wszystkich dróg w sieci transportowej miasta [2]:

$$P = \bigcup_{(a,b) \in E} P^{ab} \quad (11)$$

Wielkość potoku ruchu w sieci transportowej miasta między wyróżnioną parą wierzchołków  $(a, b)$  na zbiorze relacji podróży  $T$  definiujemy jako:

$$x(a, b) \equiv x^{ab} \quad (12)$$

Kolejnym elementem zrównoważonego systemu transportowego miasta jest organizacja ruchu. Dotyczy ona działań podejmowanych wewnątrz systemu, których zadaniem jest organizowanie potoku ruchu na ustalonym wyposażeniu w oparciu o napływający na wejściu do systemu potok ruchu. Celem podejmowanych działań jest poszukiwanie optymalnej organizacji ruchu, której odpowiada minimalizacji kosztów zewnętrznych transportu. W przypadku zrównoważonego systemu transportowego miasta do kosztów zewnętrznych transportu zaliczamy koszty związane z negatywnymi skutkami funkcjonowania transportu dla środowiska naturalnego.

W prowadzonych badaniach optymalizacyjnych zdefiniowano cztery parametry, które bezpośrednio wpływają na potok ruchu. Do parametrów tych zaliczamy: przedział czasu (pora dnia), odległości transportowe, czas trwania zadania transportowego, rodzaj środka transportu.

Przedział czasu (pora dnia)

Przyjmujemy, że na iloczynie kartezjańskim  $X^{ab} \times W \times W$  zadane jest odwzorowanie  $dt$ , postaci:

$$dt : X^{ab} \times W \times W \rightarrow R^+ \quad (13)$$

gdzie wielkość  $dt(a, b)$  jest liczbą rzeczywistą nieujemną o interpretacji przedziału czasu  $(i, j)$  określającego porę dnia w relacji przewozu  $(a, b)$ . Dla przejrzystości zapisu będziemy stosować poniższą notację:

$$dt((a, b), (i, j)) \equiv dt^{(a,b)}, \quad dt^{(a,b)} \geq 0 \quad (14)$$

Odległości transportowe

Przyjmujemy, że na iloczynie kartezjańskim  $X^{ab} \times W \times W$  zadane jest odwzorowanie  $d$ , postaci:

$$d : X^{ab} \times W \times W \rightarrow R^+ \quad (15)$$

gdzie wielkość  $d(a, b)$  jest liczbą rzeczywistą nieujemną o interpretacji dystansu pokonywanej odległości  $(i, j)$  w relacji przewozu  $(a, b)$ :

$$d((a, b), (i, j)) \equiv d^{(a,b)}, \quad d^{(a,b)} \geq 0 \quad (16)$$

Czas trwania zadania transportowego

Przyjmujemy, że na iloczynie kartezjańskim  $X^{ab} \times W \times W$  zadane jest odwzorowanie  $t$ , postaci:

$$t : X^{ab} \times W \times W \rightarrow R^+ \quad (17)$$

gdzie wielkość  $t(a, b)$  jest liczbą rzeczywistą nieujemną o interpretacji czasu trwania zadania transportowego  $(i, j)$  relacji przewozu  $(a, b)$ :

$$t((a, b), (i, j)) \equiv t^{(a,b)}, \quad t^{(a,b)} \geq 0 \quad (18)$$

Rodzaj środka transportu

Przyjmujemy, że na iloczynie kartezjańskim  $X^{ab} \times W \times W$  zadane jest odwzorowanie  $mt$ , postaci:

$$mt : X^{ab} \times W \times W \rightarrow R^+ \quad (19)$$

gdzie wielkość  $mt(a, b)$  jest liczbą rzeczywistą nieujemną o interpretacji wybranego rodzaju środka transportu  $(k)$  w relacji przewozu  $(a, b)$ :

$$mt((a, b), (k)) \equiv mt^{(a,b)}, \quad mt^{(a,b)} \geq 0 \quad (20)$$

## 2. BADANIA POTOKU RUCHU

Badania potoku ruchu występującego w zrównoważonym systemie transportowym miasta podzielono na trzy etapy.

Pierwszy etap to analiza wierzchołków  $W$  i połączeń  $L$  w grafie  $G$  przedstawiającego strukturę zrównoważonego systemu transportowego miast. Na podstawie przeprowadzonych badań zachowań komunikacyjnych mieszkańców 94 polskich miast [4] zbudowano graf  $GI$  (rys. 1):

$$GI = \langle W, L \rangle \quad (21)$$

gdzie:

$W$  – zbiór wierzchołków grafu,

$$W = \{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8\} \quad (22)$$

$L$  – zbiór połączeń w grafie,

$$L = \{l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, l_8, l_9, l_{10}, l_{11}, l_{12}\} \quad (23)$$

Zadaniem drugiego etapu było wyznaczenie elementów składowych poszczególnych parametrów bezpośrednio wpływających na potok ruchu.

Zbiór przedziału czasu został podzielony na pięć podzbiorów (zakresów):

$$dt = \{dt_1, dt_2, dt_3, dt_4, dt_5\} \quad (24)$$

gdzie:

$dt$  – przedział czasu,

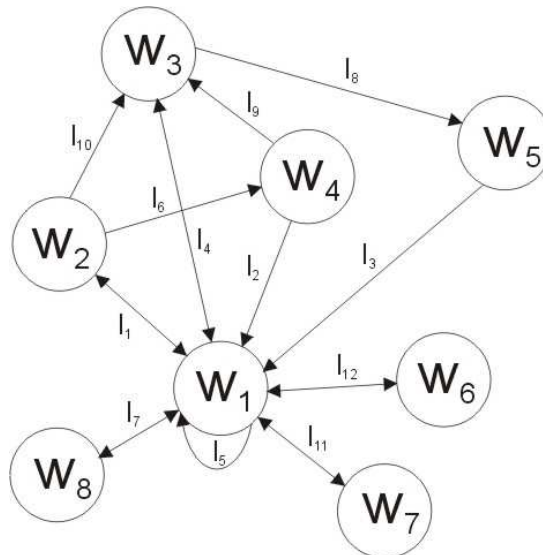
$dt_1$  – przedział czasu 6:00-9:59,

$dt_2$  – przedział czasu 10:00-14:59,

$dt_3$  – przedział czasu 15:00-17:59,

$dt_4$  – przedział czasu 18:00-21:59,

$dt_5$  – przedział czasu 22:00-5:59.



Rys. 1. Graf struktury zrównoważonego systemu transportowego miast.

Źródło: opracowanie własne.

Zbiór odległości transportowych podzielono na dwa podzbiory:

$$d = \{d_1, d_2\} \quad (25)$$

gdzie:

- $d$  – odległość transportowa,
- $d_1$  – odległość transportowa do 5 km,
- $d_2$  – odległość transportowa powyżej 5 km.

Zbiór czasu trwania zadania transportowego podzielono na siedem przedziałów czasowych:

$$t = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7\} \quad (26)$$

gdzie:

- $t$  – czas trwania zadania transportowego,
- $t_1$  – czas trwania zadania transportowego do 5 min,
- $t_2$  – czas trwania zadania transportowego od 6-10 min,
- $t_3$  – czas trwania zadania transportowego od 11-15 min,
- $t_4$  – czas trwania zadania transportowego od 16-20 min,
- $t_5$  – czas trwania zadania transportowego od 21-30 min,
- $t_6$  – czas trwania zadania transportowego od 31-60 min,
- $t_7$  – czas trwania zadania transportowego powyżej 60 min.

W zbiorze środków transportu wyszczególniono cztery środki transportu:

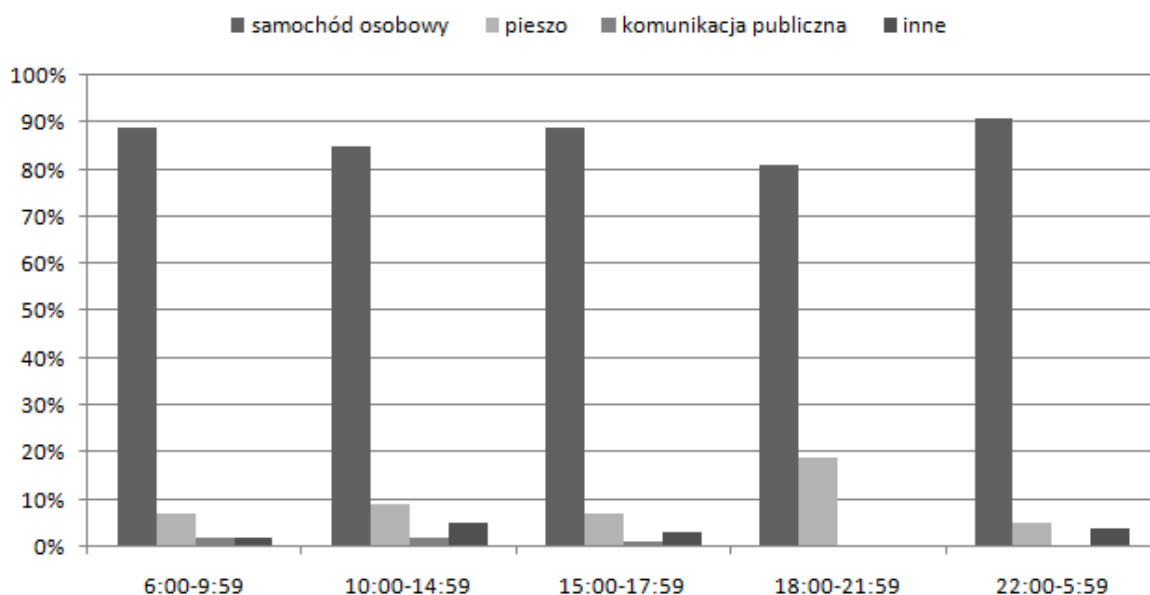
$$k = \{k_1, k_2, k_3, k_4\} \quad (27)$$

gdzie:

- $k$  – środek transportu,
- $k_1$  – samochód osobowy,
- $k_2$  – pieszo,
- $k_3$  – komunikacja publiczna,
- $k_4$  – inne.

Trzeci etap prowadzonych badań potoku ruchu w zrównoważonym systemie transportowym to badanie zachowań transportowych mieszkańców polskich miast. Badania obejmowały wykorzystanie poszczególnego rodzaju środka transportu w celu zaspokojenia potrzeb transportowych mieszkańców miast od poniedziałku do piątku w przedziale 24 godzinny [4].

Uwzględniając porę dnia (przedział czasu) przeważająca większość podróży wykonywanych była z użyciem samochodu osobowego (rys. 2). Najwięcej podróży 91% z użyciem samochodu osobowego realizowano w przedziale czasu 22:00-5:59. Równocześnie w okresie porannego i południowego szczytu komunikacyjnego (6:00-9:59 i 15:17:59) 89% podróży to podróże do zrealizowania, których wybrano samochód osobowy. W przedziale czasu 18:00-21:59 odnotowano 19% podróży realizowanych pieszo, a w pozostałych porach dniach tylko 7%, 9% i 5% podróży. Niepokojący jest niski poziom 2% i 1% podróży realizowanych przy użyciu środków komunikacji publicznej.

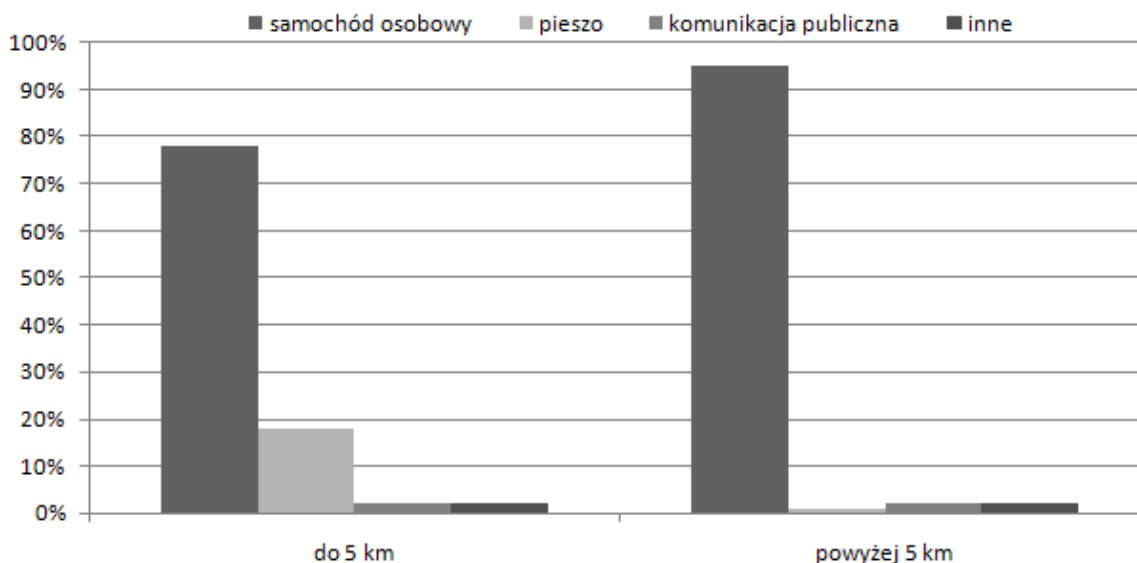


Rys. 2. Wykorzystanie środków transportu w zależności od pory dnia (przedział czasowy).

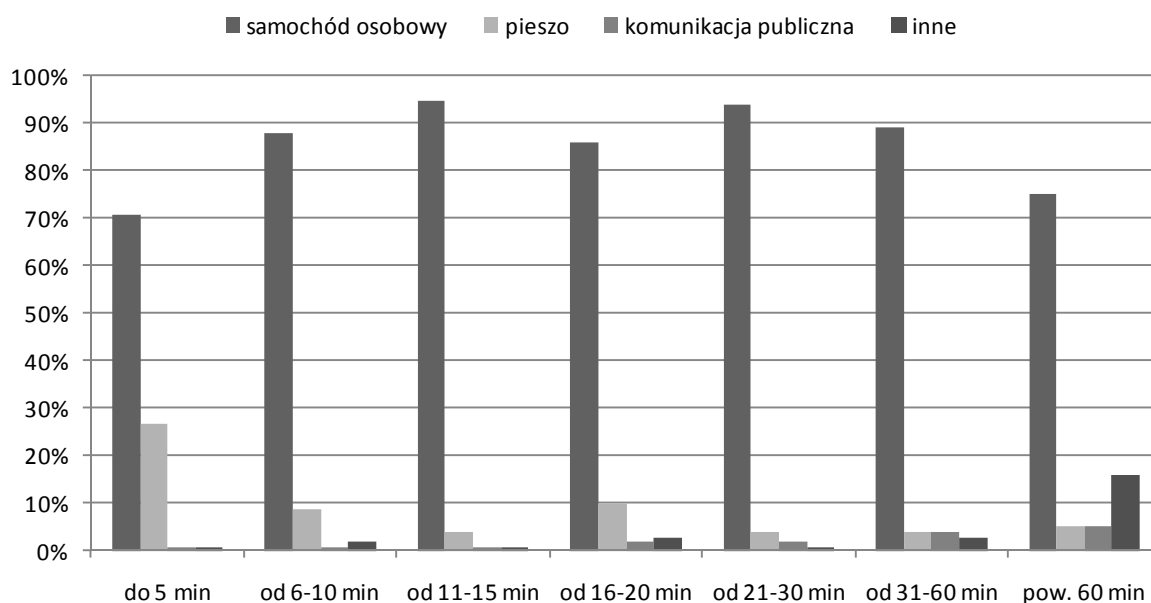
Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu [4].

Uwzględniając pokonywane odległości również w tym przypadku większość zadań transportowych była realizowana z wykorzystaniem samochodu osobowego (rys. 3). W przedziale odległości transportowej do 5 kilometrów dominującym środkiem transportowym do zaspakajania zadań transportowych mieszkańców miast również był samochód osobowy (78%). Jeszcze większy udział odnotowano w przedziale odległości transportowej powyżej 5 kilometrów (95%). Tylko niemal co piąty cel transportowy w przedziale odległości  $d_1$  był realizowany pieszo (18%). W obu zakresach odległości środki komunikacji publicznej odnotowały 1% i 2% udział.

Konsekwencją przeprowadzonej wyżej analizy jest dominujący udział samochodu osobowego w realizacji zadań transportowych, w których jako kryterium przyjęto czas trwania każdego zadania transportowego (rys. 4). W przedziałach  $t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$  odsetek zadań transportowych do zrealizowania, których wybrano samochód osobowy zawiera się w przedziale od 86% do 95%. Natomiast w przedziale  $t_1, t_2$  i  $t_3$  odnotowano odpowiedni 27%, 9% i 10% udział zadań transportowych realizowanych pieszo. W przypadku najdłuższego czasu trwania zadania transportowego  $t_7$  odnotowano spadek udziału samochodu osobowego (75%) na rzecz innych środków transportu.



Rys. 3. Wykorzystanie środków transportu w zależności od realizowanych odległości transportowych.  
 Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu [4].



Rys. 4. Wykorzystanie środków transportu w zależności od czasu trwania zadania transportowego.  
 Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu [4].

### 3. WNIOSKI

Zebrane w pracy informacje ukierunkowane są dwukierunkowo. Pierwszy kierunek to działania, których celem jest zamodelowanie zrównoważonego systemu transportowego w miastach. Zbudowany na tej podstawie model jest wykorzystywany w prowadzonych badaniach optymalizacyjnych zachowań komunikacyjnych mieszkańców miast. Drugi kierunek to podstawowe badania funkcjonującej struktury transportowej polskich miast. W badaniach tych przeanalizowano zachowania komunikacyjne mieszkańców miast

w odniesieniu do czterech wyszczególnionych parametrów tj. przedziału czasu (pory dnia), odległości transportowych, czasu trwania zadania transportowego, rodzaju środka transportu.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Ambroziak T.: Modelowanie systemów i procesów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [2] Jacyna M.: Modelowanie i ocena systemów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [3] Jarzębińska-Dziegciar A.: Optymalizacja nieliniowych sieci transportowych z wykorzystaniem algorytmów genetycznych. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Warszawa 2004.
- [4] Raport: Monitorowanie postaw społecznych w zakresie zrównoważonego transportu. Pierwszy etap. PBS DGA/Ministerstwo Środowiska, Sopot 06.2010.

## MODELING OF SUSTAINABLE TRANSPORT SYSTEM IN CITY

### Abstract:

The present study covers the issue of modelling of a sustainable transport system in a city. The results were presented of the investigations concerning communication related behaviour of city dwellers, as well.

Key words: sustainable transport system.