

Renata Żochowska

Politechnika Śląska

WIELOKRYTERIALNY MODEL DECYZYJNY DLA POTRZEB OPTIMALIZACJI TYMCZASOWEJ ORGANIZACJI RUCHU W SIECI MIEJSKIEJ

Rękopis dostarczono, maj 2015

Streszczenie: W artykule przedstawiono zasadnicze uwarunkowania budowy wielokryterialnego modelu decyzyjnego przy wyborze optymalnego wariantu tymczasowej organizacji ruchu w sieci miejskiej. Na tej podstawie opracowano zapis formalny elementów modelu, który wykorzystano w formułowaniu zadania optymalizacyjnego. Artykuł zawiera również opis metodyki wyboru optymalnego wariantu tymczasowej organizacji ruchu dla pojedynczego zdarzenia, która jest pierwszym etapem złożonego procesu planowania czasowych zmian w systemie transportowym miasta. W artykule zamieszczono przykład obliczeniowy, w którym do oceny oddziaływania wariantu tymczasowej organizacji ruchu wykorzystano wielokryterialną metodę TOPSIS.

Słowa kluczowe: tymczasowa organizacja ruchu, modelowanie wielokryterialne, optymalizacja ruchu w sieci miejskiej

1. WPROWADZENIE

Infrastruktura drogowa znajdująca się w obszarze miejskim powinna zapewniać bezpieczne i efektywne przemieszczanie osób oraz przewóz ładunków przy minimalizacji kosztów ruchu i szkodliwego wpływu na otoczenie. Jednocześnie jest ona często wykorzystywana przez różne gałęzie transportu, stanowiące podsystemy transportowe, które z jednej strony charakteryzują się odrębnymi cechami, a z drugiej silnie oddziałują na siebie. W związku tym nawet drobne zmiany w strukturze sieci drogowo-ulicznej mogą powodować istotne zakłócenia w przepływie potoków ruchu należących do różnych podsystemów transportowych funkcjonujących w mieście [14], [15], [27]. W takiej sytuacji racjonalne planowanie tymczasowej organizacji ruchu staje się szczególnie złożonym zagadnieniem.

Analiza procesów transportowych zachodzących w obszarze miejskim wymaga podziału tego obszaru na mniejsze jednostki terytorialne zwane rejonami transportowymi [1], [19]. Ponadto przyjmuje się, że każdy z tak wydzielonych rejonów opisany jest określonymi charakterystykami społeczno-demograficznymi oraz zagospodarowaniem

przestrzennym, które generują potrzeby transportowe. W klasycznym ujęciu [1], [19], [20] dla uproszczenia przyjmuje się założenie, że wszystkie czynniki ruchotwórcze skoncentrowane są w jednym punkcie w przestrzeni, nazywanym węzłem generującym ruch lub węzłem ciężenia. Sposób powiązania węzłów ciężenia z systemem transportowym miasta, definiowany określonym poziomem dostępności, wpływa na kształtowanie się ruchu w analizowanym obszarze [1], [19]. Stosowane w artykule pojęcie sieci miejskiej można więc określić jako zbiór węzłów położonych w obszarze miasta oraz połączeń między nimi, przy czym węzły i połączenia rozumiane są zarówno jako istniejące w rzeczywistości obiekty infrastruktury transportowej, jak i inne elementy związane z procesem przemieszczania się w obszarze miasta, tj. węzły ciężenia rejonów transportowych, odcinki odwzorowujące powiązania pomiędzy tymi węzłami i węzłami sieci transportowej oraz odcinki odwzorowujące wzajemne powiązania pomiędzy różnymi podsystemami transportowymi [45].

Na procesy transportowe zachodzące w obszarze miejskim oddziałuje wiele zdarzeń (np. roboty drogowe, imprezy masowe, awarie urządzeń usytuowanych w sieci miejskiej lub jej otoczeniu, kolizje i wypadki drogowe). Zdarzenia te w odpowiednich okolicznościach, opisanych stanem systemu transportowego, mogą powodować zakłócenia. Tymczasowa organizacja ruchu wprowadzana jest w celu minimalizacji negatywnych skutków takich zakłóceń. Wprowadzenie tymczasowej organizacji ruchu poprzedzone powinno być etapem planowania, na którym analizowane są różne warianty techniczne pod kątem oceny oddziaływania na system transportowy i jego otoczenie [43]. Konieczność uwzględnienia wzajemnie sprzecznych potrzeb uczestników procesu decyzyjnego uzasadnia potrzebę zastosowania metod wielokryterialnych wspomagających planowanie tymczasowej organizacji ruchu [45].

2. UWARUNKOWANIA WIELOKRYTERIALNEGO MODELU DECYZYJNEGO

Podstawowym narzędziem badawczym wspomagającym proces podejmowania decyzji jest model matematyczny. W przypadku wyboru optymalnego wariantu tymczasowej organizacji ruchu powinien on uwzględniać specyfikę analizowanego problemu i umożliwiać przeprowadzanie eksperymentów badawczych dla różnych sytuacji decyzyjnych. Prawdopodobnie skonstruowany model matematyczny powinien zawierać [11], [21], [25], [35]:

- dane określone parametrami modelu matematycznego – wielkości charakteryzujące daną sytuację decyzyjną, ustalane na etapie identyfikacji celu badań,
- zmienne decyzyjne – niewiadome, wyznaczone podczas rozwiązywania procesu decyzyjnego, których wartość liczbowa warunkowana jest układem ograniczeń i wartością funkcji celu,
- warunki ograniczające – układ ograniczeń określający przestrzeń decyzyjną przedstawioną w postaci zbioru rozwiązań dopuszczalnych,

- funkcję celu określaną jako wskaźnik oceny jakości rozwiązania – funkcja ściśle zależna od wartości zmiennych decyzyjnych.

Dla potrzeb analizy oddziaływań wariantów technicznych tymczasowej organizacji ruchu należy opracować taki model matematyczny, który uwzględni zależności pomiędzy poszczególnymi elementami systemu transportowego miasta oraz relacje z otoczeniem. W warunkach zmiennego popytu transportowego zakłócenia wynikające ze zmian charakterystyk podażowych w sieci miejskiej silnie oddziałują na kształtowanie się ruchu w kolejnych przedziałach czasu. Budowany model powinien zatem również umożliwiać odwzorowanie dynamicznych zmian w przepływie potoków ruchu przemieszczających się przez elementy sieci miejskiej zależnych od decyzji podejmowanych przez użytkowników systemu transportowego w odniesieniu do sposobu przemieszczania [36], [39], [40], [41], [44], [45], [46].

Analiza oddziaływań wariantów technicznych tymczasowej organizacji ruchu wymaga właściwego odwzorowania sieci miejskiej zarówno z punktu widzenia jej struktury, jak i charakterystyk opisanych na jej elementach. Konieczne jest również uwzględnienie specyfiki poszczególnych podsystemów transportowych różniących się między sobą m.in. elementami infrastruktury, środkami przewozowymi oraz organizacją. Ponadto ze względu na realizację wspólnego celu, jakim jest przemieszczanie osób i przewóz ładunków w sieci miejskiej, podsystemy te są ściśle ze sobą powiązane, co także wymaga odpowiedniego odwzorowania w opracowanym modelu. W związku z tym struktura modelu sieci miejskiej powinna zawierać [37], [38], [45]:

- struktury sieci dla poszczególnych podsystemów transportowych funkcjonujących w analizowanym mieście,
- struktury powiązań pomiędzy parami podsystemów transportowych,
- struktury powiązań sieci transportowych dla poszczególnych podsystemów z siecią osadniczą miasta.

Każdy element sieci miejskiej posiada określone charakterystyki, które wpływają na możliwości jego wykorzystania w celu realizacji przemieszczeń. Do takich charakterystyk należą zarówno wielkości niezmiennie w czasie analizy (np. długość elementu infrastruktury, jego zdolność przepustowa, średni czas przejazdu lub przejścia w warunkach niezakłóconych), jak i wielkości zależne od stanu systemu transportowego w poszczególnych przedziałach czasu (np. chwilowa zdolność przepustowa, czas przejazdu lub przejścia w zależności od stopnia zakłócenia).

Potok ruchu przemieszczający się przez poszczególne elementy struktury sieci miejskiej stanowi odwzorowanie popytu transportowego. W zależności od przyjętej długości przedziału czasu związanej z ustalonym poziomem zarządzania, sposób przejścia jednostki potoku ruchu może być przedstawiany w różny sposób. Dla celów modelowania potoku ruchu w sieci miejskiej ważne jest odwzorowanie [11], [13], [45]:

- wielkości potoku generowanego w węźleciążenia rejonu transportowego,
- rozłożenia przestrzennego ruchu wyrażonego w postaci wielkości potoku ruchu w określonej relacji przemieszczania,
- wielkości potoku dla ustalonego podsystemu transportowego,
- wielkości potoku na drodze w sieci miejskiej,
- wielkości potoku ruchu na elementach sieci miejskiej, czyli odcinkach odwzorowanych łukami oraz węzłach odwzorowanych wierzchołkami tej sieci.

Przy odwzorowaniu popytu transportowego istotna jest jego segmentacja. W związku z tym należy wyodrębnić grupy o jednorodnych zachowaniach transportowych, dla których budowane są oddzielne modele zakłóceń, uwzględniające sposób reakcji grupy użytkowników na zakłócenia wynikające z wprowadzenia określonego wariantu tymczasowej organizacji ruchu w funkcji informacji posiadanej przez każdą z grup w momencie planowania i realizacji podróży [41]. Dynamiczne ujęcie problematyki wymaga więc wprowadzenia odpowiedniego modelu czasu.

Istotnym elementem modelu decyzyjnego są zdarzenia planowane w sieci miejskiej lub jej otoczeniu i wymagające wprowadzenia tymczasowej organizacji ruchu. Przez zdarzenie należy tu więc rozumieć zarówno przedsięwzięcia i inwestycje, jak również imprezy masowe i inne wydarzenia organizowane w mieście. Każde z tych zdarzeń posiada określone charakterystyki (np. czas trwania, przedziały czasu, w których mogą wystąpić), które wpływają na możliwości zastosowania określonych rozwiązań organizacyjnych oraz stanowią podstawę przy uwzględnianiu ograniczeń i uwarunkowań w modelu optymalizacyjnym zawężając tym samym pole decyzyjne.

Podczas planowania tymczasowej organizacji ruchu należy przeanalizować różne warianty techniczne, które można zastosować przy realizacji określonego przedsięwzięcia. Każdy z dopuszczalnych wariantów technicznych tymczasowej organizacji ruchu może być realizowany w różnych przedziałach czasu. Warianty te opisują m.in. sposób:

- zabezpieczenia obszaru zajęcia pasa drogowego,
- zarządzania ruchem w czasie zajęcia pasa drogowego,
- przekazywania informacji o aktualnych warunkach ruchu.

Zadanie optymalizacyjne polegające na wyborze najlepszego wariantu tymczasowej organizacji ruchu powinno więc uwzględniać następujące elementy:

- model sieci miejskiej, odwzorowujący strukturę sieci miejskiej oraz charakterystyki określone na elementach tej struktury,
- potok ruchu, rozumiany jako odwzorowanie realizowanego lub planowanego popytu transportowego,
- organizację ruchu w sieci miejskiej, rozumianą jako sposób rozłożenia potoków ruchu dla poszczególnych relacji przemieszczania na elementy struktury sieci miejskiej uwarunkowany kryteriami rozpatrywanymi z punktu widzenia uczestników procesu decyzyjnego,
- model zakłóceń, rozumiany jako odwzorowanie zachowań transportowych użytkowników sieci miejskiej w warunkach tymczasowej organizacji ruchu z uwzględnieniem poziomu ich wiedzy o warunkach ruchu,
- model czasu, przedstawiający sposób odwzorowania zmienności pozostałych elementów modelu tymczasowej organizacji ruchu w czasie,
- model zdarzeń planowanych w sieci miejskiej i wymagających wprowadzenia tymczasowej organizacji ruchu, obejmujący ich charakterystykę, a także warianty techniczne tymczasowej organizacji ruchu oraz potencjał niezbędny do ich realizacji.

Tymczasowa organizacja ruchu często związana jest z realizacją zadań w ramach złożonego procesu inwestycyjnego związanego z wyposażeniem drogi lub jej otoczenia. Jest to więc zadanie złożone, wymagające uwzględnienia potrzeb wielu podmiotów zaangażowanych w ten proces. Często są to potrzeby wzajemnie sprzeczne, dlatego uzyskanie kompromisu, oprócz doboru odpowiednich wskaźników stanowiących kryteria

częstkowe wielokryterialnego zadania optymalizacyjnego, wymaga również przyjęcia pewnych ograniczeń warunkujących akceptację otrzymanego rozwiązania przez różne podmioty. Możliwość zastosowania optymalnego rozwiązania uwarunkowana jest również potencjałem rozpatrywanym w kategoriach technicznych, ludzkich i ekonomicznych wymaganych dla tego rozwiązania oraz możliwościami wykonawcy w tym zakresie. Ponadto w opracowanym modelu przyjęto następujące grupy ograniczeń:

- wynikające z charakterystyk technicznych elementów struktury sieci transportowej,
- nałożone na potok ruchu,
- warunkujące realizację planowanych przedsięwzięć,
- wynikające z zastosowanej technologii prowadzonych prac,
- wynikające z charakteru zmiennych decyzyjnych.

W modelach wielokryterialnego wspomaganie podejmowania decyzji zakłada się, że decydent określił skończony zbiór wariantów decyzyjnych oraz zdefiniował zbiór kryteriów oceny tych wariantów [12], [29]. Na podstawie ograniczeń nałożonych na warianty decyzyjne dla każdego z kryteriów oceny zostaje określony zbiór rozwiązań dopuszczalnych. W przypadku rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych dąży się do wyznaczenia takiego rozwiązania optymalnego, dla którego wielokryterialna funkcja celu osiąga wartość ekstremalną. W rzeczywistości jednak rzadko występuje sytuacja, kiedy istnieje rozwiązanie optymalne ze względu na wszystkie kryteria oceny. W związku z tym zadowalające staje się rozwiązanie kompromisowe. Najczęściej jest to rozwiązanie sprawne lub niezdominowane, zwane również rozwiązaniem paretooptymalnym [11], [26], [30], [34]. Rozwiązanie takie uzyskuje się, jeżeli w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych nie istnieje żadne inne rozwiązanie, które dominuje nad nim.

Wieloaspektowe ujęcie zagadnienia dotyczącego wyboru optymalnego wariantu tymczasowej organizacji ruchu wymaga rozpatrzenia kryteriów istotnych dla co najmniej kilku uczestników procesu decyzyjnego, którymi są podmioty zaangażowane w planowanie, realizację lub odczuwających skutki wprowadzenia tego wariantu. Takimi podmiotami mogą być zarówno wykonawcy robót, jak i użytkownicy systemu transportowego miasta oraz jego mieszkańcy. W wielokryterialnym modelu optymalizacyjnym każdemu z podmiotów przydzielone zostają ustalone kryteria cząstkowe.

3. FORMALIZACJA WIELOKRYTERIALNEGO MODELU DECYZYJNEGO

Celem budowy modelu decyzyjnego jest wielokryterialna ocena oddziaływania dopuszczalnych wariantów technicznych tymczasowej organizacji ruchu dla zdarzenia planowanego w sieci miejskiej oraz wybór wariantu optymalnego. W związku z tym określono **zbiór numerów wszystkich zdarzeń** wymagających wprowadzenia tymczasowej organizacji ruchu w badanym obszarze w analizowanym okresie planowania jako:

$$\mathbf{ZD} = \{1, \dots, zd, \dots, \overline{\mathbf{ZD}}\}, \quad (1)$$

gdzie $\overline{\mathbf{ZD}}$ oznacza liczbę wszystkich zdarzeń (liczebność zbioru \mathbf{ZD}) planowanych w analizowanym okresie.

Dla pojedynczego zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$ określono zbiór numerów **wariantów technicznych tymczasowej organizacji ruchu** w postaci:

$$\mathbf{VOR}^{zd} = \{1, \dots, vor, vor', \dots, \overline{\mathbf{VOR}^{zd}}\}, \quad zd \in \mathbf{ZD}, \quad (2)$$

gdzie $\overline{\mathbf{VOR}^{zd}}$ oznacza liczbę możliwych wariantów technicznych tymczasowej organizacji ruchu dla realizacji zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$.

Cały okres analizy podzielono na ustaloną liczbę przedziałów o jednakowej długości, która zależy od przyjętego poziomu zarządzania. W modelu założono, że dla analizowanego zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$ znany jest najwcześniejszy moment rozpoczęcia oraz najpóźniejszy moment zakończenia realizacji tymczasowej organizacji ruchu. Na tej podstawie można określić zbiór \mathbf{T}^{zd} zawierający numery przedziałów czasu, w których może być wprowadzana tymczasowa organizacja ruchu dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$, co zapisano jako:

$$\mathbf{T}^{zd} = \{1, \dots, t, t', \dots, \overline{\mathbf{T}^{zd}}\}, \quad zd \in \mathbf{ZD}, \quad (3)$$

gdzie $\overline{\mathbf{T}^{zd}}$ oznacza liczbę wszystkich przedziałów, w których można wprowadzać tymczasową organizację ruchu dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$.

Uwzględniając powyższe można zapisać, że celem budowy modelu decyzyjnego jest ustalenie dla pojedynczego planowanego zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$:

- numeru wariantu technicznego tymczasowej organizacji ruchu $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$,
- przedziału czasu (t, t') , w którym nastąpi wprowadzenie tymczasowej organizacji ruchu, gdzie $t, t' \in \mathbf{T}^{zd}$.

Przy założeniu, że znany jest czas trwania tymczasowej organizacji ruchu (oznaczony jako $tz(vor)$) dla każdego z wariantów technicznych $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$, numer przedziału czasu t' , w którym nastąpi zakończenie prowadzenia działań związanych ze zdarzeniem zd i powrót do stałej organizacji ruchu można wyznaczyć jako:

$$t' = t + tz(vor). \quad (4)$$

Elementy modelu decyzyjnego **MOWTOR** oceny oddziaływania wariantów technicznych tymczasowej organizacji ruchu dla pojedynczego planowanego zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$ w poszczególnych przedziałach czasu można zapisać jako:

$$\mathbf{MOWTOR}^{zd}(t, vor) = \langle \mathbf{MSSM}(t, vor), \mathbf{K}, \mathbf{FK}, \mathbf{XE}(t, vor), \mathbf{XP}(t, vor), \mathbf{FZD}^{zd}, \mathbf{PT}^{zd} \rangle, \\ t \in \mathbf{T}^{zd}, \quad vor \in \mathbf{VOR}^{zd}, \quad zd \in \mathbf{ZD}, \quad (5)$$

gdzie:

MSSM(t, vor) - model sieci miejskiej, opisujący stan sieci w przedziale czasu $t \in \mathbf{T}^{zd}$ przy zastosowaniu wariantu $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$,

K - zbiór zawierający numery grup użytkowników systemu transportowego o jednorodnych zachowaniach transportowych

- FK** - macierz zawierająca wartości charakterystyk określonych dla poszczególnych grup użytkowników o jednorodnych zachowaniach transportowych,
- XE**(t, vor) - potok ruchu o interpretacji popytu transportowego w przedziale czasu $t \in T^{zd}$ przy zastosowaniu wariantu $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$,
- XP**(t, vor) - organizacja ruchu w sieci miejskiej w przedziale czasu $t \in T^{zd}$ przy zastosowaniu wariantu $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$,
- FZD**^{zd} - wektor zawierający wartości funkcji określonych dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$,
- PT**^{zd} - wielkości potencjałów technicznego, ludzkiego i ekonomicznego niezbędnych do wykonania czynności związanych ze zdarzeniem $zd \in \mathbf{ZD}$.

Model sieci miejskiej MSSM(t, vor) obejmuje [11], [12], [13], [37], [38]:

- strukturę sieci miejskiej, przedstawiającą powiązania pomiędzy miejscami początkowymi i końcowymi przemieszczania z uwzględnieniem różnych podsystemów transportowych,
- charakterystyki elementów struktury sieci miejskiej, przedstawiające właściwości elementów struktury istotne z punktu widzenia oceny wariantu tymczasowej organizacji ruchu,

co można przedstawić jako:

$$\mathbf{MSSM}(t, vor) = \langle \mathbf{G}, \mathbf{F}(t, vor) \rangle, \quad t \in T^{zd}, \quad vor \in \mathbf{VOR}^{zd}, \quad zd \in \mathbf{ZD}, \quad (6)$$

przy czym:

G - graf struktury sieci miejskiej, opisany jako:

$$\mathbf{G} = \langle \mathbf{W}, \mathbf{L} \rangle, \quad (7)$$

gdzie

W - zbiór numerów wierzchołków odwzorowujących węzły sieci miejskiej **MSSM**(t, vor), tj.:

$$\mathbf{W} = \{1, \dots, w, w', \dots, \bar{W}\}, \quad (8)$$

L - zbiór łuków odwzorowujących odcinki sieci miejskiej **MSSM**(t, vor), tj.:

$$\mathbf{L} = \{(w, w') : (w, w') \in \mathbf{W}\}, \quad (9)$$

F(t, vor) - macierz zawierająca wartości funkcji określonych na elementach grafu struktury sieci miejskiej w przedziale czasu $t \in T$ przy zastosowaniu wariantu $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$, opisana jako:

$$\mathbf{F}(t, vor) = \langle \mathbf{FW}(t, vor), \mathbf{FL}(t, vor) \rangle, \quad t \in T^{zd}, \quad vor \in \mathbf{VOR}^{zd}, \quad zd \in \mathbf{ZD}, \quad (10)$$

gdzie:

FW(t, vor) - macierz zawierająca wartości funkcji określonych na wierzchołkach grafu struktury sieci miejskiej w przedziale czasu $t \in T$ przy zastosowaniu wariantu $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$, opisana jako:

$$\mathbf{FW}(t, vor) = [fw^{iw}(w, t, vor): w \in \mathbf{W}, iw = 1, 2, \dots, \overline{IW}],$$

$$t \in \mathbf{T}^{zd}, \quad vor \in \mathbf{VOR}^{zd}, \quad zd \in \mathbf{ZD}, \quad (11)$$

przy czym:

iw - numer funkcji określonej na wierzchołkach grafu struktury sieci miejskiej,

\overline{IW} - liczba funkcji określonych na wierzchołkach grafu struktury sieci miejskiej,

$\mathbf{FL}(t, vor)$ - macierz zawierająca wartości funkcji określonych na łukach grafu struktury sieci miejskiej w przedziale czasu $t \in \mathbf{T}$ przy zastosowaniu wariantu $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$, opisana jako:

$$\mathbf{FL}(t, vor) = [fl^{il}((w, w'), t, vor): (w, w') \in \mathbf{L}, il = 1, 2, \dots, \overline{IL}],$$

$$t \in \mathbf{T}^{zd}, \quad vor \in \mathbf{VOR}^{zd}, \quad zd \in \mathbf{ZD}, \quad (12)$$

przy czym:

il - numer funkcji określonej na łukach grafu struktury sieci miejskiej,

\overline{IL} - liczba funkcji określonych na łukach grafu struktury sieci miejskiej,

Zbiór \mathbf{K} zawierający numery grup użytkowników systemu transportowego o jednorodnych zachowaniach transportowych zapisano jako:

$$\mathbf{K} = \{1, \dots, k, \dots, \overline{K}\}, \quad (13)$$

gdzie \overline{K} oznacza liczbę grup użytkowników o jednorodnych zachowaniach transportowych, które wydzielono w ramach segmentacji popytu transportowego.

Natomiast macierz \mathbf{FK} zawierającą wartości charakterystyk określonych dla poszczególnych grup użytkowników o jednorodnych zachowaniach transportowych, zapisano jako:

$$\mathbf{FK} = [fk^{ik}(k): k \in \mathbf{K}, ik = 1, 2, \dots, \overline{IK}], \quad (14)$$

gdzie:

ik - numer funkcji określonej dla grup użytkowników o jednorodnych zachowaniach transportowych,

\overline{IK} - liczba funkcji określonych grup użytkowników o jednorodnych zachowaniach transportowych.

Potok ruchu $\mathbf{XE}(t, vor)$ o interpretacji popytu transportowego w przedziale czasu $t \in \mathbf{T}^{zd}$ przy zastosowaniu wariantu $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$ zapisany został w postaci macierzowej jako:

$$\mathbf{XE}(t, vor) = [x_k^{(a,b)}(t, vor) \equiv x(k, (a, b), t, vor): (a, b) \in \mathbf{E}, k \in \mathbf{K}],$$

$$t \in \mathbf{T}^{zd}, \quad vor \in \mathbf{VOR}^{zd}, \quad zd \in \mathbf{ZD}, \quad (15)$$

gdzie:

E - zbiór relacji przemieszczania, opisany jako:

$$E = \{(a, b): a \in A, b \in B\}, \quad (16)$$

przy czym:

A - zbiór wierzchołków grafu G , mających interpretację źródeł potoku ruchu ($A \subset W$),

B - zbiór wierzchołków grafu G , mających interpretację źródeł potoku ruchu ($B \subset W$).

Organizacja ruchu w sieci miejskiej w przedziale czasu $t \in T^{zd}$ przy zastosowaniu wariantu $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$ opisana jest w postaci macierzy $\mathbf{XP}(t, vor)$ zawierającej wartości o interpretacji wielkości potoku ruchu na poszczególnych drogach w sieci miejskiej, co zapisano jako:

$$\mathbf{XP}(t, vor) = \left[\begin{array}{l} x_k^{p(a,b)}(t, vor) \equiv x(k, p(a, b), t, vor): \quad p^{(a,b)} \in \mathbf{PE}^{(a,b)}, \\ (a, b) \in E, k \in K \end{array} \right], \quad (17)$$

$$t \in T^{zd}, \quad vor \in \mathbf{VOR}^{zd}, \quad zd \in \mathbf{ZD},$$

gdzie:

$\mathbf{PE}^{(a,b)}$ - zbiór numerów dróg dla relacji przemieszczania (a, b) , opisany jako:

$$\mathbf{PE}^{(a,b)} = \{p^{(a,b)} \equiv p(a, b): (a, b) \in E\}. \quad (18)$$

Wektor \mathbf{FZD}^{zd} zawierający wartości funkcji określonych dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$, zapisano jako:

$$\mathbf{FZD}^{zd} = \langle fzd^{izd}: \quad izd = 1, 2, \dots, \overline{IZD} \rangle, \quad zd \in \mathbf{ZD}, \quad (19)$$

gdzie:

izd - numer funkcji określonej dla analizowanego zdarzenia,

\overline{IZD} - liczba funkcji określonych dla analizowanego zdarzenia.

Wielkości potencjału niezbędnego do wykonania czynności związanych ze zdarzeniem $zd \in \mathbf{ZD}$ zapisano w postaci wektora jako:

$$\mathbf{PT}^{zd} = \langle \mathbf{PTT}^{zd}, \mathbf{PTL}^{zd}, \mathbf{PTE}^{zd} \rangle, \quad zd \in \mathbf{ZD}, \quad (20)$$

gdzie:

\mathbf{PTT}^{zd} - potencjał techniczny wykonawców niezbędny do realizacji zadań związanych ze zdarzeniem $zd \in \mathbf{ZD}$, zapisany w postaci:

$$\mathbf{PTT}^{zd} = [ptt^{zd}(t, vor) \equiv ptt(zd, t, vor): \quad t \in T^{zd}, \quad vor \in \mathbf{VOR}^{zd}], \quad (21)$$

$$zd \in \mathbf{ZD},$$

\mathbf{PTL}^{zd} - potencjał ludzki wykonawców niezbędny do realizacji zadań związanych ze zdarzeniem $zd \in \mathbf{ZD}$, zapisany w postaci:

$$\mathbf{PTL}^{zd} = [ptl^{zd}(t, vor) \equiv ptl(zd, t, vor): \quad t \in T^{zd}, \quad vor \in \mathbf{VOR}^{zd}], \quad (22)$$

$$zd \in \mathbf{ZD},$$

\mathbf{PTE}^{zd} - potencjał ekonomiczny wykonawców niezbędny do realizacji zadań związanych ze zdarzeniem $zd \in \mathbf{ZD}$, zapisany w postaci:

$$\mathbf{PTE}^{zd} = [pte^{zd}(t, vor) \equiv pte(zd, t, vor): \quad t \in \mathbf{T}^{zd}, \quad vor \in \mathbf{VOR}^{zd}],$$

$$zd \in \mathbf{ZD}. \quad (23)$$

Wielokryterialny model decyzyjny oceny oddziaływania tymczasowej organizacji ruchu dla pojedynczego zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$ w sieci miejskiej **MSSM** sformułowano w następującej postaci:

– dla zadanych:

- przedziałów czasu, w których może być wprowadzana tymczasowa organizacja ruchu dla analizowanego zdarzenia, zapisanych w postaci zbioru \mathbf{T}^{zd} według wzoru (3),
- wariantów technicznych tymczasowej organizacji ruchu dla analizowanego zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$, zapisanych w postaci zbioru \mathbf{VOR}^{zd} według wzoru (2),
- struktury sieci miejskiej przedstawionej w postaci grafu \mathbf{G} według wzoru (7),
- charakterystyk określonych dla elementów struktury sieci miejskiej w przedziale czasu $t \in \mathbf{T}^{zd}$ przy zastosowaniu wariantu $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$, zapisanych w postaci macierzy $\mathbf{F}(t, vor)$ według wzoru (10),
- grup użytkowników systemu transportowego o jednorodnych zachowaniach transportowych, zapisanych w postaci zbioru \mathbf{K} według wzoru (13),
- charakterystyk określonych dla grup użytkowników systemu transportowego o jednorodnych zachowaniach transportowych, zapisanych w postaci macierzy \mathbf{FK} według wzoru (14),
- wielkości popytu transportowego w przedziale czasu $t \in \mathbf{T}^{zd}$ przy zastosowaniu wariantu $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$, zapisanego w postaci macierzy $\mathbf{XE}(t, vor)$ według wzoru (15),
- organizacji ruchu w sieci miejskiej w przedziale czasu $t \in \mathbf{T}^{zd}$ przy zastosowaniu wariantu $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu dla zdarzenia $zd \in \mathbf{ZD}$, zapisanej w postaci macierzy $\mathbf{XP}(t, vor)$ według wzoru (17),
- wartości charakterystyk określonych dla analizowanego zdarzenia, zapisanych w postaci wektora \mathbf{FZD}^{zd} według wzoru (19),
- potencjału technicznego wykonawców niezbędnego do realizacji zadań związanych ze zdarzeniem $zd \in \mathbf{ZD}$, zapisanego w postaci macierzy \mathbf{PTT}^{zd} według wzoru (21),
- potencjału ludzkiego wykonawców niezbędnego do realizacji zadań związanych ze zdarzeniem $zd \in \mathbf{ZD}$, zapisanego w postaci macierzy \mathbf{PTL}^{zd} według wzoru (22),
- potencjału ekonomicznego wykonawców niezbędnego do realizacji zadań związanych ze zdarzeniem $zd \in \mathbf{ZD}$, zapisanego w postaci macierzy \mathbf{PTE}^{zd} według wzoru (23),

- **należy wyznaczyć wartości liczbowe zmiennych decyzyjnych:**
 - $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$, mającej interpretację numeru wariantu technicznego tymczasowej organizacji ruchu,
 - $t \in \mathbf{T}^{zd}$, mającej interpretację numeru przedziału czasu, w którym następuje wprowadzenie tymczasowej organizacji ruchu,
- **przy spełnieniu:**
 - warunków wynikających z charakterystyk technicznych elementów struktury sieci miejskiej:
 - wielkość potoku przemieszczającego się przez łuk grafu \mathbf{G} , odpowiadający odcinkowi, na którym w przedziale czasu $t \in \mathbf{T}^{zd}$ **występuje zajęcie pasa drogowego** według wariantu technicznego $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu, nie przekracza jego **zdolności przepustowej**,
 - wielkość potoku przemieszczającego się przez dowolny łuk grafu \mathbf{G} , odpowiadający odcinkowi, na którym w przedziale czasu $t \in \mathbf{T}^{zd}$ **nie występuje zajęcie pasa drogowego** według wariantu technicznego $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu, nie przekracza jego **zdolności przepustowej**,
 - **średni czas przemieszczania** się potoku ruchu przez dowolny **łuk grafu \mathbf{G}** przy występowaniu zakłóceń spowodowanych zajęciem pasa drogowego nie może być niższy niż średni czas przemieszczania jednostki potoku ruchu przez ten element w sytuacji braku zakłóceń,
 - **średni czas przejścia** potoku ruchu przez dowolny **wierzchołek grafu \mathbf{G}** przy występowaniu zakłóceń spowodowanych zajęciem pasa drogowego nie może być niższy niż średni czas przejścia jednostki potoku ruchu przez ten element w sytuacji braku zakłóceń,
 - **średnia prędkość przemieszczania** się potoku ruchu przez dowolny **łuk grafu \mathbf{G}** przy występowaniu zakłóceń spowodowanych zajęciem pasa drogowego nie może być wyższa niż średnia prędkość przemieszczania przez ten element jednostki potoku ruchu w sytuacji braku zakłóceń,
 - **średnia prędkość przejścia** potoku ruchu przez dowolny **wierzchołek grafu \mathbf{G}** przy występowaniu zakłóceń spowodowanych zajęciem pasa drogowego nie może być wyższa niż średnia prędkość przejścia przez ten element jednostki potoku ruchu w sytuacji braku zakłóceń,
 - ograniczeń warunkujących realizację planowanych przedsięwzięć,
 - ze względu na potencjał techniczny,
 - ze względu na potencjał ludzki,
 - ze względu na potencjał ekonomiczny,

- warunków i ograniczeń nałożonych na potok ruchu:
 - **nieujemności potoku ruchu** na łukach grafu \mathbf{G} w przedziale czasu $t \in T^{zd}$ przy tymczasowej organizacji ruchu zgodnej z wariantem technicznym $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$,
 - **addytywności potoku ruchu** na łukach grafu \mathbf{G} w przedziale czasu $t \in T^{zd}$ przy tymczasowej organizacji ruchu zgodnej z wariantem technicznym $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$,
 - **zachowania potoku ruchu** w wierzchołkach grafu \mathbf{G} w przedziale czasu $t \in T^{zd}$ przy tymczasowej organizacji ruchu zgodnej z wariantem technicznym $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$,
 - ograniczeń wynikających z charakteru zmiennych decyzyjnych,
 - przyjmowanie przez zmienne decyzyjne $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ oraz $t \in T^{zd}$ wartości ze zbioru liczb całkowitych dodatnich,
- dla których funkcja kryterium F przedstawiona wyrażeniem:

$$F = \langle F_1(vor, (t, t')), F_2(vor, (t, t')), F_3(vor, (t, t')) \rangle, \quad (24)$$

gdzie

$F_1(vor, (t, t'))$ - ocena wariantu technicznego $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu w przedziale czasu $\langle t, t' \rangle$, $t, t' \in T^{zd}$ z punktu widzenia **użytkowników systemu transportowego miasta** (np. kierowców, pasażerów, pieszych),

$F_2(vor, (t, t'))$ - ocena wariantu technicznego $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu w przedziale czasu $\langle t, t' \rangle$, $t, t' \in T^{zd}$ z punktu widzenia **podmiotów zgłaszających potrzebę wprowadzenia tymczasowej organizacji ruchu** (np. wykonawców robót, organizatorów imprez masowych),

$F_3(vor, (t, t'))$ - ocena wariantu technicznego $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu w przedziale czasu $\langle t, t' \rangle$, $t, t' \in T^{zd}$ z punktu widzenia **otoczenia systemu transportowego** (np. mieszkańców, właścicieli obiektów usługowo-handlowych),

osiągać będzie **wartość minimalną**.

4. METODYKA WYBORU OPTYMALNEGO WARIANTU TYMCZASOWEJ ORGANIZACJI RUCHU W SIECI MIEJSKIEJ

Przy wyborze konkretnych metod optymalizacji należy wziąć pod uwagę dwie zasadnicze grupy algorytmów:

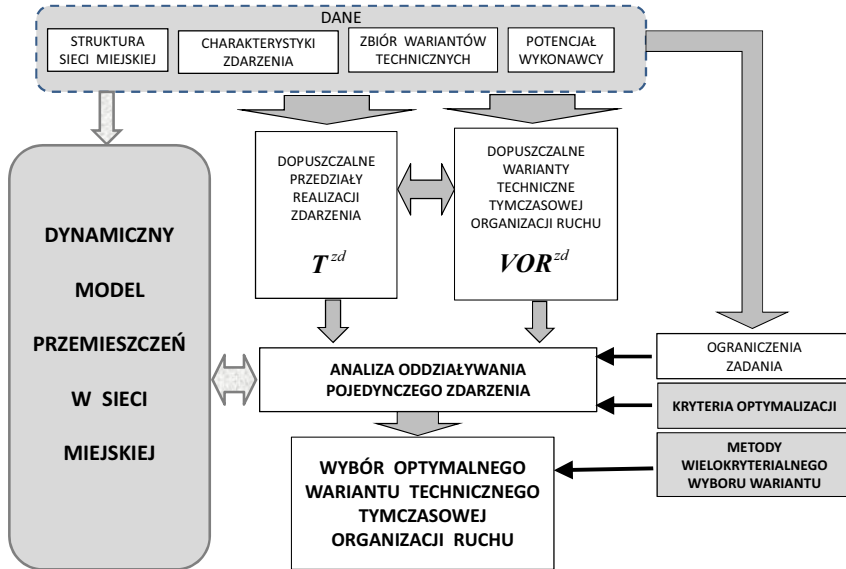
- metody dokładne, gwarantujące uzyskanie rozwiązań optymalnych,
- metody przybliżone (heurystyczne), umożliwiające uzyskanie rozwiązań akceptowalnych, wystarczająco zbliżonych do optymalnych.

W pierwszym przypadku wykorzystuje się analityczne procedury matematyczne, w związku z czym metody te mogą mieć zastosowanie przy rozwiązywaniu zadań o mniejszych rozmiarach. Metody należące do drugiej grupy są dedykowane do problemów o większej złożoności obliczeniowej. W tej grupie można wyróżnić heurystyki specjalizowane, dostosowane do warunków określonego problemu decyzyjnego oraz algorytmy metaheurystyczne, do których należą m.in. [32]: algorytmy lokalnego poszukiwania (ang. *neighbourhood search algorithms*), przeszukiwanie z tabu (ang. *tabu search*), symulowane wyżarzanie (ang. *simulated annealing*), hybrydowe algorytmy genetyczne (ang. *hybrid genetic algorithms*) oraz algorytmy inspirowane badaniami nad inteligencją dużych grup prostych stworzeń, np. algorytmy mrówkowe (ang. *ant colony algorithms*), roju pszczół (ang. *bees algorithms*) oraz świetlikowe (ang. *firefly algorithms*). Metody konstruowania algorytmów heurystycznych omówiono szeroko m.in. w pracach F. Glovera i G. Kochenbergera [5], L. N. Castro i J. Timminsa [2], C. Smutnickiego [24], Z. Michalewicz i D. B. Fogla [17] oraz A. P. Engelbrechta [4]. Praktyczne przykłady wykorzystania takich algorytmów w rozwiązywaniu problemów transportowych i logistycznych przedstawiono m.in. w publikacjach [9], [10], [28], [33].

Schemat postępowania przy wyborze optymalnego wariantu technicznego tymczasowej organizacji ruchu w sieci miejskiej przedstawiono na rys. 1. Na podstawie danych obejmujących strukturę sieci miejskiej, charakterystyki określone dla analizowanego zdarzenia, zbiór wariantów technicznych tymczasowej organizacji ruchu oraz potencjał wykonawcy robót określany jest zbiór T^{zd} zawierający możliwe przedziały realizacji zdarzenia oraz ustalany jest zbiór VOR^{zd} dopuszczalnych wariantów technicznych tymczasowej organizacji ruchu. W znacznym stopniu ogranicza to przestrzeń decyzyjną zadania.

Integralnym elementem metodyki jest dynamiczny model przemieszczeń w sieci miejskiej wykorzystywany do oceny oddziaływań różnych wariantów tymczasowej organizacji ruchu podczas procesu obliczeniowego. W proponowanym modelu proces przemieszczeń rozumiany jest jako ciąg stanów systemu transportowego i jego otoczenia w kolejnych przedziałach czasu. Dla zagadnienia analizy zakłóceń istotna jest zmienność wielkości potoku ruchu rozumianego zarówno jako popyt transportowy $\mathbf{XE}(t, vor)$, jak i potoku $\mathbf{XP}(t, vor)$ przemieszczającego się po elementach sieci miejskiej oraz zmienność wartości charakterystyk $\mathbf{F}(t, vor)$ opisanych na zbiorach węzłów i odcinków sieci miejskiej. W zależności od stanu systemu transportowego w danym momencie oddziaływanie zdarzenia przy określonym wariancie technicznym tymczasowej organizacji ruchu może być różne. Zdarzenie określonego typu wywołuje zakłócenie w określonym

przedziale czasu, jeżeli występuje w tym przedziale duża podatność systemu transportowego na zdarzenia tego typu [47]. Należy przez to rozumieć występowanie w danym przedziale czasu szeregu czynników i uwarunkowań, powodujących, że prawdopodobieństwo wystąpienia zakłócenia na skutek zajścia zdarzenia określonego typu jest duże.



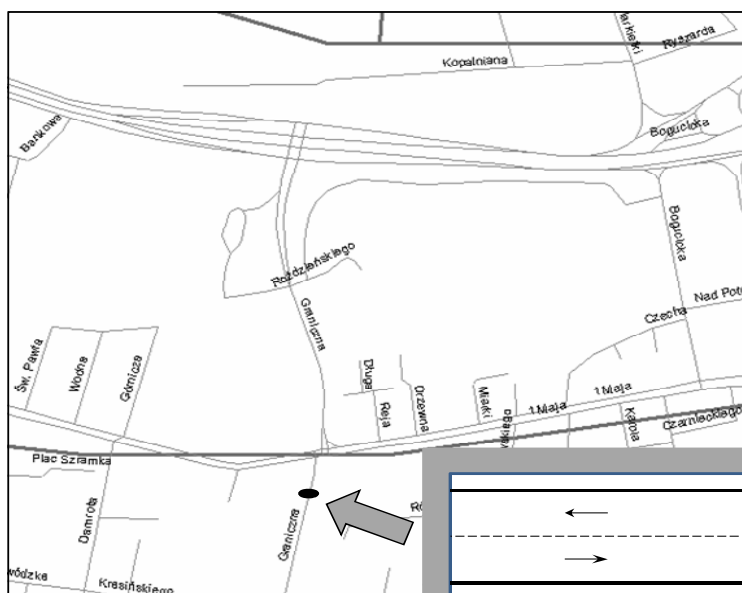
Rys. 1. Schemat wielokryterialnego modelu decyzyjnego wyboru optymalnego wariantu technicznego tymczasowej organizacji ruchu w sieci miejskiej

Przy opracowywaniu algorytmu służącego do odwzorowania przemieszczeń w sieci miejskiej założono iteracyjne stopniowe zapewnianie tej sieci z uwzględnieniem optymalnego rozłożenia potoków ruchu w każdym kroku odpowiadającym kolejnemu przedziałowi czasu [36], [45]. Idea takiego postępowania opiera się częściowo na założeniach i strukturze klasycznej procedury ograniczonych przepustowości [3], [18], [22], [23] stosowanej przy rozłożeniu potoków ruchu na sieć transportową z wykorzystaniem czterostopniowego modelu podróży, przy czym ograniczeniem nie jest zdolność przepustowa, ale zaobserwowane natężenia ruchu na odcinkach sieci drogowo-ulicznej przy ustalonym poziomie dokładności [42]. Tak przedstawiony sposób postępowania ma charakter algorytmu heurystycznego, w którym funkcja celu minimalizowana jest dla każdego przedziału czasu. W ten sposób uzyskiwane są takie wartości elementów macierzy podróży, które po rozłożeniu na elementy sieci transportowej dają wartości o założonym poziomie zbieżności z wielkością ruchu zaobserwowaną w rzeczywistości. Przy ocenie oddziaływania określonego wariantu technicznego na kształtowanie ruchu w sieci miejskiej można wykorzystać również istniejące procedury stosowane w komercyjnych specjalistycznych narzędziach informatycznych [48].

Na podstawie wyników uzyskanych z dynamicznego modelu przemieszczeń przeprowadzana jest analiza oddziaływania pojedynczego zdarzenia z punktu widzenia wybranych kryteriów. W kolejnym etapie spośród zbioru dopuszczalnych wariantów technicznych wybierany jest wariant optymalny. W tym celu można wykorzystać jedną z wielu metod optymalizacji wielokryterialnej¹.

5. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Aby przedstawić sposób oceny oddziaływania zakłóceń spowodowanych wprowadzeniem tymczasowej organizacji ruchu z wykorzystaniem wielokryterialnego modelu decyzyjnego wybrano odcinek ulicy Granicznej zlokalizowany w ścisłym centrum Katowic. Przekrój pasa ulicznego przedstawiono na rys. 2. Odcinkiem tym w okresach szczytu komunikacyjnego przenoszone są wysokie wartości natężeń ruchu. Zwarta zabudowa uniemożliwia budowę drogi tymczasowej. Bezpośrednią przyczyną wprowadzenia tymczasowej organizacji ruchu była konieczność przeprowadzenia robót kanalizacyjnych.



Rys. 2. Lokalizacja analizowanego odcinka w sieci miejskiej Katowic

¹ Przegląd metod służących do rozwiązywania problemów wielokryterialnych zamieszczono m.in. w [6], [7], [11], [12], [29], [31], [34].

Jako rozwiązania analizowanego problemu zaproponowano trzy warianty techniczne tymczasowej organizacji ruchu:

- wariant 1 ($vor = 1$): całkowite zamknięcie odcinka ulicy i skierowanie ruchu kołowego na drogi objazdowe; ruch pieszy prowadzony wydzieloną częścią chodnika; czas trwania tymczasowej organizacji ruchu $tz(1) = 8$,
- wariant 2 ($vor = 2$): zajęcie lewego pasa ruchu i prowadzenie ruchu kołowego w sposób wahadłowy prawym pasem ruchu; ruch pieszy prowadzony wydzieloną częścią chodnika; czas trwania tymczasowej organizacji ruchu $tz(2) = 12$,
- wariant 3 ($vor = 3$): zawężenie szerokości obu pasów ruchu w przekroju jezdni i prowadzenie ruchu kołowego przy ograniczeniu prędkości do 30 km/h; całkowite zajęcie chodnika przy lewej stronie jezdni - ruch pieszy skierowany na chodnik znajdujący się po prawej stronie jezdni; czas trwania tymczasowej organizacji ruchu $tz(3) = 18$,

Analizowany przedział czasu został podzielony na odcinki o długości jednej godziny. Przyjęto trzy możliwe przedziały rozpoczęcia tymczasowej organizacji ruchu:

- przedział czasu o numerze $t = 6$ - odpowiadający rozpoczęciu robót w okresie od 5:00 do 6:00,
- przedział czasu o numerze $t = 9$ - odpowiadający rozpoczęciu robót w okresie od 8:00 do 9:00,
- przedział czasu o numerze $t = 18$ - odpowiadający rozpoczęciu robót w okresie od 17:00 do 18:00.

Kryteria wybrane przy analizie oddziaływania wariantów technicznych tymczasowej organizacji ruchu uwzględniają uciążliwości postrzegane przez różne podmioty. Odwzorowują one wzajemnie rozbieżne interesy instytucji zgłaszających potrzebę wprowadzania tymczasowej organizacji ruchu, użytkowników systemu transportowego oraz jego otoczenia.

Przy określaniu ocen oddziaływania poszczególnych wariantów technicznych $vor \in \mathbf{VOR}^{zd}$ tymczasowej organizacji ruchu w przedziale czasu $t \in \mathbf{T}^{zd}$ skorzystano z pomocy sześciu ekspertów, którzy brali pod uwagę zarówno wartości wskaźników ilościowych, jak i własne doświadczenie w zakresie planowania i projektowania systemów transportowych. Eksperti oceniali kryteria cząstkowe przyjmując skalę od 1 do 5, przy czym przyjęto zasadę, że negatywne oddziaływanie odwzorowane jest wysoką oceną.

Oceniając oddziaływanie poszczególnych wariantów technicznych tymczasowej organizacji ruchu brano pod uwagę m.in. następujące czynniki:

- z punktu widzenia użytkowników systemu transportowego miasta (ocena $F_1(vor, (t, t'))$):
 - płynność ruchu drogowego,
 - straty czasu,
 - bezpieczeństwo ruchu kołowego,
 - bezpieczeństwo pieszych,
- z punktu widzenia podmiotów zgłaszających potrzebę wprowadzenia tymczasowej organizacji ruchu (ocena $F_2(vor, (t, t'))$):
 - koszty wykonania robót,
 - sprawność robót,

- koszty zatrudnienia pracowników,
 - bezpieczeństwo pracowników,
- z punktu widzenia otoczenia systemu transportowego (ocena $F_3(vor, (t, t'))$):
- uciążliwość związana z hałasem,
 - spadek poziomu dostępności do sąsiadujących obiektów,
 - spadek obrotów dla lokalnego biznesu.

Następnie każdemu z ekspertów nadano określone wagi, które posłużyły do wyznaczenia uśrednionych ocen. Uzyskane w ten sposób wyniki ocen oddziaływania poszczególnych wariantów technicznych zamieszczono w tablicy 1.

Tablica 1

**Uśrednione wyniki ocen oddziaływania określonych wariantów technicznych
tymczasowej organizacji ruchu**

| Kryterium | $vor = 1$ | | | $vor = 2$ | | | $vor = 3$ | | |
|---------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| | (6,14) | (9,17) | (18,26) | (6,18) | (9,21) | (18,30) | (6,24) | (9,27) | (18,36) |
| | $wd = 1$ | $wd = 2$ | $wd = 3$ | $wd = 4$ | $wd = 5$ | $wd = 6$ | $wd = 7$ | $wd = 8$ | $wd = 9$ |
| $F_1(vor, (t, t'))$ | 3,8 | 4,2 | 1,8 | 2,9 | 3,1 | 1,7 | 3,2 | 3,4 | 1,6 |
| $F_2(vor, (t, t'))$ | 2,1 | 2,2 | 3,5 | 3,2 | 3,4 | 4,5 | 4,1 | 4,3 | 4,6 |
| $F_3(vor, (t, t'))$ | 4,1 | 4,2 | 2,7 | 2,1 | 2,3 | 2,8 | 2,1 | 2,2 | 2,4 |

W ten sposób uzyskano dziewięć wariantów decyzyjnych oznaczonych jako wd . Zbiór wszystkich wariantów decyzyjnych opisano więc jako:

$$WD = \{1, \dots, wd, \dots, 9\}. \quad (25)$$

Przy wyborze optymalnego wariantu zastosowano metodę TOPSIS [8], [16], [29]. Metoda ta polega na porównywaniu analizowanych wariantów decyzyjnych z rozwiązaniami referencyjnymi: "idealnym" (ang. *ideal solution*) i "antyidealnym" (ang. *anti-ideal solution*) oraz ocenianiu odległości pomiędzy wariantami a tymi rozwiązaniami. Jako wariant optymalny zostaje wybrany wariant o najmniejszej odległości od rozwiązania "idealnego" i największej od "antyidealnego".

Algorytm metody TOPSIS składa się z następujących kroków:

Krok 1. Utworzenie znormalizowanej macierzy decyzyjnej.

Krok 2. Wyznaczenie ważonej znormalizowanej macierzy decyzyjnej.

Krok 3. Wyznaczenie ocen ważonego rozwiązania "idealnego" oraz ważonego rozwiązania "antyidealnego".

Krok 4. Wyznaczenie odległości od ważonego rozwiązania "idealnego" i "antyidealnego".

Krok 5. Wyznaczenie odległości względnych od ważonego rozwiązania idealnego.

Krok 6. Wybór najlepszego wariantu.

Krok 1. Utworzenie znormalizowanej macierzy decyzyjnej

Elementy macierzy decyzyjnej zostały znormalizowane zgodnie z zależnością:

$$r_i(wd) = F_i(wd) / \sqrt{\sum_{wd \in WD} (F_i(wd))^2}, \quad i = 1, 2, 3, \quad wd \in WD. \quad (26)$$

Wyniki normalizacji przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Znormalizowana macierz decyzyjna

| Numer wariantu decyzyjnego wd | $F_1(wd)$ | $F_2(wd)$ | $F_3(wd)$ |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0,42 | 0,19 | 0,48 |
| 2 | 0,47 | 0,2 | 0,49 |
| 3 | 0,2 | 0,32 | 0,31 |
| 4 | 0,32 | 0,29 | 0,24 |
| 5 | 0,35 | 0,31 | 0,27 |
| 6 | 0,19 | 0,41 | 0,32 |
| 7 | 0,36 | 0,37 | 0,24 |
| 8 | 0,38 | 0,39 | 0,26 |
| 9 | 0,18 | 0,42 | 0,28 |

Krok 2. Wyznaczenie ważonej znormalizowanej macierzy decyzyjnej

Aby wyznaczyć ważoną znormalizowaną macierz decyzyjną każdemu z kryteriów przyporządkowano odpowiednie wagi, tj.:

$$\omega_1 = 0,4, \quad \omega_2 = 0,4, \quad \omega_3 = 0,2.$$

Elementy $\hat{r}_i(wd)$ ważonej znormalizowanej macierzy decyzyjnej wyznaczone zostały według zależności:

$$\hat{r}_i(wd) = \omega_i \cdot r_i(wd), \quad i = 1, \dots, 3, \quad wd \in WD. \quad (27)$$

Wyniki zamieszczono w tablicy 3.

Tablica 3

Ważona znormalizowana macierz decyzyjna

| Numer wariantu decyzyjnego wd | $F_1(wd)$ | $F_2(wd)$ | $F_3(wd)$ |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0,17 | 0,08 | 0,1 |
| 2 | 0,19 | 0,08 | 0,1 |
| 3 | 0,08 | 0,13 | 0,06 |
| 4 | 0,13 | 0,12 | 0,05 |
| 5 | 0,14 | 0,12 | 0,05 |
| 6 | 0,08 | 0,16 | 0,06 |
| 7 | 0,14 | 0,15 | 0,05 |
| 8 | 0,15 | 0,16 | 0,05 |
| 9 | 0,07 | 0,17 | 0,06 |

Krok 3. Wyznaczenie ocen ważonego rozwiązania "idealnego" oraz ważonego rozwiązania "antyidealnego"

W związku z tym, że w analizowanym przykładzie wszystkie kryteria cząstkowe są minimalizowane oceny **ważonego rozwiązania "idealnego"** dla każdego z kryteriów zostały wyznaczone według zależności:

$$\hat{r}_i(wd^+) = \min_{wd \in \mathbf{WD}} \hat{r}_i(wd), \quad i = 1, \dots, 3, \quad wd \in \mathbf{WD}, \quad (28)$$

natomiast oceny **ważonego rozwiązania "antyidealnego"** dla każdego z kryteriów wyznaczono jako:

$$\hat{r}_i(wd^-) = \max_{wd \in \mathbf{WD}} \hat{r}_i(wd), \quad i = 1, \dots, 3, \quad wd \in \mathbf{WD}. \quad (29)$$

W wyniku obliczeń otrzymano następujące oceny:

- ważonego rozwiązania "idealnego":

$$\hat{r}_1(wd^+) = 0,07, \quad \hat{r}_2(wd^+) = 0,08, \quad \hat{r}_3(wd^+) = 0,05,$$

- ważonego rozwiązania "antyidealnego":

$$\hat{r}_1(wd^-) = 0,19, \quad \hat{r}_2(wd^-) = 0,17, \quad \hat{r}_3(wd^-) = 0,10.$$

Krok 4. Wyznaczenie odległości od ważonego rozwiązania "idealnego" i "antyidealnego"

Dla każdego wariantu decyzyjnego $wd \in \mathbf{WD}$ wyznaczono odległość od ważonego rozwiązania "idealnego" jako:

$$d^+(wd) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 |\hat{r}_i(wd) - \hat{r}_i(wd^+)|^2}, \quad wd \in \mathbf{WD} \quad (30)$$

oraz odległość od ważonego rozwiązania "antyidealnego" jako:

$$d^-(wd) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 |\hat{r}_i(wd) - \hat{r}_i(wd^-)|^2}, \quad wd \in \mathbf{WD}. \quad (31)$$

Otrzymane wyniki zamieszczono w tablicy 4.

Tablica 4

**Odległości wariantów decyzyjnych od ważonego rozwiązania "idealnego"
oraz "antyidealnego"**

| Numer wariantu decyzyjnego wd | $d^+(wd)$ | $d^-(wd)$ |
|---------------------------------|-----------|-----------|
| 1 | 0,1118 | 0,0922 |
| 2 | 0,1300 | 0,0900 |
| 3 | 0,0520 | 0,1237 |
| 4 | 0,0721 | 0,0927 |
| 5 | 0,0806 | 0,0866 |
| 6 | 0,0812 | 0,1175 |
| 7 | 0,0990 | 0,0735 |
| 8 | 0,1131 | 0,0648 |
| 9 | 0,0906 | 0,1265 |

Krok 5. Wyznaczenie odległości względnych od ważonego rozwiązania idealnego

Odległość względna od ważonego rozwiązania idealnego została wyznaczona według zależności:

$$\hat{d}(wd) = \frac{d^-(wd)}{d^+(wd) + d^-(wd)}, \quad wd \in \mathbf{WD}. \quad (32)$$

Dla poszczególnych wariantów decyzyjnych otrzymano następujące wyniki:

$$\begin{aligned} \hat{d}(1) &= 0,4519, & \hat{d}(2) &= 0,4091, & \hat{d}(3) &= 0,7042, & \hat{d}(4) &= 0,5626, \\ \hat{d}(5) &= 0,5179, & \hat{d}(6) &= 0,5912, & \hat{d}(7) &= 0,4260, & \hat{d}(8) &= 0,3642, \\ \hat{d}(9) &= 0,5828. \end{aligned}$$

Krok 6. Wybór najlepszego wariantu

Wartość $\hat{d}(wd)$ należy interpretować jako stopień, w jakim wariant wd jest bliski ważonemu rozwiązaniu idealnemu. W związku z tym optymalny wariant to taki wariant, dla którego wartość $\hat{d}(wd)$ jest największa, tj.:

$$wd^*: \hat{d}(wd^*) = \max_{wd \in \mathbf{WD}} \hat{d}(wd). \quad (33)$$

Zgodnie z zależnością (33) w analizowanym przypadku optymalnym wariantem decyzyjnym jest wariant o numerze $wd = 3$. Wybrano więc wariant techniczny tymczasowej organizacji ruchu o numerze 3 wprowadzony w przedziale czasu $\langle 18,26 \rangle$. Wynika z tego, że przy przyjętych założeniach optymalne rozwiązanie z punktu widzenia wszystkich uczestników procesu decyzyjnego polega na prowadzeniu robót kanalizacyjnych na analizowanym odcinku ulicy przez 8 godzin pomiędzy 17:00 a 2:00 przy całkowitym zamknięciu tego odcinka i skierowaniu ruchu kołowego na drogi objazdowe. W tym wariantcie ruch pieszy prowadzony byłby wydzieloną częścią chodnika.

6. PODSUMOWANIE

Wybór optymalnego wariantu tymczasowej organizacji ruchu w sieci miejskiej jest problemem złożonym. Wymaga on uwzględnienia różnorodnych priorytetów istotnych zarówno dla podmiotów biorących udział w planowaniu, projektowaniu i wdrożeniu zmian w organizacji ruchu, jak i użytkowników systemu transportowego oraz mieszkańców odczuwających skutki takich działań. Wymusza to potrzebę opracowania modelu decyzyjnego wspomagającego proces planowania tymczasowej organizacji ruchu o charakterze wielokryterialnym. Takie podejście do zagadnienia wymaga kompleksowej analizy i systemowego opisu zależności pomiędzy poszczególnymi elementami modelu decyzyjnego.

W artykule zidentyfikowano i sformalizowano elementy modelu wyboru optymalnego wariantu technicznego tymczasowej organizacji ruchu w sieci miejskiej. Uwzględnienie sposobu przepływu potoku przez sieć pozwoliło na dynamiczne podejście do analizowanych problemów. Przy określeniu kryteriów zadania optymalizacyjnego wzięto pod uwagę uciążliwość związaną z zakłóceniami wynikającymi z wprowadzenia czasowych zmian w organizacji ruchu dla różnych uczestników procesu decyzyjnego. W proponowanej metodyce można wykorzystać istniejące specjalistyczne narzędzia informatyczne. Pozwala ona również na opracowanie dedykowanych procedur i budowę oryginalnych aplikacji komputerowych, które mogłyby mieć zastosowanie w planowaniu tymczasowej organizacji ruchu.

Wielokryterialny model wyboru optymalnego wariantu technicznego tymczasowej organizacji ruchu jest pierwszym etapem złożonego procesu decyzyjnego związanego z planowaniem czasowych zmian w systemie transportowym miasta [45]. W tym procesie istotnym problemem jest również odpowiednia koordynacja robót prowadzonych w pasie drogowym, która powinna uwzględniać wszystkie rodzaje robót prowadzonych w analizowanym obszarze (np. wodociągowe, kanalizacyjne, ciepłne, gazowe, energetyczne, itp.). Jedynie pełna informacja o zamierzeniach zarządcy drogi i wszystkich gestorów sieci podziemnych jest warunkiem racjonalnych działań w tym zakresie.

Bibliografia

1. Cascetta E.: *Transportation Systems Analysis. Models and Applications*. 2nd Edition. Springer Optimization and Its Application, Vol.29, New York 2009.
2. Castro L.N., Timmins J.: *Artificial Immune Systems. A New Computational Intelligence Approach*. Springer, Berlin-Heidelberg, New York 2002.
3. Dow P.D.C.: Capacity-restrained road assignment. *Traffic Engineering & Control*, Vol.20, 1979, pp.296-305.
4. Engelbrecht A.P.: *Computational Intelligence: An Introduction*. John Wiley & Sons 2007.
5. Glover F., Kochenberger G. (eds.): *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer 2002.
6. Goodwin P., Wright G.: *Analiza decyzji*. Wydawnictwo Wolters Kluwer Polska, Warszawa 2011.
7. Górecka D.: *Wielokryterialne wspomaganie wyboru projektów europejskich*. TNOiK „Dom Organizatora”, Toruń 2009.
8. Hwang C.L., Yoon K.: *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications: A State of the Art Survey*. Springer-Verlag, New York 1981.

9. Izdebski M.: The Use of Heuristic Algorithms to Optimize the Transport Issues on the Example of Municipal Services Companies. Archives of Transport No 1/2014, vol. 29, Polish Academy of Sciences, Committee of Transport, Warsaw 2014.
10. Jacyna M. (red.): Kształtowanie systemów w wybranych obszarach transportu i logistyki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.
11. Jacyna M.: Modelowanie i ocena systemów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
12. Jacyna M.: Modelowanie wielokryterialne w zastosowaniu do oceny systemów transportowych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, s. TRANSPORT, z.47, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2011.
13. Jacyna M.: Wybrane zagadnienia modelowania systemów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
14. Karoń G.: Modelowanie mobilności w analizach ruchu dla projektów inwestycji transportowych. Logistyka nr 4/2011, s.398-407.
15. Karoń G.: Modelowanie popytu oparte na podróżach pojedynczych. Logistyka nr 4/2012, s. 323-342.
16. Lai Y.J., Liu T.Y., Hwang C.L.: TOPSIS for MODM. European Journal of Operational research, Vol.76/1994, No.3.
17. Michalewicz Z., Fogel D.B.: Jak to rozwiązać, czyli nowoczesna heurystyka. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
18. Nguyen S.: An Algorithm for the Traffic Assignment Problem. Transportation Science, Vol.8/1974, Is.3, pp.203-216.
19. Ortuzar J., Willumsen L. G.: Modelling transport. 3rd Edition, Wiley, New York 2009.
20. Podoski J.: Transport w miastach. WKiŁ, Warszawa 1985.
21. Pyza D.: Modelowanie systemów przewozowych w zastosowaniu do projektowania obsługi transportowej podmiotów gospodarczych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Prace Naukowe, s. Transport, z.85, Warszawa 2012.
22. Smock R.: An iterative assignment approach to capacity restraint on arterial networks. Highway Research Board Bulletin, No.347/1962, pp.60-66.
23. Smock R.: A comparative description of a capacity-restrained traffic assignment. Highway Research Record, No.6/1963, pp.12-40.
24. Smutnicki C.: Algorytmy szeregowania. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2002.
25. Steenbrink P.: Optymalizacja sieci transportowych. WKiŁ, Warszawa 1978.
26. Steuer R.: Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application. John Wiley & Sons, New York 1986.
27. Szarata A.: Modelowanie podróży wzbudzonych oraz tłumionych zmianą stanu infrastruktury transportowej. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, seria Inżynieria Lądowa, Mo-nografia nr 439, Kraków 2013.
28. Szczepański E., Murawski J., Jacyna-Golda I.: Genetic Algorithms Based Approach for Transshipment Hub Location in Urban Areas. Archives of Transport No 3/2014, vol. 31, Polish Academy of Sciences, Committee of Transport, Warsaw 2014.
29. Trzaskalik T.: Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Metody i zastosowania. PWE, Warszawa 2014.
30. Vincke P.: Multicriteria Decision-Aid. John Wiley Sohns, Chichester 1992.
31. Wachowicz T.: Metody wielokryterialne we wspomaganiu prenegocjacyjnego przygotowania negocjatorów. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice 2013.
32. Wodecki M.: Metody agregacji w problemach optymalizacji dyskretnej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009.
33. Wolfenbutg A.: New Version of the Bbs Method and its Usage for Determining and Scheduling Vehicle Routes, Archives of Transport No 3/2014, vol. 31, Polish Academy of Sciences, Committee of Transport, Warsaw 2014.
34. Żak J.: Wielokryterialne wspomaganie decyzji w transporcie drogowym. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, seria Rozprawy nr 394, Poznań 2005.
35. Żak J.: Modelowanie procesów transportowych metodą sieci faz. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, s. TRANSPORT, z.99, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.

36. Żochowska R.: Dynamic Approach to the Origin-Destination Matrix Estimation in Dense Street Networks. The Archives of Transport, Vol.24/2012, Issue 3, pp.389-413.
37. Żochowska R.: Model miejskiej sieci transportowej dla potrzeb analizy zakłóceń w ruchu drogowym. Logistyka 3/2014 (dodatek elektroniczny „Logistyka-nauka”) s.7156-7165, CD-ROM nr 1.
38. Żochowska R.: Model struktury sieci miejskiej dla potrzeb oceny wariantów organizacji ruchu w czasie zajęcia pasa drogowego. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport z.97, s.555-564. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
39. Żochowska R.: Modelowanie potoków ruchu w sieci miejskiej dla potrzeb analizy zakłóceń, Logistyka 4/2014 (dodatek elektroniczny „Logistyka-nauka”), s.2619-2632, CD-ROM nr 2.
40. Żochowska R.: Modelowanie wyboru drogi w transporcie indywidualnym – wybrane aspekty. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport z.86, s.83-104. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
41. Żochowska R.: Modelowanie zachowań podróźnych w warunkach zamknięć ulic w gęstych sieciach miejskich. Logistyka 4/2012 (dodatek elektroniczny „Logistyka-nauka”) s.803-818, CD-ROM nr 1.
42. Żochowska R.: Niekonwencjonalne metody wyznaczania rozkładu przestrzennego ruchu, Logistyka 6/2014 (dodatek elektroniczny „Logistyka-nauka”), s.11837-11849.
43. Żochowska R.: Planowanie czasowych zamknięć ulic w gęstych sieciach miejskich – wybrane aspekty. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP o/Kraków, Nr 103, Kraków 2014, s.419-433.
44. Żochowska R.: Selected Issues in Modelling of Traffic Flows in Congested Urban Networks. The Archives of Transport, Vol.29, Issue 1, Warsaw 2014, pp.77-89.
45. Żochowska R.: Wielokryterialne wspomaganie podejmowania decyzji w zastosowaniu do planowania tymczasowej organizacji ruchu w sieci miejskiej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015.
46. Żochowska R., Karoń G., Sobota A.: Modelowanie procesów decyzyjnych podróźnych w transporcie publicznym. [w:] Krych A. (red.): Nowoczesny transport w obszarach zurbanizowanych. SITKRP, oddział w Poznaniu, Poznań 2011, s. 113 – 144.
47. Żochowska R., Karoń G., Sobota A.: Podatność na zakłócenia jako miara efektywności sieci drogowej w mieście. [w:] Krych A., Rychlewski J. (red.): Wydajność systemów transportowych. SITKRP, oddział w Poznaniu, Poznań 2013, s. 401 – 420.
48. Żochowska R., Mielničuk A.: Computer Software Applications in Trip Tables Modelling. [w:] Janecki R., Sierpiński G. (red.) „Contemporary transportation systems. Selected theoretical and practical problems. New mobility culture”. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej (seria Monografia nr 324), Gliwice 2011, s.203-212.

MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING MODEL FOR THE OPTIMIZATION OF TEMPORARY TRAFFIC ARRANGEMENT IN URBAN NETWORK

Summary: The paper presents the fundamental determinants of building a multi-criteria decision making model when choosing the optimal variant of temporary traffic arrangement in urban network. On this basis, a formal representation of elements of the model has been developed. Then it was used in the formulation of the optimization task. The article contains description of the methodology for selecting the optimal variant of temporary traffic arrangement for a single event which is the first step in the complex process of planning temporal changes in the transportation system of the city. A calculation example of assessment of the impact of temporary traffic arrangement variant with the usage of multi-criteria method TOPSIS has been also presented in the article.

Keywords: temporary traffic arrangement, multi-criteria decision-making modelling, traffic optimization in urban network