

# Macierzowa metoda wskaźnikowa prognozowania pasażerskich potoków kolejowych

Szymon KLEMBBA<sup>1</sup>

## Streszczenie

Celem artykułu jest usystematyzowanie stosowanej w pracach Instytutu Kolejnictwa metody macierzy wskaźników do prognozowania wielkości przewozów pasażerskich w projektach modernizacji infrastruktury kolejowej. Przedstawiono formalny zapis definicji oraz działań wykonywanych w tej metodzie.

Pierwszym etapem przygotowania prognoz przewozów jest definicja sieci transportowej oraz zbioru relacji przewozów, następnym zaś zebranie i opracowanie danych na temat kształtowania się potoków pasażerskich w analizowanym korytarzu transportowym, w celu uzyskania danych na temat bazowych potoków pasażerskich. Po określeniu czynników wpływających na wielkość potoku pasażerskiego oraz zdefiniowaniu funkcji określających sposób, w jaki wpływają one na liczbę podróży oblicza się prognozowane potoki pasażerskie. Ostatnim etapem działań jest obliczenie prognozowanych zmian wielkości pracy przewozowej oraz łącznego czasu podróży pasażerów, potrzebnych w analizach efektywności ekonomicznej projektu prognozowanych zmian.

W artykule przytoczono przykład zastosowania metody wraz z prezentacją podstawowych wyników. W podsumowaniu wymieniono główne etapy przedstawianej metody wraz z niezbędnymi do ich realizacji danymi wejściowymi i uzyskiwanymi w ich wyniku danymi wyjściowymi.

**Słowa kluczowe:** transport kolejowy, modelowanie podróży, prognoza przewozów

## 1. Wstęp

W Polsce, w ciągu ostatnich kilkunastu lat zrealizowano wiele inwestycji infrastrukturalnych w transporcie kolejowym, uwarunkowanych między innymi dostępnością środków z funduszy europejskich. Odpowiednie zaplanowanie inwestycji wymaga wiedzy o tym, w jaki sposób i w jakim stopniu ta infrastruktura będzie wykorzystywana. Jednym ze sposobów uzyskania odpowiedzi na te pytania jest przygotowanie prognoz wielkości przewozów pasażerów i towarów oraz prognoz wielkości ruchu, dzięki czemu można kształtować i wymiarować infrastrukturę odpowiadającą potrzebom transportowym, które wystąpią w przyszłości. Istnieje wiele metod prognozowania potoków pasażerskich, a ich wybór zależy od wielu czynników, w szczególności od dostępności danych charakteryzujących analizowany system transportowy i jego otoczenie.

Metody wskaźnikowe w prognozowaniu potoków pasażerskich są popularnym sposobem znajdowania odpowiedzi na pytanie o wielkość (lub rząd wielkości)

potoku pasażerskiego w przyszłości. Każda ze stosowanych metod ma swoje wady i zalety, o czym wspomniano w dalszej części artykułu. Metody wskaźnikowe są pewnym kompromisem pomiędzy łatwością zastosowania a dokładnością uzyskanych wyników i mogą być stosowane w wypadku braku dostępu do danych umożliwiających zastosowanie bardziej zaawansowanych metod. W praktyce, podczas realizacji projektów związanych z infrastrukturą kolejową stosuje się wskaźniki odnoszące się do poszczególnych odcinków linii kolejowej lub korytarza transportowego. Prezentowana w artykule metoda przedstawia możliwość zastosowania wskaźników do potoków w poszczególnych relacjach podróży, które dopiero potem składają się na potoki odcinkowe, co czyni metodę bardziej dokładną ze względu na możliwość uwzględniania różnic pomiędzy poszczególnymi częściami obszaru, przez który przebiega analizowany korytarz transportowy.

W artykule usystematyzowano metodę macierzy wskaźników, stosowaną przez autora w pracach Instytutu Kolejnictwa [2], przez podanie formalnego

<sup>1</sup> Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Zakład Dróg Kolejowych i Przewozów; e-mail: sklemba@ikolej.pl.

zapisu wykonywanych działań oraz wyjaśnienie podstawowych jej założeń.

## 2. Sieć transportowa

Przed opracowaniem prognozy, analizowany rytm transportowy należy opisać jako sieć transportową. Mogą do tego posłużyć podstawy teorii grafów i sieci. Przez sieć transportową  $S$  rozumie się [5] uporządkowaną trójkę zbiorów:

$$G, FW, FL,$$

gdzie:

- $G$  – graf opisujący strukturę sieci transportowej,
- $FW$  – zbiór funkcji opisujących charakterystyki wierzchołków struktury sieci transportowej,
- $FL$  – zbiór funkcji opisujących charakterystyki łuków tej sieci. Innymi słowy siecią transportową nazywamy graf  $G$ , na którego wierzchołkach są opisane funkcje należące do zbioru  $FW$ , i na którego łukach opisane są funkcje należące do zbioru  $FL$ .

$$S = \langle G, FW, FL \rangle.$$

Graf  $G$  jest dwójką uporządkowanych zbiorów  $W$  – wierzchołków tego grafu (niepusty zbiór skończony [8]) i  $L$  – łuków grafu:

$$G = \langle W, L \rangle,$$

gdzie:

$$W = \{1, 2, \dots, w, \dots, N\}, \text{ natomiast } L = \{(i, j) : (i, j) \in W \times W, i \neq j\}.$$

Wierzchołki grafu  $G$  reprezentują rejon transportowy, a łuki grafu reprezentują połączenia między poszczególnymi wierzchołkami, co może odpowiadać odcinkom linii kolejowych lub dróg kołowych (infrastruktura liniowa). Mając zdefiniowane zbiory  $W$  oraz  $L$ , można rozwinąć definicję sieci i określić formalnie funkcje opisane na tych zbiorach:

$$f_{wk} = W \rightarrow \mathbf{R}^+ \cup \{0\}; w \in W; k \in \{1, 2, \dots, K\}; \\ f_{wk}(w) \in \mathbf{R}^+ \cup \{0\},$$

gdzie:

- $k$  – kolejny identyfikator funkcji przypisanej do wierzchołka, niech zbiór  $IDW = \{k\}$ , gdzie  $IDK$  to zbiór identyfikatorów funkcji przypisanych do wierzchołków;

$$f_{(i,j)m} = W \times W \rightarrow \mathbf{R}^+ \cup \{0\}; w \in W; m \in \{1, 2, \dots, M\}; \\ f_{(i,j)m}(i, j) \in \mathbf{R}^+ \cup \{0\},$$

gdzie:

- $m$  – kolejny identyfikator funkcji przypisanej do łuku, niech zbiór  $IDL = \{m\}$ , gdzie  $IDL$  to zbiór identyfikatorów funkcji przypisanych do łuków grafu.

Zbiór  $FW$  można zapisać następująco:

$$FW = \{f_{11}, f_{12}, \dots, f_{1K}, f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2K}, \dots, f_{W1}, f_{W2}, \dots, f_{WK}\}.$$

Funkcje opisane na wierzchołkach mogą określać charakterystyki posterunku ruchu (np. przelotowość), punktu ekspedycyjnego (np. maksymalna liczba obsłużonych pasażerów) lub miejscowości (np. liczba mieszkańców). Zbiór  $FL$  można zapisać następująco:

$$FL = \{f_{(1,j)1}, \dots, f_{(i,j)m}, \dots, f_{(i,W)M}\}; (i, j) \in L.$$

Funkcje opisane na łukach mogą określać charakterystyki fragmentu linii kolejowej takie jak czas przejazdu lub zdolność przepustowa. Warto zauważyć, iż łuki w grafie opisującym strukturę sieci transportowej nie muszą oznaczać tylko i wyłącznie połączeń kolejowych.

## 3. Relacja przewozu, potok w danej relacji

Mając dokładnie zdefiniowaną sieć transportową, można zdefiniować pojęcie relacji przewozu / podróży. Relacją  $r$  podróży nazywamy parę  $(a, b)$ , gdzie  $a$  oznacza wierzchołek początkowy – miejsce początku podróży, natomiast  $b$  wierzchołek końcowy – miejsce końca podróży [3]. Zatem zbiór relacji  $R$  jest opisany następująco:

$$R = \{r = (a, b) : a \in W, b \in W, a \neq b\}.$$

Można zatem zdefiniować potok pasażerski w danej relacji  $r = (a, b)$ .

Niech  $x_{(a,b)}$  oznacza liczbę pasażerów (w określonej jednostce czasu) która zgłasza zapotrzebowanie na przewóz w relacji  $(a, b)$  – liczbę tę nazwiemy potokiem pasażerskim w relacji  $(a, b)$ .

Mogą istnieć różne drogi w grafie łączące wierzchołki  $a$  i  $b$ , gdyż każdy potok relacyjny  $x_{(a,b)}$  może zostać przeprowadzony przez sieć transportową różnymi drogami (połączeniami). Jeżeli  $D_{(a,b)} = \{d_{1(a,b)}, \dots, d_{p(a,b)}, \dots, d_{p(a,b)}\}$  będzie zbiorem możliwych dróg przejścia przez graf z wierzchołka  $a$  do wierzchołka  $b$ , to potok pasażerów w danej relacji może zostać rozłożony pomiędzy te drogi. Zatem, jeżeli przez  $x_{dp(a,b)}$  oznaczymy potok pasażerów, którzy chcą się przemieścić w relacji  $(a, b)$ , podążających drogą  $d$  (korzystających z połączenia)  $p$ , to wiadomo, że:

$$\mathbf{x}_{(a,b)} = \sum_{p=1}^P \mathbf{x}_{d_p(a,b)}. \quad (1)$$

Potok na łuku sieci (odcinku sieci transportowej) można wyrazić następująco:

$$\mathbf{x}_{(i,j)} = \sum_{(a,b) \in R} \sum_{d_p(a,b): (i,j) \in d_p(a,b)} \mathbf{x}_{d_p(a,b)}. \quad (2)$$

Rozważając teoretycznie liczbę relacji wynikającą wprost z rozmiaru macierzy (z wyłączeniem przekątnej – podróże wewnątrz rejonu komunikacyjnego w tym przypadku są pomijane), w praktyce można wykluczyć z analiz relacje przewozów, w których podróże nie występują lub ich liczba jest marginalna – zmniejsza ta pracochłonność związaną z przygotowaniem danych wejściowych do modelu, przy praktycznym braku wpływu na dokładność wyników.

#### 4. Macierz potoków, prognoza potoków

Jak wynika ze wzoru (2) potok  $x_{(i,j)}$  na łuku sieci (obrazującym fragment infrastruktury liniowej) jest złożony ze składowych potoków relacyjnych  $x_{d_p(a,b)}$ , które przebiegają drogami  $d_{p(a,b)}$  zawierającymi dany łuk  $(i,j)$  sieci. Można więc określić macierz  $\mathbf{X}$  potoków pasażerskich we wszystkich analizowanych relacjach przewozów.

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_{(a,b)}] = \left\{ \begin{array}{ll} \sum_{p=1}^P \mathbf{x}_{d_p(a,b)} & \text{dla } \forall_{(a,b) \in R} D_{(a,b)} \neq \emptyset \\ 0 & \text{dla } \forall_{(a,b) \in R} D_{(a,b)} = \emptyset \end{array} \right\}. \quad (3)$$

Dla celów formalnych można oznaczyć macierze i ich elementy dodatkowym indeksem oznaczającym horyzont czasowych prognozy  $h$ . Zbiór horyzontów czasowych prognozy  $H = \{0, \dots, h, \dots, Y\}$ ;  $h \in \mathbf{N}$ , gdzie  $Y$  to ostatni horyzont czasowy, zatem:  $[X^{(0)}]$  – macierz bazowa,  $[X^{(h)}]$  – macierz dla horyzontu  $h$ ,  $[X^{(Y)}]$  – macierz dla ostatniego horyzontu prognozy.

Efektom procesu prognozowania ma być określenie zależności pomiędzy wartościami elementów poszczególnych macierzy potoków. W tym celu zastosowano funkcje opisane na wierzchołkach i łukach sieci transportowej:

$$\mathbf{X}^{(h)} = \mathbf{H}^{(0)} \cdot_{hs} \mathbf{F}^{(h)} \quad (4)$$

gdzie:

$\mathbf{F}^{(h)}$  – macierz wskaźników dla danego horyzontu czasowego.

$$[\mathbf{x}_{(a,b)}^{(h)}] = [\mathbf{x}_{(a,b)}^{(0)}] \cdot_{hs} [f_{(a,b)}^{(h)}] = [\mathbf{x}_{(a,b)}^{(0)} \cdot f_{(a,b)}^{(h)}], \text{ gdzie:}$$

$\cdot_{hs}$  – iloczyn Hadamarda, iloczyn Schura, iloczyn po współrzędnych.

Metody ustalania wartości elementów macierzy bazowej nie są przedmiotem niniejszego artykułu i stanowią odrębne zagadnienie, należy jednak podkreślić kilka najistotniejszych kwestii. Macierz bazowa podróży określa, ile podróży odbywa się pomiędzy poszczególnymi rejonami transportowymi w określonym przedziale czasu w roku bazowym prognozy i w metodzie wskaźnikowej jest podstawą do obliczenia wartości macierzy prognostycznych. Szczególnie istotna jest zatem dokładność z jaką zostaną określone wartości elementów tej macierzy. Dokładność ta zależy od wyboru metody budowania tej macierzy oraz dostępności danych wykorzystywanych do tego procesu. Według klasycznego modelu 4-etapowego, macierz bazowa powstaje w wyniku wykorzystania modeli generowania i dystrybucji przestrzennej podróży. Do opracowania pierwszego z modeli mogą być wykorzystywane na przykład modele regresyjne, do drugiego zaś na przykład modele grawitacyjne. Zagadnienie to opisano na przykład w [1, 6].

Macierz wartości wskaźników (która określa zmiany macierzy bazowej w poszczególnych horyzontach  $h$  prognozy) można ogólnie zdefiniować jako iloczyn po współrzędnych macierzy opisujących poszczególne czynniki wpływające na wielkość potoku pasażerskiego. Wielkości te mogą dotyczyć zarówno wierzchołków sieci transportowej (rejonu transportowe), jak i łuków w tej sieci (połączenia):

$$\mathbf{F}^{(h)} = \mathbf{F}_{FW}^{(h)} \cdot_{hs} \mathbf{F}_{FL}^{(h)} = \mathbf{F}_{f_{w1}}^{(h)} \cdot_{hs} \dots \cdot_{hs} \mathbf{F}_{f_{wk}}^{(h)} \cdot_{hs} \dots \cdot_{hs} \mathbf{F}_{f_{wk}}^{(h)} \cdot_{hs} \dots \cdot_{hs} \mathbf{F}_{f_{l1}}^{(h)} \cdot_{hs} \dots \cdot_{hs} \mathbf{F}_{f_{lm}}^{(h)} \cdot_{hs} \dots \cdot_{hs} \mathbf{F}_{f_{lm}}^{(h)}.$$

Należy zdefiniować elementy macierzy  $\mathbf{F}_{f_{wk}}^{(h)}$  oraz  $\mathbf{F}_{f_{lm}}^{(h)}$ :

dla danego  $k$ :  $\mathbf{F}_{f_{wk}}^{(h)} = [f_{f_{ak}f_{bk}}]$ , gdzie:

$(a,b) \in R$  oraz

dla danego  $m$ :  $\mathbf{F}_{f_{lm}}^{(h)} = [f_{(a,b)m}]$ , gdzie:  $(a,b)$ :

$[(a,b) \in R \wedge D_{(a,b)} \neq \emptyset]$ .

W prognozach Instytutu Kolejnictwa, wykonywanych macierzową metodą wskaźnikową, definiuje się następujące funkcje dotyczące wierzchołków oraz łuków sieci, związane z:

- demografią,
- rozwojem gospodarczym,
- ogólnym kosztem podróży (w rozumieniu czasu),
- ofertą przewozową transportu kolejowego (częstość kursowania, liczba połączeń).

#### 4.1. Funkcja związana z demografią

Funkcja  $f_{w1}^h = W \times H \rightarrow \mathbf{N}; w \in W; h \in H$  charakteryzuje liczbę mieszkańców danego rejonu transportowego, opisanego wierzchołkiem  $w$ , w horyzoncie  $h$ , tworząc wektor:

$$\overline{f_{w1}^{(h)}} = [f_{(11)}^{(h)}, \dots, f_{(w1)}^{(h)}, \dots, f_{(W1)}^{(h)}].$$

Z tą funkcją powiązana jest macierz wskaźników  $F_{f_{w1}}^{(h)}$ , której elementy zdefiniowano jako:

$$\bigwedge_{h \neq 0} \bigwedge_{(a,b) \in R} [F_{f_{w1}}^{(h)}] = \left[ \frac{[f_{(a1)}^{(h)}][f_{(b1)}^{(h)}]}{[f_{(a1)}^{(h-1)}] + [f_{(b1)}^{(h-1)}]} \right]. \quad (5)$$

Przyjęto proporcjonalny wpływ zmian demograficznych na wielkość przewozów, zakładając w celu uproszczenia, że liczba podróży jest wprost proporcjonalna do liczby mieszkańców. W rzeczywistości zależność ta nie musi być prawdziwa z uwagi na zmieniającą się strukturę wiekową i zawodową ludności oraz różne wartości wskaźników ruchliwości dla poszczególnych grup wiekowych i zawodowych. Rozwiązaniem tej kwestii może być rozważanie oddzielnych macierzy podróży dla poszczególnych grup ludności.

#### 4.2. Funkcja związana z rozwojem gospodarczym

Funkcja ta  $f_{w2}^h = W \times H \rightarrow \mathbf{R}; w \in W; h \in H$  opisuje wzrost gospodarczy danego rejonu transportowego, tworząc wektor:

$$\overline{f_{w2}^{(h)}} = [f_{(12)}^{(h)}, \dots, f_{(w2)}^{(h)}, \dots, f_{(W2)}^{(h)}].$$

Z tą funkcją jest powiązana macierz wskaźników  $F_{f_{w2}}^{(h)}$ , której elementy zdefiniowano jako:

$$\bigwedge_{h \neq 0} \bigwedge_{(a,b) \in R} [F_{f_{w2}}^{(h)}] = \left[ \frac{[f_{(a2)}^{(h)}][f_{(a1)}^{(h)}] + [f_{(b2)}^{(h)}][f_{(b1)}^{(h)}]}{[f_{(a1)}^{(h-1)}] + [f_{(b1)}^{(h-1)}]} \right] e_{w2(a,b)}^{(h)}. \quad (6)$$

gdzie:

$e_{w2(a,b)}^{(h)}$  – wartość funkcji elastyczności popytu względem zmian gospodarczych horyzontu  $h$  i relacji przewozu  $(a,b)$ , funkcję tę można opisać:

$$e_{w2}^h = W \times W \times H \rightarrow \mathbf{R}; w \in (a,b); h \in H.$$

Ustalenie kształtu funkcji  $e_{w2}^h$  jest odrębnym zagadnieniem będącym przedmiotem zainteresowań ekonomii, do którego rozwiązania można stosować metody matematyczne, m.in. analizę regresji liniowej. Zagadnienie elastyczności popytu w transporcie, przedstawionej w [9] jako problem odrębny i złożony, nie jest tematem niniejszego artykułu.

#### 4.3. Funkcja związana z ogólnym kosztem podróży w transporcie kolejowym

Funkcja  $f_{(a,b)1}^h = W \times W \times H \rightarrow \mathbf{N}^+; (a,b) \in R; h \in H$  opisuje koszt podróży transportem kolejowym dla danej relacji podróży  $(a,b)$  w postaci macierzy:

$$[f_{(a,b)1}^{(h)}] = \begin{bmatrix} f_{(1,1)1}^{(h)} & \dots & f_{(1,W)1}^{(h)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{(W,1)1}^{(h)} & \dots & f_{(W,W)1}^{(h)} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Z tą funkcją jest powiązana macierz wskaźników  $F_{f_{(a,b)1}}^{(h)}$ , której elementy zdefiniowano jako:

$$\bigwedge_{h \neq 0} \bigwedge_{(a,b) \in R} [F_{f_{(a,b)1}}^{(h)}] = \left[ \frac{[f_{(a,b)1}^{(h)}]}{[f_{(a,b)1}^{(h-1)}]} e_{(a,b)1}^{(h)} \right]. \quad (8)$$

gdzie:

$e_{(a,b)1}^{(h)}$  – wartość funkcji elastyczności popytu względem zmian kosztu podróży dla horyzontu  $h$  i relacji przewozu  $(a,b)$ , funkcję tę można opisać:

$$e_{L1}^h = W \times W \times H \rightarrow \mathbf{R}^+; w \in (a,b); h \in H.$$

Ogólny koszt podróży (inaczej: koszt uogólniony podróży, ang. *generalized cost*) jest sumą poszczególnych składników kosztu, poszczególnych etapów podróży. Koszty te są rozumiane nie tylko jako koszty finansowe, ale również jako czas podróży, a także niemierzalne właściwości tej podróży lub sposób jej odbywania (np. czynnik komfortu). Niemniej jednak, najczęściej wykorzystywanymi elementami kosztu uogólnionego podróży są koszt i czas podróży. Problematykę uogólnionego kosztu podróży między innymi opisano w [1, 4, 6, 7, 10].

Jak wspomniano, kwestia ustalenia kształtu funkcji elastyczności  $e_{L1}^h$  jest odrębnym zagadnieniem ze styku ekonomii i matematyki, które nie jest opisane w niniejszym artykule. Kształt tej funkcji trudno jest ustalić na podstawie rzeczywistych danych o kształtowaniu się popytu w danym korytarzu transportowym, gdyż niemożliwe jest wykluczenie jednoczesnego wpływu na popyt innych czynników niż czynnik właśnie badany. Analizę elastyczności można wykonać na

podstawie badań ankietowych dotyczących preferencji podróżnych, przy świadomości, iż deklarowane zachowania transportowe różnią się od rzeczywistych.

#### 4.4. Funkcja związana z ofertą przewozową w transporcie kolejowym

Funkcja  $f_{(a,b)2}^h = W \times W \times H \rightarrow \mathbf{N}^+$ ;  $(a,b) \in R$ ;  $h \in H$  opisuje ofertę przewozową (liczbę połączeń) transportem kolejowym dla danej relacji podróży  $(a,b)$  w postaci macierzy:

$$\left[ f_{(a,b)2}^h \right] = \begin{bmatrix} f_{(1,1)2}^{(h)} & \cdots & f_{(1,W)2}^{(h)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{(W,1)2}^{(h)} & \cdots & f_{(W,W)2}^{(h)} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Z tą funkcją jest powiązana macierz wskaźników  $F_{f_{1,2}}^{(h)}$ , której elementy zdefiniowano jako:

$$\bigwedge_{h \neq 0} \bigwedge_{(a,b) \in R} \left[ F_{f_{1,2}}^{(h)} \right] = \left[ \frac{f_{(a,b)2}^{(h)}}{f_{(a,b)2}^{(h-1)}} \right] e_{(a,b)2}^{(h)}. \quad (10)$$

gdzie:

$e_{(a,b)2}^{(h)}$  – wartość funkcji elastyczności popytu względem zmian oferty przewozowej dla horyzontu  $h$  i relacji przewozu  $(a,b)$ , funkcję tę można opisać:

$$e_{(a,b)2}^h = W \times W \times H \rightarrow \mathbf{R}^+; w \in (a,b); h \in H.$$

Analogicznie do poprzednich funkcji, elastyczność popytu względem oferty przewozowej (liczby połączeń) można wyznaczyć na podstawie badań deklarowanych preferencji transportowych.

#### 4.5. Wynikowy potok pasażerski w transporcie kolejowym

Zakłada się, że na zmiany potoku pasażerskiego w wariantcie bazowym ma wpływ tylko otoczenie, czyli czynniki związane z demografią lub gospodarką. W wariantcie projektowanym dochodzą do tego czynniki związane z ofertą przewozową (liczba połączeń, czas przejazdu). Macierz potoków w wariantcie bazowym transportu kolejowego, w horyzoncie czasowym  $h$ , oznaczono  $\mathbf{X}^{(h)}$ , natomiast macierz potoków w transporcie kolejowym w wariantcie projektowanym –  $\mathbf{X}^{(h)}$ . Zatem macierze prognozowanych w horyzoncie  $h$  potoków w transporcie kolejowym określono następująco:

$$\mathbf{X}^{(h)} = \mathbf{X}^{(0)} \cdot {}^{hs} F_{f_{w1}}^{(h)} \cdot {}^{hs} F_{f_{w2}}^{(h)},$$

$$\mathbf{X}^{(h)} = \mathbf{X}^{(0)} \cdot {}^{hs} F_{f_{w1}}^{(h)} \cdot {}^{hs} F_{f_{w2}}^{(h)} \cdot {}^{hs} F_{f_{l1}}^{(h)} \cdot {}^{hs} F_{f_{l2}}^{(h)}.$$

Elementy tych macierzy mają następującą wartość:

$$\left[ x_{(a,b)}^{(h)} \right] = \left[ x_{(a,b)}^{(0)} \right] \left( \frac{\left[ f_{(a1)}^{(h)} \right] + \left[ f_{(b1)}^{(h)} \right]}{\left[ f_{(a1)}^{(h-1)} \right] + \left[ f_{(b1)}^{(h-1)} \right]} \right) \cdot \left( \frac{\left[ f_{(a2)}^{(h)} \right] \left[ f_{(a1)}^{(h)} \right] + \left[ f_{(b2)}^{(h)} \right] \left[ f_{(b1)}^{(h)} \right]}{\left[ f_{(a1)}^{(h-1)} \right] + \left[ f_{(b1)}^{(h-1)} \right]} \right) \cdot \left( \frac{\left[ f_{(a2)}^{(h-1)} \right] \left[ f_{(a1)}^{(h-1)} \right] + \left[ f_{(b2)}^{(h-1)} \right] \left[ f_{(b1)}^{(h-1)} \right]}{\left[ f_{(a1)}^{(h-1)} \right] + \left[ f_{(b1)}^{(h-1)} \right]} \right) e_{w2(a,b)}^{(h)}. \quad (11)$$

$$\left[ x_{(a,b)}^{(h)} \right] = \left[ x_{(a,b)}^{(h)} \right] \left( \frac{\left[ f_{(a,b)1}^{(h)} \right]}{\left[ f_{(a,b)1}^{(h-1)} \right]} \right) e_{(a,b)1}^{(h)} \left( \frac{\left[ f_{(a,b)2}^{(h)} \right]}{\left[ f_{(a,b)2}^{(h-1)} \right]} \right) e_{(a,b)2}^{(h)}. \quad (12)$$

Wielkość potoków odcinkowych można obliczyć według wzoru (2). Wynikowy potok pasażerski w danym horyzoncie czasu jest podstawową wielkością wyjściową niezbędną do obliczenia dalszych wielkości charakteryzujących przewozy pasażerskie w analizowanych korytarzu.

### 5. Potoki pasażerskie w innych gałęziach transportu

Zakładając, że oprócz transportu kolejowego w danym korytarzu rozważa się dwa inne środki transportu: samochodowy i autobusowy oznaczając przez  $\mathbf{X}_{sam}^{(h)}$  oraz  $\mathbf{X}_{bus}^{(h)}$  macierze potoków pasażerskich w transporcie samochodowym i autobusowym. Dla horyzontu bazowego oznaczonego indeksem „(0)” wartości tych macierzy są traktowane jako dane wejściowe do modelu: macierze  $\mathbf{X}_{sam}^{(0)}$  oraz  $\mathbf{X}_{bus}^{(0)}$  (metoda ich wyznaczania nie jest przedmiotem niniejszego artykułu).

W celu wyznaczenia macierzy dla wariantu bazowego dla przyszłych horyzontów czasowych prognozy, należy powtórzyć analogiczną procedurę, jak do obliczania prognozowanego potoku pasażerskiego dla ruchu kolejowego, stosując wskaźniki związane z demografią i rozwojem gospodarczym wraz z odpowiednimi wskaźnikami (funkcjami) elastyczności popytu:

$$\left[ x_{sam}^{(h)} \right] = \left[ x_{sam}^{(0)} \right] \left[ f_{f_{w1}}^{(h)} \right] \left[ f_{f_{w2}}^{(h)} \right], \quad (13)$$

$$\left[ x_{bus}^{(h)} \right] = \left[ x_{bus}^{(0)} \right] \left[ f_{f_{w1}}^{(h)} \right] \left[ f_{f_{w2}}^{(h)} \right]. \quad (14)$$

W celu uproszczenia założono, że funkcje elastyczności popytu są jednakowe dla wszystkich środków transportu (w przeciwnym razie należałoby zdefiniować odrębne funkcje). Podstawowym założeniem metody wskaźnikowej jest to, że w wyniku inwestycji w linię kolejową część pasażerów podróżujących dotychczas innymi środkami transportu zmieni je na transport kolejowy. W tej metodzie pomija się możliwość przejścia pasażerów „w drugą stronę” po poprawieniu stanu infrastruktury drogowej.

Mając formalnie określone potoki pasażerskie w wariantcie bazowym poszczególnych środków transportu, dla poszczególnych horyzontów czasowym (macierze  $X^{(h)}$ ,  $X_{sam}^{(h)}$ ,  $X_{bus}^{(h)}$ ) oraz potoki w transporcie kolejowym dla wariantu projektowanego (macierz  $X^{(h)}$ ), można obliczyć potoki dla pozostałych środków transportu dla wariantu projektowanego, a więc w tym przypadku samochodów osobowych i autobusów. Dodatkową daną wejściową, która jest potrzebna, jest określenie jaki procent pasażerów jest przejmowany z poszczególnych środków transportu. Można próbować określić ją na podstawie dodatkowych badań, natomiast w niniejszych rozważaniach proponuje się przyjęcie wskaźnika przejścia (dokładniej: macierzy takich wskaźników), proporcjonalnie do liczby pasażerów w poszczególnych środkach transportu.

Liczbę pasażerów korzystających z autobusów (macierz  $X_{bus}^{(h)}$ ) lub samochodów osobowych (macierz  $X_{sam}^{(h)}$ ) w wariantcie projektowanym, w danym horyzoncie  $h$  prognozy, określono następująco:

$$X_{bus}^{r(h)} = [x_{bus}^{r(h)}] = \left\{ [x_{bus}^{(h)}] - [x^{r(h)}] - [x^{(h)}] [w_{p\ bus}^{r(h)}] \right\}, \quad (15)$$

$$X_{sam}^{r(h)} = [x_{sam}^{r(h)}] = \left\{ [x_{sam}^{(h)}] - [x^{r(h)}] - [x^{(h)}] \left( 1 - [w_{p\ bus}^{r(h)}] \right) \right\}, \quad (16)$$

gdzie  $w_{p\ bus}^{r(h)}$  jest udziałem liczby pasażerów przejętych przez autobusy w ogólnej liczbie pasażerów przejętych przez transport kolejowy, w danym horyzoncie czasowym prognozy  $h$ . Zgodnie z przyjętym założeniem, wartość elementu macierzy wskaźników przejścia  $W_{p\ bus}^{r(h)}$  wynosi:

$$w_{p\ bus}^{r(h)} = \frac{x_{bus}^{(h)}}{x_{sam}^{(h)} + x_{bus}^{(h)}}. \quad (17)$$

Warto zauważyć<sup>2</sup>, że dla danego  $h$ :

$$X^{(h)} + X_{bus}^{(h)} + X_{sam}^{(h)} = X^{r(h)} + X_{bus}^{r(h)} + X_{sam}^{r(h)}.$$

W ten sposób uzyskano pełen zestaw wyników, jeśli chodzi o liczbę podróży odbywanych w poszczególnych relacjach, poszczególnymi środkami transportu, w poszczególnych horyzontach czasowych prognozy, dla każdego z wariantów. Kolejnym krokiem będzie określenie dodatkowych danych stosowanych w analizach wariantów projektowanych (z oczywistych względów formalnie zapisano tylko jeden wariant projektowany oznaczając go znakiem „prim”).

## 6. Praca przewozowa środków transportu

W pracach studialnych dotyczących transportu kolejowego, istotnym parametrem służącym do oceny wielkości przewozów jest wielkość „praca przewozowa” dla poszczególnych środków transportu. W celu obliczenia wielkości tej pracy (wyrażanej w pasażerokilometrach) należy najpierw zdefiniować macierz odległości podróży dla poszczególnych relacji podróży, poszczególnymi środkami transportu.

Niech  $S^{(h)}$  będzie macierzą odległości podróży w transporcie kolejowym w horyzoncie prognozy  $h$ :

$$S^{(h)} = \left\{ s_{(a,b)}^{(h)} \right\} : (a,b) \in R, \quad s_{(a,b)}^{(h)} = 0 \text{ dla } a = b \\ \text{(przekątna macierzy)}.$$

Niech  $S_{bus}^{(h)}$  będzie macierzą odległości podróży w transporcie autobusowym w horyzoncie prognozy  $h$ .

$$S_{bus}^{(h)} = \left\{ s_{bus(a,b)}^{(h)} \right\} : (a,b) \in R, \quad s_{bus(a,b)}^{(h)} = 0 \text{ dla } a = b \\ \text{(przekątna macierzy)}.$$

Niech  $S_{sam}^{(h)}$  będzie macierzą odległości w transporcie samochodowym w horyzoncie prognozy  $h$ .

$$S_{sam}^{(h)} = \left\{ s_{sam(a,b)}^{(h)} \right\} : (a,b) \in R, \quad s_{sam(a,b)}^{(h)} = 0 \text{ dla } a = b \\ \text{(przekątna macierzy)}.$$

Przyjmując, że odległości podróży w wariantach projektowanych będą inne niż w wariantcie bazowym, można oznaczyć je, podobnie jak potoki pasażerów w wariantcie inwestycyjnym, znakiem „prim”. W praktyce rzadko zdarza się, aby przyjmowane odległości były różnicowane według horyzontów prognozy oraz jej wariantów, jednakże w celu zachowania formalnego, zapisu taka możliwość jest przewidziana.

<sup>2</sup> Nie rozważa się tu pojęcia ruchu wzbudzonego, czyli dodatkowego ruchu w korytarzu, który jest ewentualnie wygenerowany z uwagi na skok jakościowy w wyniku inwestycji.

Mając określone macierze odległości można określić wielkość pracy przewozowej dla poszczególnych środków transportu, dla poszczególnych horyzontów czasowych  $h$ . Na podstawie przyjętych oznaczeń praca przewozowa transportu kolejowego  $P^{(h)}$  w analizowanym obszarze w  $h$ -tym roku prognozy dla wariantu bazowego wynosi:

$$P^{(h)} = \sum_{(a,b) \in R} x_{(a,b)}^{(h)} s_{(a,b)}^{(h)}. \quad (18)$$

Analogicznie dla wariantu projektowanego:

$$P'^{(h)} = \sum_{(a,b) \in R} x'^{(h)}_{(a,b)} s'^{(h)}_{(a,b)}. \quad (19)$$

Wielkości pracy przewozowej pozostałych środków transportu (autobusów –  $P_{bus}^{(h)}$ ,  $P'_{bus}{}^{(h)}$  i samochodów osobowych –  $P_{sam}^{(h)}$ ,  $P'_{sam}{}^{(h)}$ ) wyznacza się jako sumy iloczynów odległości i wielkości potoku pasażerskiego po wszystkich relacjach przewozowych.

### 6.1. Zmniejszenie pracy eksploatacyjnej samochodów osobowych

Inwestycje w infrastrukturę transportu kolejowego z założenia mają wpływać na kształtowanie systemu transportowego w taki sposób, aby spowodować zmniejszenie wykorzystania transportu drogowego, a w szczególności transportu indywidualnego (mniejsze koszty bezpośrednie i pośrednie tego rodzaju transportu). Dane na temat wielkości zmniejszenia pracy eksploatacyjnej wykorzystywane w analizie kosztów i korzyści płynących z planowanych inwestycji są umieszczane nie tylko po stronie korzyści finansowych i środowiskowych, lecz również po stronie oszczędności związanych ze zmniejszeniem wypadkowości i skutków wypadków.

W celu obliczenia zmniejszenia pracy eksploatacyjnej samochodów osobowych na analizowanym obszarze, należy określić różnicę pracy przewozowej pomiędzy wariantem bazowym a wariantami projektowanymi. Ponieważ istotna jest różnica w fizycznie wykonywanej pracy eksploatacyjnej, należy zdefiniować średni współczynnik zapewnienia samochodu osobowego, aby przejść od wielkości oszczędzonych pasażerokilometrów do wielkości oszczędzonych pojazdokilometrów. Wprowadzono oznaczenie współczynnika średniego zapewnienia samochodu osobowego w danym horyzoncie czasowym  $h$  i oznaczono:  $f_{sam}^{(h)}$ . Przyjęto, że ten współczynnik jest jednakowy niezależnie od tego, czy rozważa się wariant bazowy czy wariant projektowany. Można zatem określić, dla każdego horyzontu prognozy, oszczędność pracy eksploatacyjnej pojazdów samochodowych  $OE_{sam}^{(h)}$ :

$$OE_{sam}^{(h)} = \frac{P_{sam}^{(h)} - P'_{sam}{}^{(h)}}{f_{sam}^{(h)}} \quad (20)$$

W celu uzyskania sumarycznych oszczędności pracy eksploatacyjnej w transporcie samochodowym dla całego okresu analizy, należy wykonać sumowanie wartości  $OE_{sam}^{(h)}$  po wszystkich  $h$ . Tego wyводу nie powtarza się dla transportu autobusowego, przyjmując że spadek liczby pasażerów w wariantcie projektowanym w stosunku do wariantu bazowego nie przekłada się bezpośrednio na pracę eksploatacyjną (liczbę kursów) autobusów, dlatego można zapisać, że oszczędności pracy eksploatacyjnej dla transportu autobusowego  $OE_{bus}^{(h)}$  są równe 0 dla każdego  $h$ .

Oszczędność w eksploatacyjnej pracy samochodów osobowych jest jednym z ekonomicznych efektów projektowanej inwestycji. Oprócz aspektów finansowych, jest on związany z bezpieczeństwem ruchu drogowego oraz korzyścią dla środowiska naturalnego.

### 6.2. Czas podróży pasażerów i oszczędności czasu

Z punktu widzenia efektywności ekonomicznej projektu istotne jest to, ile czasu poświęca się na podróże w analizowanym obszarze. Z założenia przyjmuje się, iż inwestycja powinna pozytywnie wpłynąć na ten aspekt podróży przez skrócenie czasu wykorzystywanego na podróże. W celu określenia oszczędności jakie w tym zakresie będą możliwe do uzyskania w wyniku realizacji inwestycji, należy najpierw określić łączny czas podróży wszystkich pasażerów we wszystkich analizowanych środkach transportu.

W celu obliczenia łącznego czasu podróży (wyrażanego w pasażerogodzinach) należy najpierw zdefiniować macierz czasów podróży poszczególnych relacji podróży, poszczególnymi środkami transportu.

Niech  $T^{(h)}$  będzie macierzą czasów podróży w transporcie kolejowym w horyzoncie prognozy  $h$ , dla wariantu bazowego:

$$T^{(h)} = \{t_{(a,b)}^{(h)}\} : (a,b) \in R, t_{(a,b)}^{(h)} = 0 \text{ dla } a = b \text{ (przekątna macierzy)}.$$

Niech  $T_{bus}^{(h)}$  będzie macierzą czasów podróży w transporcie autobusowym w horyzoncie prognozy  $h$ , dla wariantu bazowego:

$$T_{bus}^{(h)} = \{t_{bus(a,b)}^{(h)}\} : (a,b) \in R, t_{bus(a,b)}^{(h)} = 0 \text{ dla } a = b \text{ (przekątna macierzy)}.$$

Niech  $T_{sam}^{(h)}$  będzie macierzą czasów podróży w transporcie samochodowym w horyzoncie prognozy  $h$ , dla wariantu bazowego:

$$\mathbf{T}_{sam}^{(h)} = \left\{ t_{sam(a,b)}^{(h)} : (a,b) \in R, t_{sam(a,b)}^{(h)} = 0 \text{ dla } a = b \right. \\ \left. (\text{przekątna macierzy}). \right.$$

Analogicznie można zdefiniować macierze czasów podróży dla wariantu projektowanego, oznaczone:

$$\mathbf{T}^{(h)}, \mathbf{T}_{bus}^{r(h)} \text{ oraz } \mathbf{T}_{sam}^{r(h)}.$$

Mając określone macierze czasów podróży można określić łączny czas podróży dla poszczególnych środków transportu i dla poszczególnych horyzontów czasowych  $h$ . Na podstawie przyjętych oznaczeń, czas podróży dla pasażerów transportu kolejowego  $C^{(h)}$  w analizowanych obszarze w  $h$ -tym roku prognozy dla wariantu bazowego wynosi:

$$C^{(h)} = \sum_{(a,b) \in R} x_{(a,b)}^{(h)} t_{(a,b)}^{(h)}. \quad (21)$$

Analogicznie dla wariantu projektowanego:

$$C^{r(h)} = \sum_{(a,b) \in R} x_{(a,b)}^{r(h)} t_{(a,b)}^{r(h)}. \quad (22)$$

Łączne czasy podróży dla pozostałych środków transportu (autobusów –  $C_{bus}^{(h)}$ ,  $C_{bus}^{r(h)}$  i samochodów osobowych –  $C_{sam}^{(h)}$ ,  $C_{sam}^{r(h)}$ ) wyznacza się analogicznie, jako sumy iloczynów jednostkowych czasów i wielkości potoku pasażerskiego po wszystkich relacjach przewozowych.

Mając określone łączne czasy podróży wszystkich analizowanych środków transportu dla danego horyzontu prognozy  $h$ , można określić oszczędność czasu podróży pasażerów w  $h$ -tym roku prognozy oraz oznaczyć jako  $OC^{(h)}$ :

$$OC^{r(h)} = (C^{(h)} + C_{bus}^{(h)} + C_{sam}^{(h)}) - (C^{r(h)} + C_{bus}^{r(h)} + C_{sam}^{r(h)}) \quad (23)$$

W celu uzyskania sumarycznych oszczędności pracy eksploatacyjnej dla całego okresu analizy, należy wykonać sumowanie wartości  $OC^{r(h)}$  po wszystkich  $h$ . Sumaryczna oszczędność czasu określa jeden z ekonomicznych efektów projektowanej inwestycji.

## 7. Przykład praktycznego zastosowania metody

Macierzową metodę wskaźnikową prognozowania pasażerskich potoków kolejowych zastosowano podczas opracowywania dokumentacji przedprojektowej projektu pn.: „Rewitalizacja linii kolejowej nr 287 Nysa – Opole” realizowanego w ramach „Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Opolskiego na lata 2014–2020” [2]. Z uwagi na poufny charak-

ter danych wykorzystanych w artykule, przedstawiono jedynie zagregowane i zaokrąglone wyniki.

W bazowym 2016 roku, w analizowanym korytarzu transportowym Opole – Nysa, zidentyfikowano potok pasażerski wynoszący około 9,9 tys. podróży na dobę, z czego 1,2 tys. (około 12%) stanowiły podróże z wykorzystaniem transportu kolejowego. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń trakcyjnych stwierdzono, że w wyniku inwestycji, czas przejazdu pociągiem pomiędzy Opolem a Nysą skróci się z 84 minut do 52–53 minut, czego efektem będzie wzrost średniej prędkości podróży pociągiem z 38 km/h do 58 km/h. Skrócenie czasu podróży oraz zwiększenie liczby połączeń kolejowych na analizowanej linii umożliwi zwiększyć liczbę pasażerów o około 85%, do około 2,3 tys. pasażerów na dobę, przy założeniu, że w korytarzu transportowym Opole – Nysa w przeciągu najbliższych 30 lat liczba wszystkich podróży wzrośnie o 45% w stosunku do 2016 roku.

## 8. Podsumowanie

W opisanym metodzie można wyróżnić sześć głównych etapów, do realizacji których potrzebne są określone dane wejściowe, co przedstawia tablica 1.

Przedstawiona metoda pozwala na uzyskanie prognoz przewozów, które w dużej mierze bazują na ogólnodostępnych danych społeczno-gospodarczych. Najistotniejsze dla uzyskania prawidłowych wyników jest zebranie rzetelnych danych o kształtowaniu się potoków pasażerskich na badanym obszarze – stanowi one bazę dla całej analizy. Im mniej dokładne są dane, tym mniej zgodne z rzeczywistością mogą okazać się wyniki prognoz.

Cechą charakterystyczną metod wskaźnikowych będącą ich zaletą, jest łatwość ich zastosowania i nieskomplikowany aparat matematyczny służący do wykonywania kolejnych etapów obliczeniowych. Metody te mają jednak liczne ograniczenia oraz następujące braki w stosunku do metody przedstawionej w artykule:

- nie uwzględniają rozwoju infrastruktury transportowej konkurencyjnych dla transportu kolejowego gałęzi transportu,
- nie uwzględniają wpływu kształtu oferty przewozowej (np. liczby połączeń, cen biletów itp.) konkurencyjnych gałęzi transportu,
- nie uwzględniają wpływu rozwoju infrastruktury na sumaryczną wielkość popytu w korytarzu,
- nie dają możliwości wykorzystania metody w przypadku korytarzy gdzie istnieje już niezerowy pasażerski ruch kolejowy,
- nie uwzględniają zależności parametrów ruchu samochodów osobowych od wielkości natężenia ruchu drogowego (przepustowość – natężenie ruchu – prędkość ruchu).

Tablica 1

## Kolejne etapy metody wskaźnikowej

Dane wejściowe	Etap	Dane wynikowe
Zdefiniowany obszar projektu	1. Definicja grafu sieci transportowej	Graf $G$ , Zbiór relacji $R$
Dane społeczno-gospodarcze adekwatne do obszaru	2. Określenie charakterystyk grafu sieci transportowej	Funkcje: $f_{w1}^{(h)}, f_{w2}^{(h)}, f_{(a,b)1}^{(h)}, f_{(a,b)2}^{(h)}$
Badania ankietowe, pomiary, dane przewoźników	3. Określenie bazowych macierzy podróży dla poszczególnych środków transportu	Macierze: $X^{(h)}, X_{bus}^{(h)}, X_{sam}^{(h)}$
Wyniki z etapu 2 i 3	4. Określenie prognozowanych macierzy potoków dla poszczególnych środków transportu	Macierze: $X^{r(h)}, X_{bus}^{r(h)}, X_{sam}^{r(h)}$
Jednostkowe odległości i czasy podróży – macierze: $S^{(h)}, S_{bus}^{(h)}, S_{sam}^{(h)}, T^{(h)}, T_{bus}^{(h)}, T_{sam}^{(h)}, T^{r(h)}, T_{bus}^{r(h)}, T_{sam}^{r(h)}$ oraz wyniki z etapu 4	5. Określenie pracy przewozowej i czasu podróży	$P^{(h)}, P_{bus}^{(h)}, P_{sam}^{(h)}, P^{r(h)}, P_{bus}^{r(h)}, P_{sam}^{r(h)}, C^{(h)}, C_{bus}^{(h)}, C_{sam}^{(h)}, C^{r(h)}, C_{bus}^{r(h)}, C_{sam}^{r(h)}$
Wyniki z etapu 5	6. Określenie oszczędności pracy eksploatacyjnej i czasu podróży.	$OC^{r(h)}, OE^{r(h)}$

Źródło: opracowanie własne

Zastosowanie metody wskaźnikowej umożliwiła, mimo jej ograniczeń, uzyskać potrzebne dane do analiz wykonalności inwestycji przeprowadzanej w procesie aplikowania o fundusze europejskie, nawet w przypadku ograniczonej liczby danych wejściowych. W czasie opracowywania prognoz należy jednak zdawać sobie sprawę z jej ograniczeń i przyjmowanych uproszczeń. Metoda wskaźnikowa nie nadaje się do zastosowania w projektowanych nowych odcinkach sieci kolejowej lub reaktywacji ruchu kolejowego po dłuższym okresie, a jest przeznaczona dla sytuacji, w których ruch kolejowy istniał już przed planowaną inwestycją.

## Literatura

- Hensher D., Button K.: *Handbook in Transport modelling*, 2008.
- Klemba S., Chyliński P.: *Wskaźnikowa prognoza przewozów dla linii Nysa – Brzeg*, Praca IK nr 5678/11, Warszawa 2016.
- Klemba S.: *Wybrane zagadnienia prognozowania potoków pasażerskich*, Problemy Kolejnictwa, Zeszyt nr 152, Warszawa 2011, s. 183–195.
- Kłos-Adamkiewicz Z.: *Uogólniony koszt podróży na przykładzie wyboru komunikacji miejskiej i samochodu osobowego*, Problemy Transportu i Logistyki nr 3/2016(35), s. 73–82.
- Korzan B.: *Elementy teorii grafów i sieci*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.
- Ortúzar J., Willumsen L.: *Modelling transport*, 4<sup>th</sup> Edition, 2011.
- Szarata A.: *Estymacja uogólnionego kosztu w podróżach Park and Ride*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej – Budownictwo, z. 101, s. 399–406, Katowice 2003.
- Trudeau J.R.: *Introduction to graph theory*, Dover Publications INC, New York 1993.
- Urbanyi-Popiołek I. (red. nauk.): *Ekonomiczne i organizacyjne aspekty transportu*, Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Gospodarki w Bydgoszczy, 2013.
- Zochowska R.: *Uogólniony koszt podróży jako kryterium oceny wariantów organizacji ruchu w czasie zajęcia pasa drogowego w mieście*, Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej – Transport, z. 97, s. 565–574, Warszawa 2013.

## The Coefficient Matrix Method of Forecasting of Railway Passenger Flows

### Summary

The main purpose of the paper is to describe the coefficient matrix method of forecasting railway passenger flows, which is used in the Railway Research Institute's works. It presents a formal notation of definitions and operations which are used in the method.

The first stage is to define a shape of analysed transport network and a set of possible relations of passenger travels. Then, it is necessary to collect appropriate data about base values of passenger flows in each means of transport in an analysed transport corridor. Next, the most important factors which have an impact on travels are defined, and the functions describing what their influence is. After that, projected values of passenger flows could be calculated.

The article also presents an example of practical application of the method by describing the case of the Opole – Nysa line reconstruction project. Finally, the main stages of method are summarized, indicating the necessary input data for each stage.

**Keywords:** railway transport, transport modelling, demand forecast

## Метод матрицы индикаторов в прогнозировании пассажирских железнодорожных потоков

### Резюме

Целью этой статьи является систематизация используемого в работах Железнодорожного института метода матрицы индикаторов, используемого для прогнозирования объема пассажирских перевозок в проектах модернизации железнодорожной инфраструктуры. Представлена была формальная запись дефиниции и мер принятых в рамках этого метода.

Первым этапом подготовки прогноз является определение транспортной сети и набора транспортных связей. Впоследствии надо собрать и разработать данные на тему формирования пассажирского потока в анализируемом транспортном коридоре, получая этим способом данные по основным пассажирским потокам. После определения факторов влияющих на размер пассажирского потока и обозначения функции определяющих вид, по которому они влияют на количество перевозок, рассчитываются прогнозируемые пассажирские потоки. Последним этапом является вычисление нужных для анализа экономической эффективности проекта прогнозируемых изменений размера перевозочной работы и общего времени поездки пассажиров.

В статье приводится пример использования метода вместе с презентацией базисных результатов. В итогах указаны главные этапы представленного метода вместе с нужными для их реализации входными данными и полученными выходными данными.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, моделирование перевозок, прогноз перевозок