ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: TRANSPORT z. 44 Nr kol. 1562

Renata ŻOCHOWSKA

WYZNACZANIE MACIERZY ZWIĄZKÓW RUCHOWYCH W GĘSTYCH SIECIACH DROGOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę wyznaczania macierzy związków ruchowych pomiędzy poszczególnymi odcinkami sieci drogowej. W celu usprawnienia obliczeń opracowano aplikację komputerową, której działanie zaprezentowano na przykładzie liczbowym. Program został opracowany jako narzędzie pomocnicze w systemie optymalizacji zamknięć drogowych w złożonych sieciach transportowych.

EVALUATION OF TRAFFIC RELATION MATRIX IN DENSE ROAD NETWORK

Summary. The method of traffic relation matrix evaluation has been presented in the article. To make the calculation more efficient the software application has been designed, that has been verified on numeric example. The application is an essential tool in road closure optimisation system in dense transportation network.

1. WSTĘP TEORETYCZNY

Planowe zamknięcie pasa drogowego w celu prowadzenia robót powinno wynikać z projektu technicznego i może nastąpić przy [1]:

a) budowie nowych i modernizacji istniejących dróg oraz urządzeń technicznych,
b) konieczności utrzymania i ochrony dróg oraz urządzeń technicznych.

Istotą optymalnego rozmieszczenia zamknięć w sieci jest opracowanie takiego układu jednoczesnych zamknięć, aby z uwagi na związki ruchowe między drogami, straty ruchowe będące skutkiem poszczególnych zamknięć pokrywały się w maksymalnym stopniu [2]. Podstawowym zadaniem jest umiejętne wykorzystanie odciążenia ulic na wykonanie robót oraz unikanie zamknięć jednoczesnych na ulicach dociążonych. Innymi słowy, zamknięcia, które mają wspólny ruch stracony w okresie zamknięcia opłaca się planować jednocześnie, ponieważ „przyciągają się". Natomiast zamknięcia, które mają wspólne drogi okrężne (wspólny ruch dodatkowy) – „odpychają się".

Związki ruchowe pomiędzy poszczególnymi drogami można określić za pomocą macierzy Z, której element z_{ij} wyraża wielkość wspólnego obciążenia drogi i oraz drogi j. Macierz ta jest symetryczna, tzn. $z_{ij} = z_{ji}$, a elementy głównej przekątnej z_{ii} – wyrażają obciążenie drogi i. Dla danego i prawdziwe jest ograniczenie: $z_{ij} \leq z_{ii}$. Dla wielu dróg odległych od siebie związki ruchowe nie istnieją, tzn. $z_{ij} = 0$.

Macierz związków ruchowych Z określona dla wszystkich dróg jest opisem struktury ruchu rozważanej sieci. Na jej podstawie można ocenić, w jakim stopniu zmniejszenie ruchu w okresie zamknięć na jednej drodze może wpłynąć na zmniejszenie ruchu innych dróg.

W wielu sytuacjach konieczna jest znajomość szczegółowych informacji o związkach ruchowych dróg. Stąd można budować niezależnie macierze Z dla pojazdów osobowych, ciężarowych lub autobusów. Tworzenie macierzy Z dla autobusów ze względu na stały rozkład jazdy jest analogiczne do budowy macierzy związków dla ruchu kolejowego [3]. Dodatkowo związki ruchowe można określać dla zadanych przedziałów czasu na podstawie aktualnego natężenia ruchu.

Jeżeli iloraz z_{ij} / z_{ii} , tj. stosunek liczby tras wspólnych dróg i oraz j do liczby tras drogi i, będziemy rozumieć jako prawdopodobieństwo zdarzenia, że losowo wybrana trasa z obciążenia drogi i będzie również trasą z obciążenia drogi j, a s_i – jako straty ruchowe dla zamknięcia drogi i (liczba tras, o którą powinna być odciążona zamykana droga i), to wyrażenie:

$$\frac{z_{ij}}{z_{ii}} s_i$$

można zinterpretować jako oczekiwaną wartość strat obciążenia drogi i z powodu strat s_i tras obciążenia drogi j (oczekiwana liczba pojazdów, o którą zmniejszy się obciążenie drogi j) [3].

2. METODA WYZNACZANIA MACIERZY ZWIĄZKÓW

W ruchu kolejowym utworzenie macierzy związków ruchowych Z nie stanowi problemu, ponieważ tworzy się ją na podstawie rozkładu jazdy pociągów. Ruch drogowy jednak nie jest zdeterminowany, dlatego wartości macierzy Z mają charakter przybliżony, a czynnikiem niezbędnym do ich utworzenia jest znajomość rozkładu potoków ruchu na sieci. Algorytm wyznaczania macierzy Z pomiędzy poszczególnymi odcinkami międzywęzłowymi w sieci drogowej przedstawiono na rys.1.

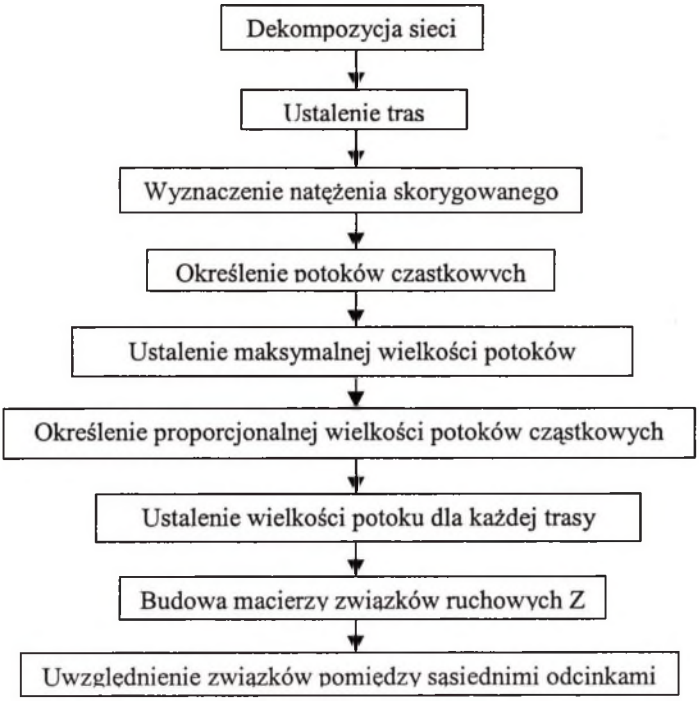
Kolejne kroki wymagają bliższego omówienia.

2.1. Dekompozycja sieci

Ze względu na rozmiar macierzy Z (n × n, gdzie n jest liczbą połączeń w sieci), strukturę sieci można rozłożyć na k mniejszych sieci o możliwych do przyjęcia rozmiarach. Przy dekompozycji rozwiązujemy niezależnie k zadań przy odpowiadających im zbiorach warunków ograniczających [4]. W przypadku sieci transportowych najczęściej wykorzystuje się dwa sposoby dekompozycji:

a) podział geograficzny,
b) podział hierarchiczny.

W przypadku podziału geograficznego cały obszar badania dzielimy na szereg jednostek przestrzennych, natomiast w przypadku podziału hierarchicznego sieć transportową dzielimy na drogi o pierwszorzędnym znaczeniu dla ruchu, znaczeniu drugorzędnym itd. Następnie w poszczególnych systemach wyznaczamy związki ruchowe pomiędzy odpowiednimi połączeniami, a w planie głównym zajmujemy się analizą całej sieci. Możliwe jest również połączenie podziału geograficznego z hierarchicznym.



Rys.1. Algorytm wyznaczania macierzy Z
Fig. 1. Block diagram of matrix „Z" evaluation

2.2. Ustalenie tras

Elementem niezbędnym do wyznaczenia związków ruchowych jest znajomość wszystkich punktów nadania i odbioru występujących w analizowanej sieci. Trasy pomiędzy tymi punktami można wyznaczyć jedną z metod najkrótszych ścieżek [4, 5, 6, 7], przyjmując jako kryterium poszukiwania czas lub koszty podróży. **Trasami przelotowymi** umownie nazwano wszystkie trasy mające punkty nadania i odbioru (początek i koniec podróży) w punktach brzegowych analizowanej sieci. Dodatkowo obliczenia powinny być potwierdzone odpowiednimi pomiarami ruchu.

2.3. Wyznaczenie natężenia skorygowanego

Wartości natężenia ruchu uzyskane na podstawie badań i pomiarów odzwierciedlają wielkość całego ruchu występującego na danym wlocie skrzyżowania w określonej jednostce czasu. Wielkość tę należy pomniejszyć o wartość natężenia ruchu lokalnego (wjazdy na osiedla, parkowanie przy drodze itd.). Stąd otrzymuje się natężenie skorygowane, które w założeniu można rozłożyć w całości na wyznaczone wcześniej trasy.

2.4. Określenie potoków cząstkowych

Analizując poszczególne trasy wyznaczone w p. 2.2, należy określić dla odpowiednich relacji na wlotach skrzyżowań potoki cząstkowe, czyli ustalić numery tras, które korzystają z danych relacji.

2.5. Ustalenie maksymalnej wielkości potoków

Przy badaniach sieci transportowej **potoki** wyraża się jako liczbę osób lub pojazdów przemieszczających się z punktu nadania do miejsca przeznaczenia [4]. Według opisanej metody maksymalna wielkość potoku dla określonej trasy jest równa minimalnej wartości natężeń na jej odcinkach składowych. Oznaczając i-tą trasę przez p_i, maksymalną wielkość potoku na trasie określa się przez Q_{maxpi}.

Wielkości potoków dla każdej trasy są różne w różnych przedziałach czasowych. Przy określaniu związków ruchowych powinno brać się pod uwagę te interwały, w których związki te są najsilniejsze. Dlatego zazwyczaj bada się sieć biorąc pod uwagę natężenia w godzinie szczytowej.

2.6. Określenie proporcjonalnej wielkości potoków cząstkowych

Dla każdej relacji na wlocie skrzyżowania na podstawie znajomości tras wykorzystujących tę relację (p. 2.4) należy obliczyć sumę maksymalnych wielkości potoków cząstkowych wyznaczonych w p. 2.5, którą oznacza się przez ΣQ_{maxpi}. Następnie dla każdej relacji na wlocie skrzyżowania wyznacza się udziały procentowe poszczególnych potoków cząstkowych. Zakłada się, że udziały te są stałe dla każdego odcinka sieci.

Jako proporcjonalną wielkość potoku na trasie Q_{proppi} określono taki potok, który uwzględnia stałe udziały procentowe potoków cząstkowych. Zgodnie z powyższym założeniem należy skorygować sumy maksymalnych wielkości potoków cząstkowych na wlotach skrzyżowań do wartości rzeczywistych. Jeżeli rzeczywiste natężenie relacji na wlocie jest większe lub równe Q_{maxpi}, to Q_{prppi} dla tej relacji jest równe Q_{maxpi}. W przeciwnym przypadku należy jako Q_{proppi} przyjąć natężenie relacji, a następnie rozłożyć jego wielkości potoków cząstkowych zgodnie z założeniem stałego udziału procentowego. W ten sposób dla każdej relacji na wlocie potoki cząstkowe otrzymują nowe proporcjonalne wartości.

2.7. Określenie wielkości potoków na trasach

Dla każdej z określonych tras wyznacza się nowe wielkości potoków jako minimalne natężenie na poszczególnych odcinkach trasy. W przeciwieństwie do p. 2.5., w którym do ustalenia maksymalnych potoków na trasie brało się pod uwagę całe natężenie relacji na wlocie (nie znając udziałów procentowych potoków cząstkowych), w tym miejscu bierze się pod uwagę proporcjonalne wartości potoków cząstkowych dla danej relacji wyznaczone w p. 2.6. Wielkość potoku na danej trasie jest wspólnym obciążeniem dla wszystkich odcinków składowych tej trasy.

2.8. Budowa macierzy związków ruchowych Z

Początkowo macierz związków Z jest wyzerowana. Potoki na odcinkach międzywęzłowych (z_{ii}) są równe sumie natężeń relacji na wlocie. Algorytm analizuje poszczególne trasy i dla każdej pary dwóch węzłów należących do trasy w macierzy Z dodaje obliczoną w p. 2.7. wielkość potoku na analizowanej trasie do poprzedniej wartości macierzy Z. W ten sposób otrzymuje się macierz związków ruchowych uwzględniającą wielkości potoków na określonych trasach w sieci.

2.9. Uwzględnienie związków pomiędzy sąsiednimi odcinkami

Najsilniejsze związki ruchowe występują pomiędzy sąsiednimi odcinkami sieci. Są one jednocześnie najłatwiejsze do określenia, ponieważ nie wymagają znajomości tras. W

opisanej metodzie zakłada się, że wspólne natężenie dwóch sąsiadujących odcinków i oraz j jest równe natężeniu odpowiedniej relacji w węźle łączącym te dwa odcinki.

W macierzy Z należy również uwzględnić związki ruchowe pomiędzy sąsiadującymi odcinkami. Dla każdej sąsiadującej pary odcinków i oraz j określa się element macierzy z_{ij} jako wartość natężenia odpowiedniej relacji na wlocie węzła łączącego te odcinki.

W ten sposób otrzymuje się macierz związków ruchowych Z określającą wspólne obciążenie dwóch odcinków zarówno na podstawie wspólnych tras, jak i związków pomiędzy sąsiednimi odcinkami.

3. BUDOWA PROGRAMU POMOCNICZEGO „MATRIX"

W Zakładzie Inżynierii Ruchu Politechniki Śląskiej opracowano pomocniczą aplikację komputerową „MATRIX" usprawniającą wyznaczanie macierzy związków ruchowych na podstawie opisanej metody. Działanie programu przedstawiono analizując przykład obliczeniowy.

Schemat przykładowej sieci przedstawiono na rys. 2. Fragment sieci opisany jest grafem o 8 wierzchołkach i 22 łukach. Wierzchołkami są skrzyżowania, natomiast łukami – odcinki międzywęzłowe. Numer każdego odcinka jest liczbą 6-cyfrową, w której pierwsze trzy cyfry określają numer węzła początkowego, a ostatnie – węzła końcowego. W ten sposób łuki zostają opisane w sposób jednoznaczny.

3.1. Formularz „Menu"

Uruchomienie aplikacji powoduje przejście do formularza głównego o nazwie „Menu". Umożliwia on wybór różnych opcji: „Obliczaj", „Dane", „Plan napraw" oraz „Wyjście". Wybór opcji „Obliczaj" powoduje przejście do procedury obliczeniowej oraz odpowiednią zmianę rozmiarów formularza umożliwiającą wyświetlenie na ekranie wyznaczonej macierzy Z. Obliczoną macierz można zapisać w tablicy korzystając z podopcji „Zapisz".

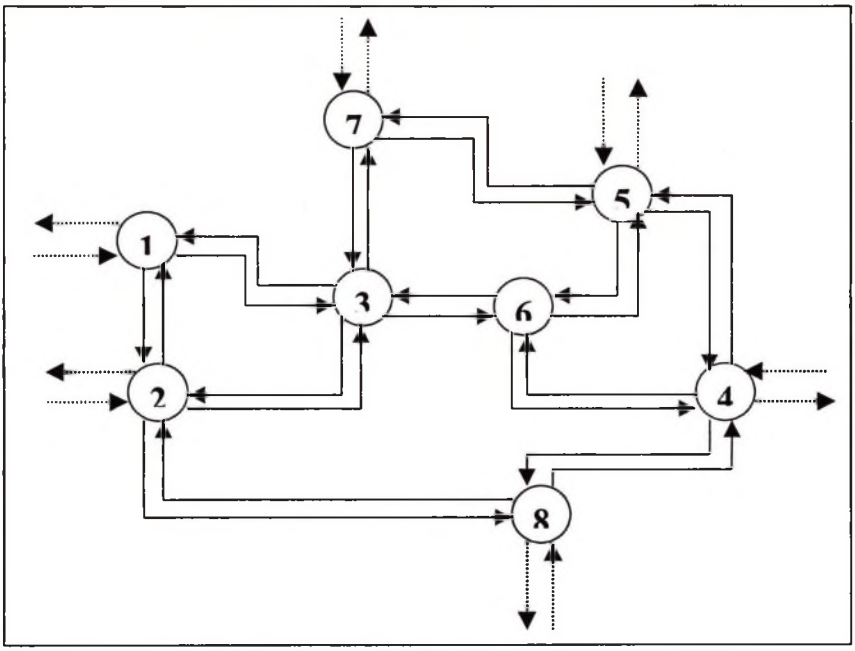
Wybór opcji „Dane" oraz „Plan napraw" powoduje wyświetlenie na ekranie odpowiednich formularzy. Aby zakończyć pracę z programem, należy nacisnąć klawisz „Wyjście". Widok ekranu formularza „Menu" wraz z wyznaczoną macierzą związków ruchowych Z przedstawia rys. 3.

3.2. Formularz „Dane"

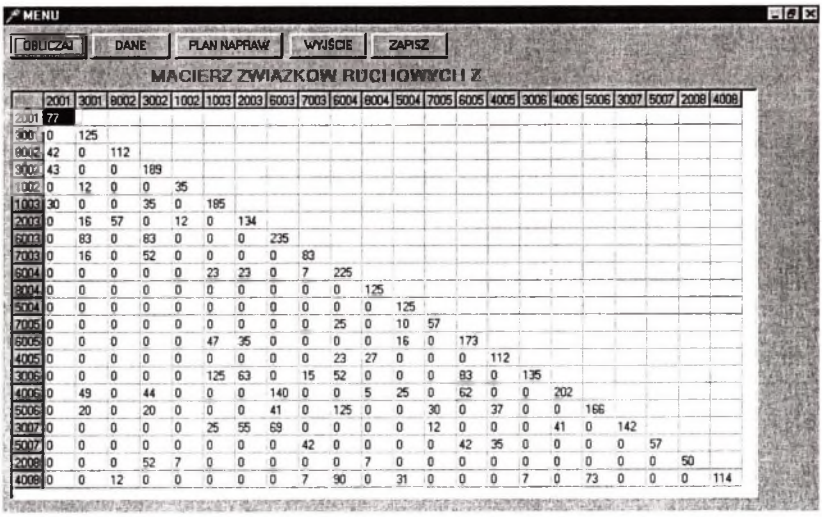
Formularz przedstawia dane niezbędne do obliczenia związków ruchowych pomiędzy odcinkami. Wszystkie informacje zgromadzone są w 3 elementach obiektowych typu TStringGrid (siatka znakowa) odnoszących się do:

- związków sieciowych pomiędzy węzłami i odcinkami,
- wartości natężeń w węzłach,
- określenia tras.

Każde skrzyżowanie opisane jest przez numery odcinków stanowiących jego wloty i wyloty. Wloty numerowane są od lewej strony przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. Na każdym wlocie określa się natężenia dopuszczalnych relacji. W opisanym przykładzie wyznaczono 17 tras przechodzących przez dany fragment sieci drogowej. Nawigatory umożliwiają sprawne przeszukiwanie danych.



Rys.2. Schemat przykładowej sieci drogowej
Fig.2. Scheme of road network

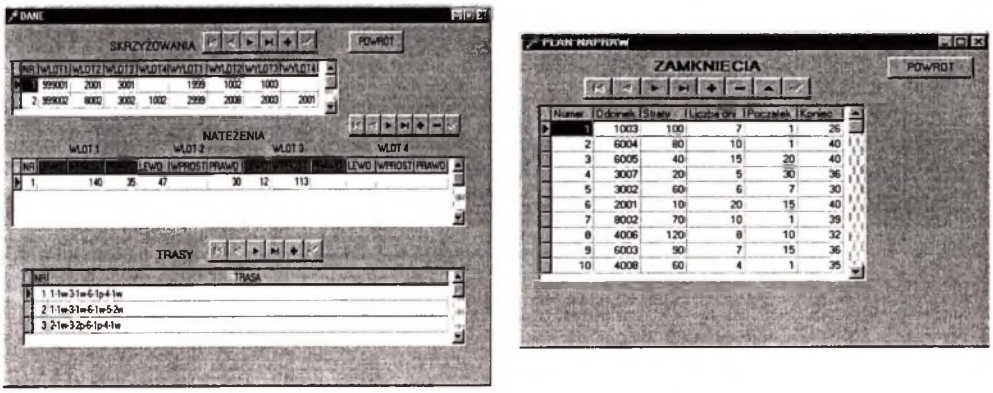


	2001	3001	8002	3002	1002	1003	2003	6003	7003	6004	8004	5004	7005	6005	4005	3006	4006	5006	3007	5007	2008	4008
2001	77																					
3001	0	125																				
8002	42	0	112																			
3002	43	0	0	189																		
1002	0	12	0	0	35																	
1003	30	0	0	35	0	185																
2003	0	16	57	0	12	0	134															
6003	0	83	0	83	0	0	0	235														
7003	0	16	0	52	0	0	0	0	83													
6004	0	0	0	0	0	23	23	0	7	225												
8004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	125											
5004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	125										
7005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	10	57									
6005	0	0	0	0	0	47	35	0	0	0	0	16	0	173								
4005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	27	0	0	0	112							
3006	0	0	0	0	0	125	63	0	15	52	0	0	0	83	0	135						
4006	0	49	0	44	0	0	0	140	0	0	5	25	0	62	0	0	202					
5006	0	20	0	20	0	0	0	41	0	125	0	0	30	0	37	0	0	166				
3007	0	0	0	0	0	25	55	69	0	0	0	0	12	0	0	0	41	0	142			
5007	0	0	0	0	0	0	0	0	42	0	0	0	0	42	35	0	0	0	0	57		
2008	0	0	0	52	7	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	
4008	0	0	12	0	0	0	0	0	7	90	0	31	0	0	0	7	0	73	0	0	0	114

Rys. 3. Widok ekranu formularza „Menu"
Fig. 3. Screen of form „Menu"

3.3. Formularz „Naprawy"

Formularz zawiera informacje związane z planem napraw dotyczące zamykanych odcinków. Numer zamknięcia, numer zamykanego odcinka, starty 1 dnia zamknięcia, liczba dni niezbędna do wykonania naprawy, dopuszczalny dzień rozpoczęcia i zakończenia zamknięcia stanowią dane konieczne do przeprowadzenia obliczeń macierzy Z. Widoki ekranów formularzy „Dane" oraz „Naprawy" przedstawiono na rys. 4.



Rys.4. Widoki ekranów formularza „Dane" oraz „Naprawy"
Fig. 4. Screens of forms: „Dane" and „Naprawy"

4. PODSUMOWANIE

Zagadnienie optymalizacji zamknięć w gęstych sieciach drogowych wymaga oceny związków ruchowych pomiędzy poszczególnymi jej elementami. Koordynacja zamknięć musi być poprzedzona oceną strat ruchowych spowodowanych zamknięciem oraz określeniem wielkości ruchu przeniesionego.

Związki ruchowe pomiędzy określonymi odcinkami w sieci opisuje macierz Z, której elementy stanowią wspólne obciążenie dwóch odcinków. Wyznaczenie macierzy Z dla ruchu drogowego wymaga zupełnie innego podejścia niż dla ruchu kolejowego ze względu na jego niedeterministyczny charakter.

W artykule opracowano metodę wyznaczania macierzy Z na podstawie wielkości potoków na określonych trasach oraz związkach pomiędzy odcinkami sąsiednimi. Założeniem metody są stałe udziały procentowe potoków cząstkowych na poszczególnych odcinkach międzywęzłowych. Uzyskana w ten sposób macierz związków jest daną wejściową procesu koordynacji zamknięć, ponieważ zamknięcia o silnych związkach ruchowych opłaca się planować jednocześnie ze względu na pokrywające się wspólne straty ruchowe.

W Zakładzie Inżynierii Ruchu Politechniki Śląskiej opracowano pomocniczą aplikację wyznaczającą macierz Z, której działanie zaprezentowano na przykładzie fragmentu sieci drogowej składającej się z 8 skrzyżowań połączonych ze sobą ulicami dwukierunkowymi. Aplikacja „MATRIX" dostosowana jest do współpracy z bazą danych wykorzystywaną w systemie optymalizacji zamknięć. Program jest stale usprawniany i poddawany weryfikacjom.

Literatura

1. Instrukcja oznakowania robót prowadzonych w pasie drogowym. Monitor Polski, załącznik do nr 24, poz.184 z dnia 18 czerwca 1990.
2. Żochowska R.: Koordynacja zamknięć w gęstych sieciach drogowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport, z. 41, Gliwice 2000.
3. Woch J., Heinrich L., Baron K.: Temat nr 3144/16. Metody i narzędzia informatyczne planowania i organizacji zamknięć torowych - prace naukowo-badawcze i rozwojowe Centralnego Ośrodka Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa, Katowice 1984.
4. Steenbrink P.: Optymalizacja sieci transportowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1978.
5. Korzan B.: Elementy teorii grafów i sieci. Metody i zastosowania. WNT, Warszawa 1978.
6. Stephens R.: Algorytmy i struktury danych. Wydawnictwo Helion, Gliwice 2000.
7. Wagner H. M.: Badania operacyjne. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1980.

Recenzent: Dr hab. Tomasz Ambroziak, Prof. Pol. Warszawskiej

Abstract

Optimisation of closure system in dense road network requires estimation of traffic relation between individual components. Process of closures co-ordination should be preceded by traffic losses estimation for closed sections.

Traffic relations between specified sections in the network are defined as components of matrix Z. The approach of matrix components evaluations for road and rail network differs considerably. The reason is non-deterministic character of road traffic.

Matrix Z is evaluated on the base of flow rate on specified routes and relation between contiguous sections. The method assumption is constant percentage of partial flows on every section. The traffic relation matrix is an input datum in process of closures co-ordination.

Praca wykonana w ramach badań własnych BW 470/RM10-5/2002.