ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: TRANSPORT z.48 Nr kol.1604

Renata ŻOCHOWSKA

ALGORYTM KOORDYNACJI ZAMKNIĘĆ DROGOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono model matematyczny optymalnego rozmieszczenia zamknięć drogowych w sieci ulic. Algorytm koordynacji oparto na analizie związków ruchowych pomiędzy poszczególnymi odcinkami. Dla usprawnienia obliczeń opracowano aplikację komputerową, która stanowi główny element systemu optymalizacji zamknięć drogowych.

ROAD CLOSURES CO-ORDINATION ALGORITHM

Summary. The mathematical model of optimal closures schedule at road network has been presented in the article. The co-ordination algorithm has been based on traffic relations between particular road sections. To make the calculation more efficient the software application has been designed. The application is an essential component of road closure optimisation system.

1. WPROWADZENIE

Dynamicznie narastająca dysproporcja pomiędzy przepustowością układu drogowego a wzrastającym natężeniem ruchu jest przyczyną ograniczenia dostępności transportowej. Prace drogowe oraz zamknięcia z nimi związane stanowią dodatkowy czynnik powodujący wzrost zakłóceń w ruchu drogowym. Z tego względu koordynacja zamknięć jednoczesnych pod względem globalnych opóźnień jest integralnym i najważniejszym etapem w procesie optymalizacyjnym zamknięć drogowych.

W latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia w Śląskiej DOKP opracowano specyficzne narzędzia informatyczne służące do optymalnego rozkładania potoków ruchu oraz organizacji zamknięć torowych [1, 2]. Problem optymalizacji zamknięć drogowych można sformułować w sposób analogiczny do zagadnień kolejowych. W ruchu drogowym nie można mówić jednak o stratach ruchowych ani o ruchu straconym. Dlatego optymalne rozmieszczenie zamknięć drogowych określono w oparciu o analizę opóźnień wywołanych przez te zamknięcia.

Optymalne rozmieszczenie zamknięć w sieci polega na opracowaniu takiego układu jednoczesnych zamknięć, aby z uwagi na związki ruchowe między odcinkami globalne opóźnienia spowodowane przeniesieniem ruchu z odcinka zamykanego na drogę okrężną pokrywały się w maksymalnym stopniu.

2. MODEL MATEMATYCZNY KOORDYNACJI ZAMKNIĘĆ DROGOWYCH

Kryterium optymalizacji rozmieszczenia zamknięć w sieci ulic jest minimalizacja oczekiwanych opóźnień. Przy pewnych założeniach minimalizacja ta równoważna jest maksymalizacji wspólnych opóźnień dla robót jednoczesnych. Podstawowym zadaniem jest umiejętne wykorzystanie odciążenia ulic na wykonanie robót oraz unikanie zamknięć jednoczesnych na ulicach dociążonych.

Problem optymalizacji zamknięć ulic sformułowany został przez analogię do zagadnień kolejowych [1] w oparciu o dwie macierze:

- macierz związków ruchowych $\boldsymbol{Z}$,
- macierz rozmieszczeń $\boldsymbol{X}$.

Element macierzy $\boldsymbol{Z} = (z_{ij})$ wyraża wielkość wspólnego obciążenia drogi i oraz drogi j. Iloraz $\frac{z_{ij}}{z_{ii}}$ może być traktowany jako prawdopodobieństwo zdarzenia, że losowo wybrany pojazd z obciążenia drogi i będzie również pojazdem obciążającym drogę j. Jeżeli przez d_i określimy opóźnienie wywołane przez zamknięcia drogi i, to wyrażenie $\frac{z_{ij}}{z_{ii}} d_i$ można zinterpretować jako wartość oczekiwanego opóźnienia pojazdu na drodze i, który przejeżdża również przez drogę j.

Element macierzy $\boldsymbol{X}$: x_i^t oznacza zmienną decyzyjną określającą i-te zamknięcie ustalonej drogi w t-tym dniu okresu planowania. Zmienna ta przyjmuje dwie wartości:

0 – jako niewystępowanie zamknięcia,

1 – występowanie i-tej naprawy w t-tym dniu okresu planowania.

Liczbę napraw oznaczono przez n ($i = 1, 2, ..., n$), a długość okresu planowania wyraża liczba dni T ($t = 1, 2, ..., T$). Na zmienne decyzyjne x_i^t narzucone są analogicznie jak w ruchu kolejowym [3] cztery rodzaje ograniczeń:

1. Ograniczenia ciągłości robót

$$\sum_{t=1}^{t_i-1} x_i^t = 0, \qquad \sum_{t=t_i}^{t_i-1+ld_i} x_i^t = ld_i, \qquad \sum_{t=t_i+ld_i}^{T} x_i^t = 0 \tag{1}$$

gdzie:

ld_i - liczba dni zamknięcia drogi i, ($ld_i > 0$),

t_i - numer dnia rozpoczęcia roboty i.

2. Ograniczenia kolejności robót

$$x_i^t = 1 \wedge x_i^{t+1} = 0 \Rightarrow x_j^t = 0 \wedge x_j^t = 1 \tag{2}$$

3. Ograniczenia jednoczesności robót

$$\sum_{i \in M_k} x_i^t \le 1 \tag{3}$$

gdzie:

M_k - zbiór robót wyłączających się, $M_k \subset (1, n)$.

4. Warunki jednoczesności robót

Dla każdej pary zamknięć $(i, j) \in N_k$ zachodzi:

$$x_i^t = x_j^t \tag{4}$$

gdzie:

N_k - zbiór robót przeprowadzanych w tym samym terminie, $N_k \subset (1, n)$.

Przy założeniu że obciążenie zamykanych odcinków zostaje przeniesione na drogi objazdowe, można wyznaczyć minimalne oczekiwane opóźnienie jako:

$$D = \sum_{t=1}^{T} \left(\sum_{i=1}^{n} d_i x_i^t - \sum_{(i,j)\in P} x_i^t x_j^t \max\left(\frac{z_{ij}}{z_{ii}} d_i, \frac{z_{ji}}{z_{jj}} d_j \right) \right) \tag{5}$$

gdzie:

d_i – opóźnienie spowodowane wykonywaniem i-tej roboty w czasie godziny szczytowej,

P – zbiór uporządkowanych par wskaźników dróg przeciążonych (i, j) podczas wykonywania i-tej roboty, $i < j$ oraz $d_i > 0$ i $d_j > 0$,

z_{ij} – element macierzy związków ruchowych $\boldsymbol{Z}$.

Wprowadzając pojęcie wskaźnika efektywności koordynacji zamknięć K równego [1, 3, 4, 5, 6]:

$$K = \sum_{t=1}^{T} \sum_{(i,j)\in P} x_i^t x_j^t \max\left(\frac{z_{ij}}{z_{ii}} d_i, \frac{z_{ji}}{z_{jj}} d_j \right) \tag{6}$$

problem optymalizacyjny równoważny jest maksymalizacji wspólnych opóźnień dla robót jednoczesnych:

$$\min D \Leftrightarrow \max K \tag{7}$$

Wielkość wskaźnika koordynacji K określa maksymalne oczekiwane opóźnienie wynikające z przeniesienia na drogi objazdowe wspólnego obciążenia dwóch odcinków.

3. ORYGINALNY ALGORYTM KOORDYNACJI ZAMKNIĘĆ W SIECIACH DROGOWYCH

W początkowej fazie badań algorytm opracowany dla ruchu kolejowego został zmodyfikowany w sposób przedstawiony w artykule [4]. W późniejszym okresie ulegał on stale przekształceniom i poprawkom uwzględniającym specyfikę ruchu drogowego. Aktualna wersja w zasadniczy sposób różni się od pierwowzoru.

Przed przystąpieniem do opisu działania nowego oryginalnego algorytmu koordynacji zamknięć drogowych należy wyjaśnić pojęcia, parametry i wielkości wprowadzone dla uzyskania większej sprawności obliczeń.

3.1. Parametry pomocnicze

Oprócz macierzy związków ruchowych $\boldsymbol{Z}$ oraz macierzy rozmieszczeń $\boldsymbol{X}$, algorytm wykorzystuje nowe zmienne, spośród których najważniejsze to:

- macierz zamknięć $\boldsymbol{C}$,

- macierze $\boldsymbol{Dn}$ oraz $\boldsymbol{K_0}$,
- macierz łańcuchów $\boldsymbol{L}$,
- wektory $\boldsymbol{L_{wl}}$ oraz $\boldsymbol{L_{wlmax}}$,
- parametr K_{0max},
- macierze $\boldsymbol{P}$ oraz $\boldsymbol{P_{max}}$.

Macierz zamknięć $\boldsymbol{C}$ jest macierzą prostokątną zawierającą parametry wszystkich planowanych zamknięć (numer zamknięcia, pozycja zamykanej drogi w macierzy $\boldsymbol{Z}$, globalne opóźnienia w czasie 1 dnia zamknięcia, planowana liczba dni zamknięcia, dopuszczalny początek i koniec rozpoczęcia zamknięcia).

Macierz $\boldsymbol{Dn}$ określa maksymalną liczbę dni wspólnych dla pary zamykanych dróg (i, j) na podstawie macierzy $\boldsymbol{C}$.

Macierz $\boldsymbol{K_0}$ określa koszty cząstkowe wynikające z zamknięcia pary dróg na podstawie analizy wspólnego ich obciążenia wg wzoru:

$$k_{0_{ij}} = \max\left(\frac{z_{ij}}{z_{ii}} \cdot d_i, \frac{z_{ij}}{z_{jj}} \cdot d_j\right) \tag{8}$$

gdzie:
d_i, d_j - globalne opóźnienia spowodowane wprowadzeniem i-tego oraz j-tego zamknięcia.

Macierz łańcuchów $\boldsymbol{L}$ zawiera łańcuchy zamknięć związanych ruchowo z zamknięciem odpowiadającym numerowi wiersza. W każdym wierszu numery zamknięć zależnych uporządkowane są według malejącego iloczynu: $k_{0_{ij}} \cdot dn_{ij}$.

Po każdorazowym wyborze zamknięcia o maksymalnych globalnych opóźnieniach oznaczonego jako j_{max}, tworzony jest dla niego *wektor* $\boldsymbol{L_{wlmax}}$, zawierający numery zamknięć o silnych związkach ruchowych z analizowanym zamknięciem j_{max}. Następnie na podstawie algorytmu koordynacji zamknięć do wektora dodawane są kolejne numery dróg, których wspólne zamknięcie spowoduje maksymalne korzyści.

Dodanie kolejnego zamknięcia poprzedzone jest analizą, przy której wykorzystuje się *wektor pomocniczy* $\boldsymbol{L_{wl}}$. Dopiero zwiększenie dotychczasowej wartości parametru kosztów K_{0max} powoduje przyjęcie analizowanego zamknięcia do wektora $\boldsymbol{L_{wlmax}}$. W ten sposób liczba zamknięć jednoczesnych (oraz ich odpowiednie ustawienie) odpowiada największej aktualnej wartości K_{0max}.

Elementy wektora $\boldsymbol{L_{wlmax}}$ uporządkowane są w kolejności wstawiania do łańcucha, co zapewnia ich optymalne ustawienie ze względu na zwiększenie kosztów wyrażone parametrem K_{0max}. Ograniczeniem rozmiaru wektorów: $\boldsymbol{L_{wlmax}}$ oraz $\boldsymbol{L_{wl}}$ jest liczba zamknięć n. W granicznym przypadku może się zdarzyć, że po analizie kosztów w jednym łańcuchu $\boldsymbol{L_{wlmax}}$ znajdą się wszystkie planowane zamknięcia.

Parametr $\boldsymbol{K_{0max}}$ określa aktualnie największe koszty odpowiadające ustawieniu łańcucha $\boldsymbol{L_{wlmax}}$. Wartość parametru rośnie przy każdorazowym przyjęciu nowego zamknięcia do wektora $\boldsymbol{L_{wlmax}}$ i jest wyznaczana jako suma kosztów cząstkowych $k_{0_{ij}}$ dla każdej pary zamknięć (i, j) należących do łańcucha $\boldsymbol{L_{wlmax}}$:

$$K_{0max} = \sum_{(i,\, j) \in L_{wlmax}} k_{0_{ij}} \cdot dn_{ij} \tag{9}$$

Macierz $\boldsymbol{P_{max}}$ zachowuje zapis aktualnie optymalnego ustawienia przedziałów występowania poszczególnych zamknięć. Dla tych ustawień wskaźnik koordynacji przyjmuje wartość K_{0max}. Może się ona zmieniać w kolejnych krokach algorytmu. W trakcie analizy wykorzystywany jest wektor pomocniczy $\boldsymbol{P}$ zawierający tymczasowe granice przedziałów występowania zamknięć.

3.2. Opis działania algorytmu koordynacji zamknięć drogowych

Działanie algorytmu koordynacji polega na wyznaczeniu optymalnego ustawienia planowanych zamknięć w oparciu o dane wejściowe (macierz związków ruchowych $\boldsymbol{Z}$ oraz macierz zamknięć $\boldsymbol{C}$) i zapisaniu ich w macierzy rozmieszczeń $\boldsymbol{X}$. Kryterium optymalizacji jest maksymalizacja wskaźnika efektywności koordynacji zamknięć K wyrażonego wzorem (6). Schemat algorytmu przedstawiono na rys.1.

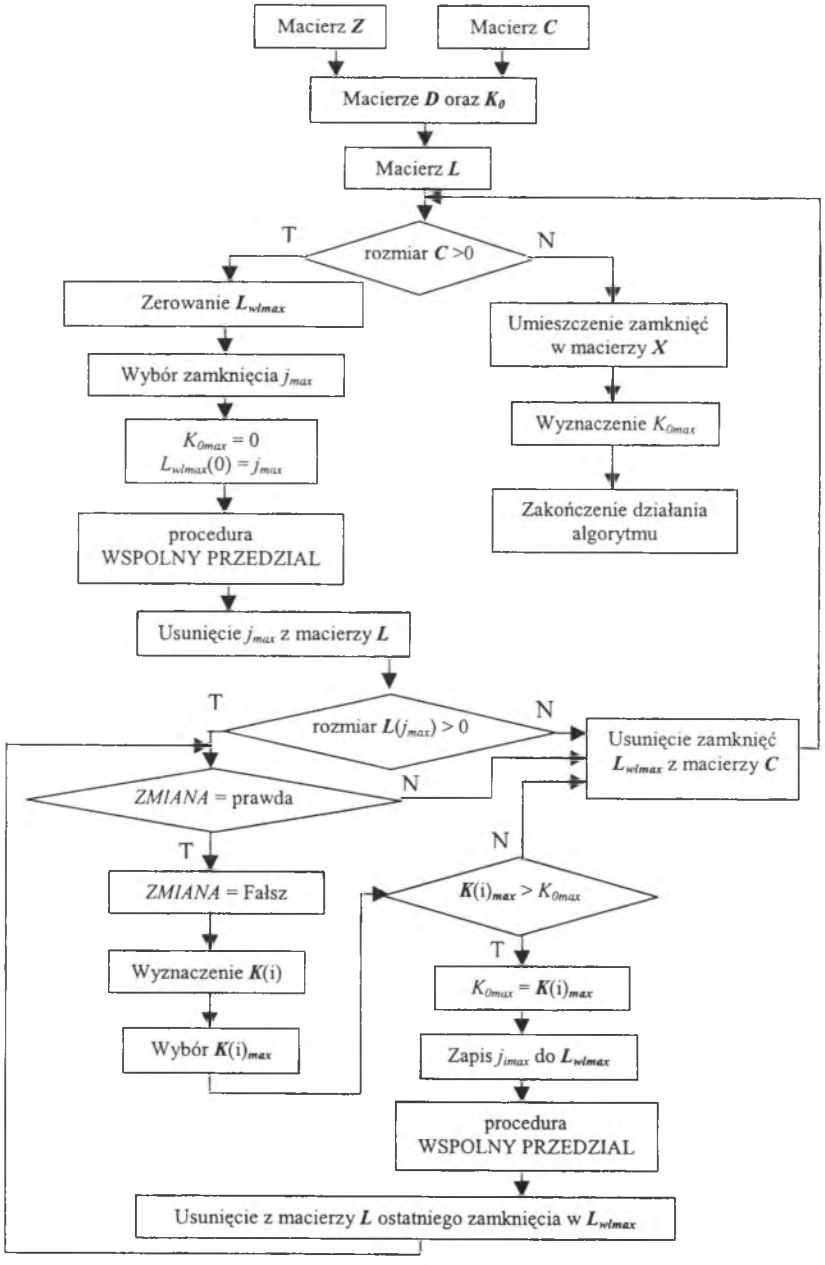
W algorytmie wykorzystano procedurę WSPOLNY PRZEDZIAL, która ustala najkorzystniejsze położenie przedziałów występowania zamknięć z wektora $\boldsymbol{L_{wl}}$, tzn. takie, dla którego wartość parametru K_{0max} jest największa. Procedura WSPOLNY PRZEDZIAL wywoływana jest w przypadku, gdy liczba elementów wektora $\boldsymbol{L_{wlmax}}$ jest większa niż 1. Daną wejściową jest wektor $\boldsymbol{L_{wlmax}}$, natomiast wyjściową – tymczasowa macierz $\boldsymbol{P}$, zawierająca aktualnie optymalne ustawienia przedziałów występowania zamknięć w planowanym okresie czasu.

Zmienną pomocniczą stanowi parametr typu logicznego *ZMIANA*, który służy do sprawdzenia, czy w poprzednim kroku nastąpiła zmiana kosztów maksymalnych K_{0max}. Parametr ten po wyborze zamknięcia o maksymalnych stratach ustawiony jest w pozycji „prawda".

Algorytm koordynacji zamknięć drogowych ma charakter iteracyjny. Po wprowadzeniu danych i wyznaczeniu niezbędnych parametrów wejściowych (macierze $\boldsymbol{Dn}$, $\boldsymbol{K_0}$, $\boldsymbol{L}$) oraz wyborze z macierzy $\boldsymbol{C}$ zamknięcia, które wywołuje największe opóźnienie - j_{max}, następuje dynamiczny proces tworzenia wektora $\boldsymbol{L_{wlmax}}$. Każdorazowe przyjęcie nowego zamknięcia do $\boldsymbol{L_{wlmax}}$ poprzedzone jest szczegółową analizą różnych wariantów.

Podczas analizy dla każdego i-tego elementu wektora $\boldsymbol{L_{wlmax}}$ obliczane są koszty $k(i)$ wprowadzenia do $\boldsymbol{L_{wlmax}}$ zamknięcia najsilniej związanego ruchowo z i-tym elementem, wyznaczanego na podstawie macierzy $\boldsymbol{L}$. Wybór optymalnego wariantu oparto na maksymalizacji wskaźnika K. Iteracja zostaje przerwana w przypadku, gdy podczas analizy każdego i-tego elementu wektora $\boldsymbol{L_{wlmax}}$ nie znaleziono zamknięcia, którego włączenie do wektora $\boldsymbol{L_{wlmax}}$ spowodowałoby wzrost kosztów $k(i)$ lub w przypadku przeanalizowania wszystkich dopuszczalnych zamknięć z macierzy $\boldsymbol{L}$ związanych ruchowo z elementami wektora $\boldsymbol{L_{wlmax}}$.

Powyższa analiza stanowi zasadniczą różnicę pomiędzy oryginalnym algorytmem opracowanym dla sieci drogowej a algorytmem kolejowym [1, 3].



Rys. 1. Schemat blokowy oryginalnego algorytmu koordynacji zamknięć drogowych
Fig. 1. The scheme of the original road closure co-ordination algorithm

4. NARZĘDZIA INFORMATYCZNE WSPOMAGAJĄCE KOORDYNACJĘ ZAMKNIĘĆ JEDNOCZESNYCH

W oparciu o przedstawiony na rys.1 algorytm zbudowano aplikację komputerową OZ_KZJ (Optymalizacja Zamknięć – Koordynacja Zamknięć Jednoczesnych), która w szybki sposób rozwiązuje problem planowania zamknięć w czasie. Program OZ_KZJ zawiera następujące formularze podstawowe:

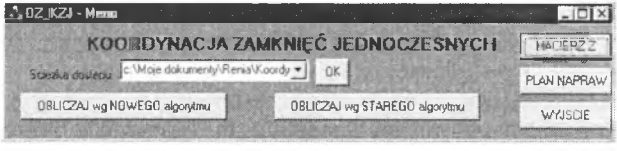
- „Menu",
- „Macierz Z",
- „Naprawy",
- „Macierz X".

Aplikacja umożliwia przeprowadzenie koordynacji zamknięć jednoczesnych w sieci w oparciu o dwa algorytmy:

- „stary" – zaprojektowany dla ruchu kolejowego [1, 3],
- „nowy" – oryginalny opracowany dla ruchu drogowego.

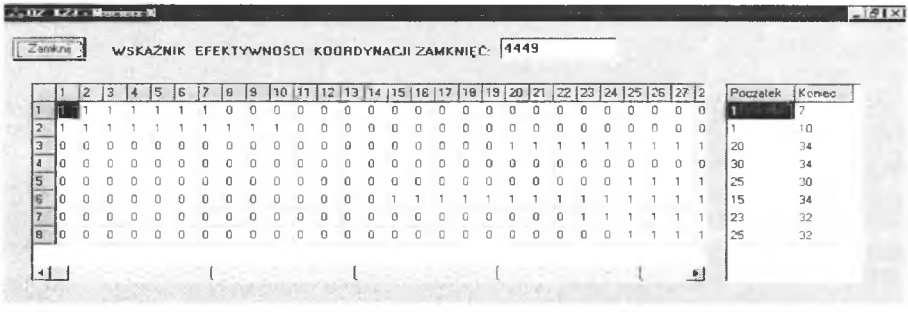
Dzięki temu, że przy niektórych układach zamknięć algorytmy te dają inne wyniki, można wybrać lepsze rozwiązanie na podstawie minimalizacji wskaźnika efektywności koordynacji zamknięć K wyznaczonego ze wzoru (6). Na podstawie doświadczeń i badań stwierdzono, że w ponad 95% obliczeń „nowy" algorytm proponuje lepsze rozwiązanie.

Formularz główny „Menu", który przedstawiono na rys.2, umożliwia zarówno przegląd danych wejściowych: planu napraw oraz macierzy związków ruchowych $\boldsymbol{Z}$, jak i wybór odpowiedniego algorytmu obliczeniowego.



Rys. 2. Widok formularza „Menu"
Fig. 2. The screen of form „Menu"

Formularze: „Naprawy" i „Macierz Z" umożliwiają przegląd i modyfikację danych niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń. Widok formularza „Macierz X" po wyznaczeniu optymalnego układu zamknięć w planowanym okresie czasu „nowego" algorytmu przedstawiono na rys.3.



Rys. 3. Widok formularza „Macierz X" po obliczeniach według „nowego" algorytmu
Fig. 3. The screen of form „Macierz X" after evaluation according to the new algorithm

5. PODSUMOWANIE

W złożonych sieciach drogowych, jakimi są centra większych miast, zamknięcie odcinka drogi często powoduje znaczny wzrost opóźnień doświadczanych przez poszczególnych użytkowników sieci oraz związane z tym koszty podróży. Właściwa koordynacja zamknięć w planowanym okresie czasu może spowodować zmniejszenie tych kosztów dzięki maksymalizacji wspólnych opóźnień dla robót jednoczesnych.

Przedstawiony w artykule algorytm koordynacji opiera się na szczegółowej analizie związków ruchowych występujących pomiędzy poszczególnymi zamknięciami objętymi planem napraw. Iteracyjny charakter algorytmu zapewnia wybór optymalnego rozwiązania, które stanowi jeden z elementów optymalizacji zamknięć ulic w sieciach drogowych.

Dla usprawnienia obliczeń opracowano aplikację komputerową OZ_KZJ, która wykorzystuje zarówno omówiony wyżej algorytm, jak i algorytm opracowany dla sieci kolejowej. Umożliwia to użytkownikowi wybór lepszego wariantu.

Literatura

1. 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.
2. Heinrich L.: System informacyjny WOPR – wyznaczenie optymalnego rozkładu potoków ruchu na sieci Śl. DOKP. Praca COBiRTK, MK 145.09.03, Katowice 1985.
3. Niezgoda G.: Algorytm koordynacji zamknięć torowych na sieci kolejowej. Modelowanie matematyczne w transporcie. Monografia nr 47, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1986.
4. Żochowska R.: Koordynacja zamknięć w gęstych sieciach drogowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport, Zeszyt nr 41, Gliwice 2000.
5. Żochowska R.: Optymalizacja zamknięć w złożonych sieciach drogowych. Materiały konferencyjne I Międzynarodowej konferencji nt. „Transport Systems Telemeatics TST'01". Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Sosnowiec 2001.
6. Żochowska R.: Optymalne rozmieszczenie zamknięć w złożonej sieci drogowej. Materiały konferencyjne IV Konferencji naukowo-technicznej nt. „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego". Wydawnictwo SITK, Poznań 2003.

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

Abstract

In complex road networks user delays and travel costs rise significantly during section closure. The proper closure co-ordination in planning interval may cause decrease these costs through joint delays maximization for simultaneous works.

Co-ordination algorithm presented in the article is based on detailed analysis of traffic relation between individual closures in work plan. Iteration algorithm provides optimal solution choice, that is one of the component closure optimisation in road network.

To make the evaluation more efficient the software application "OZ_D" has been designed. It uses the discussed algorithm as well as the algorithm compiled for rail network. It enables user to choose better variant.

Praca wykonana w ramach badań BW457/RT5/2003