

Renata ŻOCHOWSKA

KOORDYNACJA ZAMKNIĘĆ W GĘSTYCH SIECIACH DROGOWYCH

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono główne problemy dotyczące koordynacji zamknięć w gęstych sieciach transportowych. Model rozmieszczeń zamknięć na sieci utworzono analogicznie do modelu zamknięć torowych. Zaproponowano również nowy, poprawiony algorytm koordynacji zamknięć drogowych.

CO-ORDINATION OF CLOSURES IN DENSE ROAD NETWORKS

Summary. The main problems concern optimization of road closures in dense networks have been presented in this article. The model of placing road closures in network is analogous to the one, which is used in rail transport. The new, improved algorithm of road closures co-ordination has been proposed in this work.

1. WSTĘP

Ruch transportowy jest ruchem samoorganizującym się i w sieciach o małym wykorzystaniu nie wymaga specjalnych narzędzi informatycznych do optymalnego rozkładania potoków ruchu. Jednak gęsta sieć transportowa w centrach miast wymaga takich narzędzi. Są one wykorzystywane w Śląskiej DOKP do organizacji zamknięć torowych [1]. Problem optymalizacji złożonych sieci transportowych został przedstawiony m.in. w pracach [2, 3, 4]. Nabiera on szczególnego znaczenia zwłaszcza w warunkach okresowych przeciążeń czy też okresowych wyłączeń pewnych dróg. Pewne zamknięcia w sieci oplać się planować jednocześnie, inne zamknięcia należy przeprowadzać oddzielnie. Warunki ruchu również powodują ograniczenia zamknięć, co łącznie bardzo komplikuje zagadnienie optymalizacyjne.

2. MODEL ROZMIESZCZEŃ ZAMKNIĘĆ DROGOWYCH

Rozmieszczenie zamknięć na sieci, za którą można uważać szereg połączeń w obrębie centrum miasta, wymaga oceny strat przewidywanego ruchu dla zadanego czasu zamknięcia, a to z kolei wymaga określenia wielkości ruchu przeniesionego i straconego oraz wyznaczenia dróg okrężnych. W sytuacji występowania dużej liczby jednoczesnych zamknięć na sieci, należy skoordynować zamknięcia pod względem strat wielkości ruchu. W wielu przypadkach może się okazać, że zadane zamknięcie nie powoduje strat przewidywanego ruchu, a więc niepotrzebne są zmiany organizacji ruchu, a rozmieszczenie rozważanych zamknięć jest dowolne [5].

Istotą zagadnień rozmieszczenia zamknięć jest wykorzystanie wspólnych strat ruchowych dróg, które wymagają odciążenia w okresach zamknięć drogowych [1]. Należy tu wyodrębnić dwa zagadnienia:

- badanie wspólnych strat ruchowych,
- minimalizacja tych strat dla założonego układu zamknięć drogowych.

Jedne zamknięcia oplaca się planować jednocześnie, a inne niejednocześnie. Zamknięcia, które mają wspólny ruch tracony w okresie zamknięcia, przyciągają się. Natomiast zamknięcia, które mają wspólne drogi okrężne – odpychają się.

Związki ruchowe pomiędzy 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.

Jeżeli iloraz z_{ij} / z_{ii} , tj. stosunek wielkości potoku wspólnego dla dróg i oraz j do wielkości potoku na drodze i , będziemy rozumieć jako prawdopodobieństwo zdarzenia, że losowo wybrany pojazd z obciążenia drogi i będzie również pojazdem obciążającym drogę j , a s_i – jako straty ruchowe dla zamknięcia drogi i (wielkość potoku, o który 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 obciążenia drogi j (oczekiwana wielkość potoku, o który zmniejszy się obciążenie drogi i).

Oznaczmy przez x_i^t zmienną decyzyjną określającą i -tą naprawę ustalonej drogi w t -tym dniu okresu naprawczego. Zmienna ta przyjmuje dwie wartości:

0 – jako brak zamknięcia,

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

Liczbę napraw oznaczamy przez n ($i = 1, 2, \dots, n$), długość okresu naprawczego wyraża liczbą dni T ($t = 1, 2, \dots, T$). Ponieważ zakładamy, że każda naprawa związana jest dokładnie z jedną drogą, indeksacja robót jest zarazem indeksacją odpowiednich dróg. Rozmieszczeniem zamknięć drogowych na sieci nazywa się macierz:

$$X = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \dots & \dots & \dots & x_1^T \\ x_2^1 & x_2^2 & \dots & \dots & \dots & x_2^T \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n^1 & x_n^2 & \dots & \dots & \dots & x_n^T \end{bmatrix}$$

Na zmienne decyzyjne x_i^t narzucone są trzy rodzaje ograniczeń.

1. Ograniczenia ciągłości robót

Ustalane są dla każdej roboty. Jeżeli parametr a_i ($a_i > 0$) jest liczbą dni zamknięcia drogi i , a t_i jest numerem dnia rozpoczęcia naprawy i , to ograniczenia te można formułować następująco:

$$\sum_{t=1}^{t_i-1} x_i^t = 0, \quad \sum_{t=t_i}^{t_i-1+a_i} x_i^t = a_i, \quad \sum_{t=t_i+a_i}^T x_i^t = 0$$

Ograniczenia te muszą być zawsze sformułowane. Zapewniają one z jednej strony, że dana naprawa ustalonej drogi będzie realizowana w kolejnych dniach, a z drugiej strony ograniczenia te określają liczbę dni zamknięcia drogi dla każdej naprawy.

2. Ograniczenia kolejności robót

Określone są dla par robót (i, j) . Można je sformułować następująco:

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

Ograniczenia te są opcjonalne. Powyższy warunek orzeka, że w następnym dniu po zakończeniu zamknięcia i nastąpi zamknięcie j . Tego rodzaju ograniczenia wynikają z potrzeb

racjonalnego wykorzystania potencjału naprawczego. Im więcej takich ograniczeń, tym mniejsze pole decyzyjne rozmieszczenia zamknięć. Przyjmując różne warianty kolejności robót można badać ich wpływ na oczekiwane straty ruchowe.

3. Ograniczenia jednoczesności robót

Określone są dla pewnych układów napraw o indeksach M_k . Można je sformułować następująco:

$$\sum_{i \in M_k} x'_i \leq 1$$

przy czym:

$$M_k \subset (1, n)$$

Ograniczenia te są również opcjonalne. Powyższy warunek orzeka, że z danej grupy robót M_k w dowolnym dniu może być przeprowadzana tylko jedna. Takie ograniczenia mogą wynikać z ograniczeń planu robót, jak również z założeń organizacji ruchu podczas zamknięć. Warunek ten można by nazwać warunkiem odpychania się określonych zamknięć. Koordynacja zamknięć musi być poprzedzona oceną strat ruchowych z powodu zamknięć oraz określeniem wielkości ruchu przeniesionego. Z tego względu z pewną liczbą zamknięć mogą być związane odcinki dróg przejmujące ruch z odcinków zamykanych (drogi objazdowe). Oczywiście jest, że nie można planować jednoczesnych zamknięć na drogach o silnych związkach ruchowych z daną drogą. Przede wszystkim dotyczy to odcinka drogi, do którego należy zamknięcie z dużym przeciążeniem ruchowym (największe związki ruchowe – Z). Ogólnie można stwierdzić, że ograniczenia jednoczesności zamknięć dotyczą odcinków z dodatkowym obciążeniem, czyli odcinków dróg okrężnych lub odcinków zamknięć z dużym przeciążeniem.

Rozmieszczenie zamknięć drogowych X jest dopuszczalne, jeżeli spełnione są warunki ciągłości robót, warunki kolejności robót oraz ograniczenia jednoczesności robót. Rozmieszczenie to jest optymalne, jeżeli jest dopuszczalne oraz oczekiwane straty ruchowe spełniające poniższą zależność są minimalne:

$$S = \sum_{i=1}^r \left(\sum_{i=1}^n s_i x'_i - \sum_{(i,j) \in P} x'_i x'_j \max \left(\frac{z_{ij}}{z_{ii}} s_i, \frac{z_{ji}}{z_{jj}} s_j \right) \right)$$

gdzie:

s_i – ocena dobowego przeciążenia ruchowego podczas wykonywania i-tej roboty (ocena dobowego ruchu, który powinien być zdjęty z drogi), $s_i \geq 0$, $i=1,2,\dots,n$,

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

z_{ij} – element macierzy związków ruchowych Z .

Dla ustalonego planu napraw, tzn. określonej listy n - napraw, a_i – liczby dni zamknięcia dla każdej naprawy oraz s_i – ustalonych wartości przeciążeń ruchowych, wyrażenie:

$$\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^n s_i x'_j$$

jest wielkością stałą. Wobec tego minimalizacja S równoważna jest maksymalizacji pokrywających się (wspólnych) strat ruchowych dla robót jednoczesnych:

Funkcję K nazywamy wskaźnikiem efektywności (jakości) koordynacji robót (zamknięć).

$$K = \sum_{i=1}^T \sum_{(i,j) \in P} x'_i x'_j \max \left(\frac{z_{ij}}{z_{ii}} s_i, \frac{z_{ji}}{z_{jj}} s_j \right)$$

Jeżeli drogi okrężne nie zawierają dróg objętych planem robót, to przenoszenie na nie ruchu z odcinków przeciążonych jest opłacalne, bowiem nie zmienia się wtedy wartość wskaźnika jakości koordynacji zamknięć. Przenoszenie ruchu na drogi okrężne dla tych zamknięć, dla których $s_i > 0$, można przeprowadzić za pomocą dwóch metod: metody ograniczonych przepustowości oraz metody najkrótszego globalnego czasu przemieszczania.

Poprzez przeniesienie ruchu na drogi okrężne (objazdowe) dochodzi się do nowych wartości strat ruchowych $\{s'_i\}$, które różnią się od poprzednich wartości $\{s_i\}$ o wielkości ruchu przeniesionego. Z drugiej strony wszystkie roboty znajdujące się na drogach okrężnych wraz z robotą, z powodu której wyznaczono te drogi, nie powinny przebiegać jednocześnie. Oznacza to wprowadzenie do zadania optymalnej koordynacji warunku z indeksami M_k – robót powiązanych przez drogi okrężne.

Jeżeli nowa wartość wskaźnika jakości koordynacji zamknięć K , otrzymanego z nowymi ocenami strat $\{s'_i\}$ oraz z dodatkowymi ograniczeniami jednoczesności zamknięć, jest mniejsza od poprzedniej wartości K o nie więcej niż różnica:

$$\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^n s_i x'_j - \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^n s'_i x'_j$$

gdzie:

$x_i^{1'}$ – zmienne decyzyjne drugiego zadania optymalnej koordynacji zamknięć,

to przeniesienie ruchu na drogi okrężne poprawia efektywność rozmieszczenia zamknięć. W ten sposób stosując różne warianty organizacji ruchu w okresie zamknięć można uzyskać najefektywniejsze rozmieszczenie zamknięć i odpowiadający mu wariant zmian organizacji ruchu.

3. ALGORYTM KOORDYNACJI ZAMKNIĘĆ

W celu sprawnego przebiegu procesu koordynacji zamknięć opracowano algorytm oparty na założeniu, że zamknięcia o silnych związkach ruchowych (wysokie wartości elementów macierzy związków ruchowych: z_{ij}/z_{ji} oraz z_{ij}/z_{ij}) należy realizować jednocześnie. Ogólny schemat algorytmu przedstawiono na rys.1. Baza danych potrzebna do obliczeń koordynacji powinna zawierać następujące elementy:

- okres planowania zamknięć – T;
- liczbę zamknięć – n;
- czas trwania każdego zamknięcia – a_i ;
- macierz związków ruchowych Z;
- straty dla każdego zamknięcia s_i ;
- ograniczenia kolejności;
- ograniczenia jednoczesności.

Opis algorytmu:

1. Pierwszym etapem jest wyznaczenie dla każdej drogi dopuszczalnego przedziału występowania zamknięcia. Należy to przeprowadzić opierając się na analizie ograniczeń kolejności i jednoczesności. Należy sprawdzić, czy dla każdego zamknięcia spełnione są następujące warunki:

$$t_i^d = d_i^d + 1$$

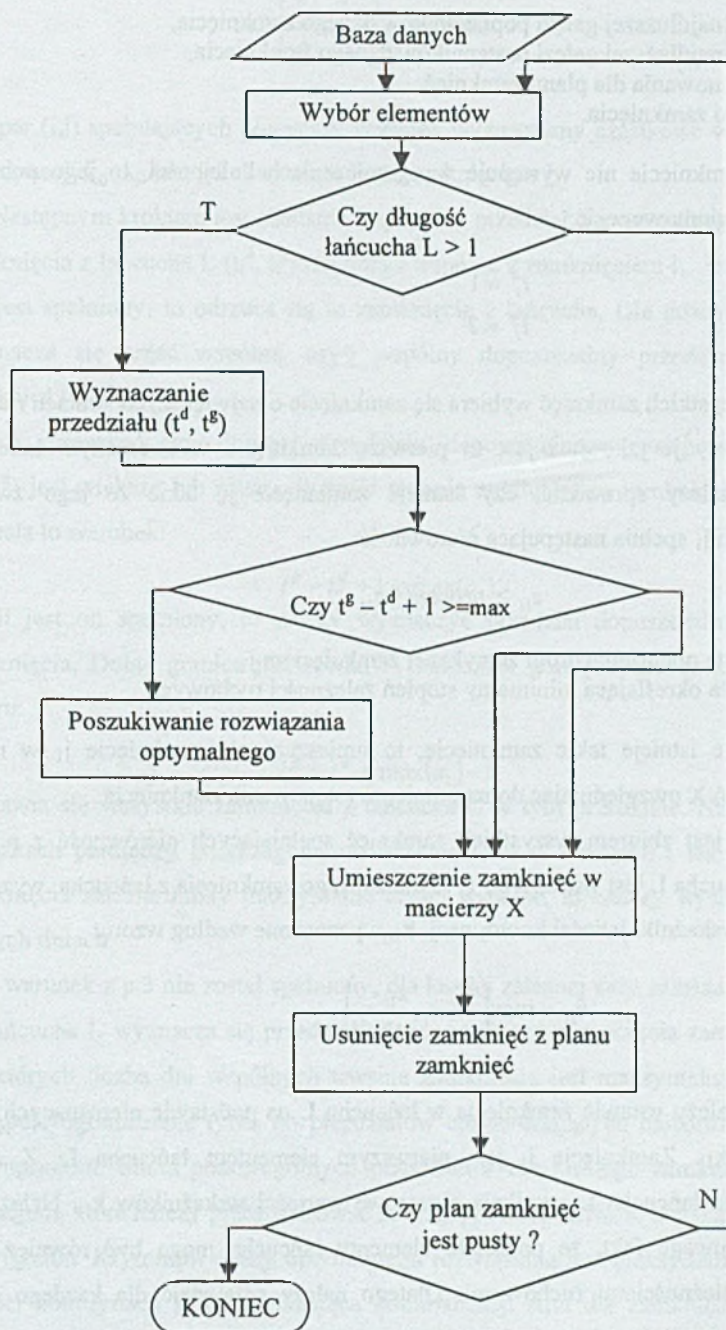
$$t_i^s = T - d_i^s$$

Jeżeli warunki te są spełnione, przedziały występowania zamknięcia pozostają bez zmian.

W przeciwnym przypadku należy zastosować wzory:

$$t_i^d = d_i^d + 1$$

$$t_i^s = T - d_i^s$$



Rys.1. Algorytm koordynacji zamknięć drogowych
Fig.1. Algorithm of road closures co-ordination

gdzie:

d^d – długość najdłuższej gałęzi poprzedników danego zamknięcia,

d^s – długość najdłuższej gałęzi następników danego zamknięcia,

T – okres planowania dla planu zamknięć,

a_i – liczba dni zamknięcia.

Jeżeli zamknięcie nie występuje w ograniczeniach kolejności, to jego początkowe wartości powinny wynosić:

$$t_i^d = 1$$

$$t_i^s = T$$

Spośród wszystkich zamknięć wybiera się zamknięcie o największych stratach ruchowych s_i . Oznaczamy je jako j_1 i jest to pierwsze zamknięcie w tworzonym łańcuchu L . Następnie należy sprawdzić, czy istnieje zamknięcie j_i , takie że jego związek z zamknięciem j_1 spełnia następującą nierówność:

$$z_{i1} \geq \text{procent} * z_{11}$$

gdzie:

z_{11} – całkowite obciążenie drogi zamykanej zamknięciem j_1 ,

procent – stała określająca minimalny stopień zależności ruchowych.

Jeżeli nie istnieje takie zamknięcie, to umieszcza się zamknięcie j_1 w macierzy rozmieszczeń X uwzględniając dolną granicę występowania zamknięcia.

2. Łańcuch L jest zbiorem wszystkich zamknięć spełniających nierówność z p.1. Jeżeli długość łańcucha L jest większa od 1, to dla każdego zamknięcia z łańcucha wyznaczamy cząstkowe wskaźniki jakości koordynacji k_{1i} , wyznaczone według wzoru:

$$k_{1i} = \max \left(\frac{z_{1i}}{z_{11}} s_1, \frac{z_{1i}}{z_{1i}} s_i \right)$$

Następnie należy ustawić zamknięcia w łańcuchu L na podstawie nierosnących wartości wskaźnika k_{1i} . Zamknięcie j_1 jest pierwszym elementem łańcucha L . Z założenia poszukiwania łańcucha L wynikają niezerowe wartości wskaźników k_{1i} . Należy jednak wziąć pod uwagę fakt, że pozostałe elementy łańcucha mogą być również ze sobą związane zależnościami ruchowymi. Dlatego należy sprawdzić dla każdego elementu łańcucha, czy spełniona jest nierówność:

$$\max\left(\frac{z_{ij}}{z_{ii}}, \frac{z_{ij}}{z_{jj}}\right) \geq \text{procent}$$

Dla par (i,j) spełniających powyższy warunek wyznaczamy cząstkowe wskaźniki jakości koordynacji $k_{ij}=k_{ji}$ tak, jak dla związków z zamknięciem j_1 .

Następnym krokiem jest zbadanie, czy każdy przedział dopuszczalnego występowania zamknięcia z łańcucha L (t_i^d, t_i^s) ma części wspólne z zamknięciem j_1 . Jeżeli warunek ten nie jest spełniony, to odrzuca się to zamknięcie z łańcucha. Dla pozostałych zamknięć wyznacza się część wspólną, czyli wspólny dopuszczalny przedział występowania zamknięć (t^d, t^s).

3. Należy sprawdzić, czy długość przedziału dopuszczalnego występowania zamknięcia (t^d, t^s) jest większa lub równa długości trwania najdłuższego zamknięcia z łańcucha L . Określa to warunek:

$$t^s - t^d + 1 \geq \max(a_i)$$

Jeżeli jest on spełniony, to należy wyznaczyć przedział dopuszczalny występowania zamknięcia. Dolna granica jest równa t^d , natomiast górną wyznacza się na podstawie wzoru:

$$t^s = t^d + \max(a_i) - 1$$

i ustawia się wszystkie zamknięcia z łańcucha L w tym przedziale. Należy pamiętać o związkach pomiędzy poszczególnymi zamknięciami w łańcuchu i tak je ustawić, aby zamknięcia zależne miały maksymalne części wspólne, to znaczy występowały w tych samych dniach.

4. Gdy warunek z p.3 nie został spełniony, dla każdej zależnej pary zamknięć (i,j) należącej do łańcucha L wyznacza się przedziały dopuszczalnego rozpoczęcia zamknięcia i oraz j , dla których liczba dni wspólnych trwania zamknięcia jest maksymalna. W ten sposób następuje ograniczenie tylko do przedziałów odpowiadających najbardziej obiecującym rozwiązaniom. Suma poszczególnych przedziałów dla każdego zamknięcia odpowiada sytuacjom, które należy przeanalizować ze względu na możliwość uzyskania optymalnego rozwiązania. Kryterium oceny optymalnego rozwiązania jest maksymalizacja wskaźnika jakości koordynacji K odpowiadająca minimalizacji strat dla zamknięć jednoczesnych. Wskaźnik ten został obliczony dla każdego przypadku ze wzoru:

$$K = \sum_{i=1}^T \sum_{(i,j) \in L} x'_i x'_j k_{ij}$$

gdzie:

(i,j) – para zamknięć zależnych należących do łańcucha L ;

x_i^l, x_j^l – elementy macierzy rozmieszczeń X ;

k_{ij} – cząstkowy wskaźnik jakości koordynacji.

W celu wyznaczenia optymalnego rozwiązania można wykorzystać algorytmy związane z optymalizacją dyskretną przedstawione m.in. w pracach: [6, 7, 8].

5. Umieszcza się otrzymane rozwiązanie optymalne w macierzy rozmieszczenia zamknięć X . Jednocześnie należy wykasować wpisane zamknięcia z planu zamknięć, aby nie brać ich pod uwagę w kolejnych analizach.
6. Jeżeli występuje jeszcze zamknięcie w planie zamknięć, to należy przeprowadzić powyższą analizę od początku. Jeżeli nie, to jest to koniec koordynacji.

4. PODSUMOWANIE

Coraz większy wzrost motoryzacji powoduje zatłoczenie dróg, szczególnie uciążliwe w gęstych sieciach transportowych, jakimi są centra miast. Każde dodatkowe zamknięcie może spowodować gwałtowny wzrost strat czasu, a tym samym kosztów podróży. W związku z tym planowanie zamknięć dróg w celach naprawczych lub modernizacyjnych powinno być oparte na zweryfikowanych metodach optymalizacyjnych. Korzystne jest przeprowadzanie niektórych zamknięć jednocześnie, a innych – niejednocześnie. Dlatego koordynacja zamknięć stanowi jeden ze składników optymalizacji sieci transportowych znacznie zmniejszający ruchowe koszty zamknięć.

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. Woch J.: Kształtowanie płynności ruchu w gęstych sieciach transportowych. Polska Akademia Nauk – Oddział w Katowicach, Komisja Transportu. Wydawnictwo Szumacher, Kielce 1998.
3. Steenbrink P.: Optymalizacja sieci transportowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1978.
4. Deo N.: Teoria grafów i jej zastosowania w technice i informatyce. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1980.
5. Instrukcja oznakowania robót prowadzonych w pasie drogowym. Monitor Polski, załącznik do nru 24, poz.184 z dnia 18 czerwca 1990.
6. Sysło M., Deo N., Kowalik J.: Algorytmy optymalizacji dyskretnej. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.

7. Lis S., Santarek K.: Projektowanie rozmieszczenia stanowisk roboczych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1980.
8. Błażewicz J.: Problemy optymalizacji kombinatorycznej – złożoność obliczeniowa, algorytmy aproksymacyjne. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa – Łódź 1986.

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

Abstract

In the paper the model of placing road closures in dense networks has been presented. Traffic connections between road „i” and road „j” have been described by matrix Z , which component „ z_{ij} ” is common traffic stream of roads: „i” and „j”. Matrix of placing road closures X has been introduced and it describes repair „i” of concrete road in day „t” of planning time (component „ x_i^t ”). Three kinds of limits are applied to matrix X : continuity, sequence and simultaneity. The optimization has been presented as maximization of common traffic loss for simultaneous closures. To this end the factor of co-ordination quality has been introduced.

Some closures are worth planning simultaneously, others are not. The closures, which have common traffic loss in closure time attract one another. However closures with common traffic diversion repel each other. Algorithm of closures co-ordination has been constructed on the basis of this thesis.