

Renata ŻOCHOWSKA

WYZNACZANIE OPÓŹNIEŃ DLA GRUPY ZAMKNIĘĆ JEDNOCZESNYCH W SIECIACH DROGOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono model matematyczny opóźnień dla grupy zamknięć jednoczesnych w sieci ulic. Analiza uwzględnia wybór rozwiązania organizacyjnego dla każdego zamknięcia. Optymalizacja polega na opracowaniu takiego układu robót jednoczesnych, aby różnica pomiędzy sumą globalnych opóźnień wywołanych przez zamknięcia pewnych odcinków w różnych dniach okresu planowania a globalnymi opóźnieniami wynikającymi z jednoczesnego zamknięcia tych odcinków była maksymalna. Przy wyznaczaniu opóźnień można wykorzystać aplikację komputerową OZ_D.

DELAY ESTIMATION FOR GROUP OF SIMULTANEOUS CLOSURES IN ROADNETS

Summary. The mathematical model of delay for group of simultaneous closures in roadnets has been presented in the article. The analysis includes choice of organization variant for each closure. Optimization finds building scheme of simultaneous road works so as to difference between sum of global delays due to closures of sections in separate days and global delays due to simultaneous closures of these sections, would be maximal. The computer application OZ_D may be efficiently used for delay estimation.

1. WPROWADZENIE

Istotą optymalizacji zamknięć w złożonych sieciach drogowych jest minimalizacja opóźnień spowodowanych zamknięciem częściowym lub całkowitym elementu układu drogowego. Pomiędzy poszczególnymi odcinkami drogi występują pewne związki ruchowe. W ruchu drogowym podstawowym zadaniem jest więc jednoczesne planowanie zamknięć na odcinkach dróg, które mają wspólne potoki ruchu.

2. MODEL MATEMATYCZNY

Przy budowie modelu założono, że przed rozpoczęciem zamknięcia system transportowy charakteryzowało rozłożenie równowagi, co oznacza, że każdy kierowca wybierał drogę

optymalną, kierując się własnym kryterium oceny kosztów podróży [2]. Po wprowadzeniu ograniczenia ruchu na pewnym odcinku część kierowców może zmienić swoje drogi na takie, dla których czas podróży jest równy lub większy od czasu podróży przed realizacją zamknięcia. Wiąże się to z dodatkowymi opóźnieniami i spadkiem jakości obsługi doświadczanych przez tych użytkowników drogi.

Przyjmując jako kryterium oceny efektywności globalne opóźnienia w sieci [9], można założyć, że parę zamknięć (i, j) oplaca się realizować w tym samym dniu okresu naprawczego, jeżeli globalne opóźnienie wynikające z jednoczesnego zamknięcia obu odcinków jest mniejsze niż suma globalnych opóźnień wywołanych przez zamknięcie tych odcinków w różnych dniach okresu planowania, co można zapisać jako:

$$d_i + d_j > d_{ij}, \quad (1)$$

gdzie:

- d_i, d_j - dobowe globalne opóźnienie spowodowane przez zamknięcie lub ograniczenie ruchu odpowiednio na i -tym oraz j -tym odcinku w innych dniach okresu planowania,
- d_{ij} - dobowe globalne opóźnienie spowodowane jednoczesnym zamknięciem i -tego oraz j -tego odcinka międzywęzłowego.

Przyjmujemy założenie, że zarówno opóźnienia d_i o raz d_j , jak i opóźnienia d_{ij} zostały wyznaczone przy zastosowaniu optymalnego rozwiązania organizacji ruchu w czasie zamknięcia.

Wprowadzając parametr k_{ij} jako:

$$k_{ij} = d_i + d_j - d_{ij}, \quad [\text{s}] \quad (2)$$

można na podstawie zależności (1) stwierdzić, że jednoczesna realizacja pary zamknięć (i, j) jest korzystna, jeżeli $k_{ij} > 0$. Parametr k_{ij} może być miernikiem efektywności koordynacji zamknięć.

Jeżeli X oznacza macierz zerojedynkową której element $x_i^{(t)}$ jest zmienną decyzyjną określającą występowanie i -tego zamknięcia ustalonego odcinka drogi w t -tym dniu okresu planowania [4, 7], to przy założeniu, że w t -tym dniu planowania występuje tylko para zamknięć (i, j) , czyli:

$$x_i^{(t)} = 1, \quad x_j^{(t)} = 1, \quad \sum_{l=1}^n x_l^{(t)} = 2, \quad (3)$$

współczynnik $k_{ij}^{(t)}$ w t -tym dniu okresu naprawczego można wyznaczyć jako:

$$k_{ij}^{(t)} = x_i^{(t)} \cdot d_i + x_j^{(t)} \cdot d_j - d_{ij} \quad [\text{s}] \quad (4)$$

Uogólniając dla grupy zamknięć $G^{(t)}$ występujących jednocześnie w t -tym dniu o kresu planowania, których liczba wynosi $m^{(t)}$, czyli:

$$x_i^{(t)} = 1 \quad \forall i \in G^{(t)}, \quad \sum_{l=1}^n x_l^{(t)} = m^{(t)}, \quad (5)$$

współczynnik $k_{G^{(t)}}$ dla grupy zamknięć $G^{(t)}$ występujących jednocześnie w t -tym dniu okresu planowania można określić jako:

$$k_{G^{(t)}} = \sum_{i \in G^{(t)}} x_i^{(t)} \cdot d_i - d_{G^{(t)}}, \quad [\text{s}] \quad (6)$$

gdzie $d_{G^{(t)}}$ oznacza dobowe globalne opóźnienie spowodowane przez jednoczesną realizację zamknięć z grupy $G^{(t)}$ w t -tym dniu okresu planowania.

Należy zaznaczyć, że opóźnienie $d_{G^{(t)}}$ nie jest sumą opóźnień d_{ij} , ponieważ zamknięcia z grupy $G^{(t)}$ nie są zbiorem niezależnych ruchowo par (i, j) , ale grupą zamknięć o najsilniejszych wzajemnych związkach ruchowych wybranych na podstawie analizy elementów macierzy Z [5, 10]. Ponieważ dla każdej pary zamknięć (i, j) opóźnienia d_{ij} wyznaczane są dla najkorzystniejszego rozwiązania organizacji ruchu, pewne warianty dla par $(i, j) \in G^{(t)}$ mogłyby się wzajemnie wykluczać, co prowadziłoby do błędnych założeń. Dlatego opóźnienie $d_{G^{(t)}}$ uwzględnia optymalny wariant organizacyjny przy jednoczesnym zamknięciu lub ograniczeniu ruchu na wszystkich odcinkach należących do grupy $G^{(t)}$, a parametr $k_{G^{(t)}}$ jest wskaźnikiem efektywności koordynacji w t -tym dniu okresu naprawczego.

Wartość współczynnika K dla całego okresu planowania wynosi:

$$K = \sum_{t=1}^T k_{G^{(t)}}, \quad [\text{s}] \quad (7)$$

czyli biorąc pod uwagę zależność (6) otrzymujemy:

$$K = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i \in G^{(t)}} x_i^{(t)} \cdot d_i - d_{G^{(t)}} \right) \quad [\text{s}] \quad (8)$$

Ponieważ globalne opóźnienie D w całym okresie naprawczym można wyrazić jako sumę:

$$D = \sum_{t=1}^T d_{G^{(t)}}, \quad [\text{s}] \quad (9)$$

wartość współczynnika K można wyznaczyć ze wzoru:

$$K = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in G^{(t)}} x_i^{(t)} \cdot d_i - D \quad [\text{s}] \quad (10)$$

Rozmieszczenie zamknięć drogowych X jest **optymalne**, jeżeli jest dopuszczalne [3, 4, 6, 7] oraz wartość globalnego opóźnienia D jest minimalna. Ponieważ dla każdego zamknięcia wprowadzanego niezależnie optymalny wariant organizacji ruchu jest z góry ustalony, więc dla określonego okresu planowania wyrażenie:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i \in G^{(t)}} x_i^{(t)} \cdot d_i \quad (11)$$

jest wielkością stałą niezależną od wzajemnego układu zamknięć jednoczesnych.

W związku z tymi rozważaniami można zapisać:

$$\min D \Leftrightarrow \max K \quad (12)$$

W sieciach drogowych minimalizacja globalnych opóźnień w sieci sprowadza się więc do maksymalizacji wskaźnika efektywności koordynacji zamknięć jednoczesnych, który wyraża różnicę pomiędzy sumą globalnych opóźnień wywołanych przez zamknięcia pewnych odcinków w różnych dniach okresu planowania a globalnymi opóźnieniami wynikającymi z jednoczesnego zamknięcia tych odcinków.

3. OPIS WYZNACZANIA OPÓŹNIEŃ DLA GRUPY ZAMKNIĘĆ JEDNOCZESNYCH

Przy wyznaczaniu wskaźnika efektywności koordynacji zamknięć K na podstawie wzoru (10) zachodzi konieczność obliczenia globalnych opóźnień przy jednoczesnym zamknięciu lub ograniczeniu ruchu na odcinkach należących do grupy $G^{(t)}$ w t -tym dniu okresu planowania - $d_{G^{(t)}}$.

Analizę należy przeprowadzić opierając się na algorytmach opracowanych dla poszczególnych rozwiązań organizacyjnych niezależnie, które szczegółowo przedstawiono w artykułach [8, 9]. W zależności od utrudnienia spowodowanego przez wprowadzane zamknięcie lub ograniczanie ruchu na odcinku drogi należy uwzględnić następujące rozwiązania organizacyjne:

- utrzymanie ruchu przy zwężonym odcinku jezdni,
- wprowadzenie jednego lub kilku objazdów,
- wprowadzenie ruchu wahadłowego.

Dla każdego z wariantów wyznaczone są globalne czasy podróży przypadające na godzinę szczytową. Dla r -tego wariantu organizacji ruchu wyznaczone są globalne opóźnienia F_D , jako:

$$F_D = F_{GCP} - F_{GCP_0}, \quad [s] \quad (13)$$

gdzie:

- F_{GCP} - globalny czas podróży po wprowadzeniu r -tego wariantu w czasie godziny szczytowej,
- F_{GCP_0} - globalny czas podróży przed wprowadzeniem ograniczenia ruchu w czasie godziny szczytowej.

Wybrany sposób organizacji ruchu powinien zapewnić odpowiednią przepustowość oraz najmniejsze opóźnienia pojazdów. Rozwiązanie o minimalnych globalnych opóźnieniach oznaczone jako F_D^* :

$$F_D^* = \min_r F_D, \quad [s] \quad (14)$$

gdzie:

- r - numer analizowanego wariantu organizacji ruchu,
- F_D - globalne opóźnienie dla r -tego wariantu organizacyjnego w godzinie szczytowej

staje się tymczasowym rozwiązaniem optymalnym wykorzystywanym w dalszych obliczeniach i analizach.

Zakładając pewien wskaźnik ruchliwości w godzinie szczytowej k_H , można wyznaczyć dobowe globalne opóźnienie dla wprowadzenia ograniczenia ruchu na i -tym odcinku międzywęzłowym d_i jako:

$$d_i = \frac{F_D^*}{k_H} \quad [s] \quad (15)$$

W przypadku zwężenia odcinka jezdni należy jedynie zmienić jego parametry geometryczno-ruchowe [8, 9]. Przy jednoczesnym zamknięciu kilku odcinków należących do grupy $G^{(t)}$ należy usunąć ze struktury sieci odpowiadające im połączenia i drogi objazdowe projektować dla składowych potoków wszystkich analizowanych odcinków jednocześnie zgodnie z algorytmem przedstawionym w artykule [9]. Algorytm ten posiada blok decyzyjny umożliwiający wybór najlepszego wariantu organizacyjnego.

Pomocnicza macierz R_W powinna zawierać numery węzłów, w których nastąpiła zmiana parametrów ruchowych, wynikająca bądź ze zmiany parametrów geometrycznych bądź z przeniesienia potoków ruchu na drogi objazdowe. Macierz ta uwzględnia efekty zmian organizacji ruchu wynikające z wprowadzenia ograniczeń na wszystkich odcinkach należących do grupy zamknięć jednoczesnych $G^{(t)}$ w t -tym dniu planowania.

Grupy zamknięć jednoczesnych $G^{(t)}$ ustalane są na podstawie macierzy związków ruchowych Z [5, 10], której element z_{ij} wyraża wielkość wspólnego obciążenia drogi i oraz drogi j . Na jej podstawie ocenia się, w jakim stopniu zmniejszenie ruchu w okresie zamknięć na jednej drodze może wpłynąć na zmniejszenie ruchu na innych drogach.

Analiza poszczególnych układów grup zamknięć jednoczesnych $G^{(t)}$ w planie zamknięć przeprowadzana jest podczas koordynacji w oparciu o oryginalne algorytmy obliczeniowe [6]. Proces optymalizacyjny polega na wyborze takiego układu zamknięć jednoczesnych, dla którego wartość wskaźnika K określonego wzorem (10) jest maksymalna. Otrzymane rozwiązanie musi również spełniać ograniczenia i warunki nałożone na zmienne decyzyjne [4, 7].

4. NARZĘDZIA INFORMATYCZNE WSPOMAGAJĄCE PROCES OPTYMALIZACYJNY

Do wyznaczania opóźnień dla grup zamknięć jednoczesnych $G^{(t)}$ można wykorzystać aplikację komputerową OZ_D (Optymalizacja Zamknięć – opóźnienie D) [9]. Wprowadzie program umożliwia wyznaczenie globalnych opóźnień tylko dla zamknięcia jednego odcinka, jednak zmieniając odpowiednio strukturę sieci i parametry geometryczno-ruchowe dla każdej grupy $G^{(t)}$ można uzyskać wartości opóźnień dla szukanych układów zamknięć jednoczesnych.

Po wyborze przez użytkownika odpowiedniej konfiguracji potoków skierowanych na drogi objazdowe program wyznacza w oparciu o algorytm najkrótszej ścieżki nowe trasy dla wybranych składowych potoku bez uwzględniania zamykanych odcinków. Użytkownik ma możliwość akceptacji lub zmiany proponowanych ścieżek.

Po zatwierdzeniu nowych ścieżek program wykonuje dalsze obliczenia konieczne do wyznaczenia globalnego czasu podróży w sieci w przypadku przeniesienia części obciążenia na wybrane drogi objazdowe. Widoki formularzy „OZ_D – Zamknięcie” oraz „OZ_D - Drogi objazdowe” po przeprowadzeniu obliczeń przedstawiono na rys.1 i 2.

Rys.1. Formularz „OZ_Zamknięcie” po wyborze opcji ZWĘŻENIE DROGI
 Fig.1. The form „OZ_Zamknięcie” after ZWĘŻENIE DROGI selection

NR	POTOK	ŚCIEŻKA	Q	%
32	19-7	19-2p-20-1w-21-1w-22-1w-23-11-15-2w-7-2w	20	0.02
36	20-7	20-2p-21-1w-22-1w-23-11-15-2w-7-2w	28	0.03
38	23-1	23-3p-15-2w-7-2-5-3w-5-3w-4-3w-3-3w-2-3w-1-3p	236	0.21
39	23-4	23-2w-15-2w-7-2-6-3w-5-3w-4-3p	32	0.03
40	23-7	23-2w-15-2w-7-2w	299	0.27
41	23-9	3p-15-2w-7-2-6-3w-5-3w-4-3-12-4p-11-3w-10-3w-5	15	0.01

Rys.2. Formularz „OZ_Drogi objazdowe” po przeprowadzonych obliczeniach
 Fig.2. The form „OZ_Drogi objazdowe” after evaluations

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 model matematyczny opóźnień dla grupy zamknięć jednoczesnych opiera się na założeniu, że grupę zamknięć opłaca się realizować w tym samym dniu okresu naprawczego, jeżeli globalne opóźnienie wynikające z jednoczesnego

zamknięcia odcinków należących do tej grupy jest mniejsze niż suma globalnych opóźnień wywołanych przez zamknięcie tych odcinków w różnych dniach okresu planowania. Przyjęto również założenie, że zarówno opóźnienia wynikające z zamknięć realizowanych niezależnie d_i , jak i opóźnienia dla grupy zamknięć jednoczesnych $d_{G(t)}$ w t -tym dniu okresu planowania zostały wyznaczone przy zastosowaniu optymalnego rozwiązania organizacji ruchu w czasie zamknięcia.

W celu usprawnienia obliczeń można wykorzystać aplikację komputerową OZ_D, która umożliwi wyznaczenie globalnych opóźnień wynikających z ograniczenia ruchu na odcinku przy zastosowaniu odpowiedniego rozwiązania organizacyjnego.

Literatura

1. Niezgodą G.: Algorytm koordynacji zamknięć torowych na sieci kolejowej. Modelowanie matematyczne w transporcie. Monografia nr 47, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1986.
2. Wardrop J.G.: Some theoretical aspects of road traffic research. Road Paper 36, Proc. Instn. Civ. Engrs, Pt.2, 1, 1952.
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. Żochowska R.: Optymalizacja zamknięć w złożonych sieciach drogowych. Materiały konferencyjne I Międzynarodowej konferencji nt. „Transport Systems Telemeatics TST'01”. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Sosnowiec 2001.
5. Żochowska R.: Wyznaczanie macierzy związków ruchowych w gęstych sieciach drogowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z.44, Gliwice 2002.
6. Żochowska R.: Algorytm koordynacji zamknięć drogowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z.48, Gliwice 2003.
7. 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.
8. Żochowska R.: Organizacja ruchu w czasie zamknięć drogowych. Materiały konferencyjne I Konferencji Naukowo-technicznej nt. „Systemy transportowe. Teoria i praktyka”, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z.47, Gliwice 2003.
9. Żochowska R.: Wyznaczanie opóźnień dla różnych wariantów organizacji ruchu w czasie zajęcia pasa drogowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z.50, Gliwice 2003.
10. Żochowska R.: Wyznaczanie macierzy związków ruchowych w złożonych sieciach drogowych na podstawie znajomości natężeń na odcinkach międzywęzłowych. Materiały konferencyjne II Konferencji Naukowo-technicznej nt. „Systemy transportowe. Teoria i praktyka”, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z.52, Gliwice 2004.

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.

The mathematical model of delay for group of simultaneous closures presented in the article finds that it is worth to realize all closure from the group in the same day, when global delay due to simultaneous closure of all sections from the group is slighter than sum of global delays due to closures of these sections in separate days. It has been made the assumption that both delays due to independent realization of closures d_i and delays for simultaneous closures group $d_{G''}$ have been estimated for optimal organization solution during closure.

To make the evaluation more efficient the software application "OZ_D" has been designed, which enables estimation of global delays due to traffic restraint.

Praca wykonana w ramach badań BW445/RT5/2004.