ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: TRANSPORT z. 47 Nr kol. 1586

Renata ŻOCHOWSKA[1]

ORGANIZACJA RUCHU W CZASIE ZAMKNIĘĆ DRÓG

Streszczenie. W artykule przedstawiono klasyfikację robót drogowych ze względu na rodzaj zajętego elementu sieci ulicznej. W zależności od utrudnień ruchu określono sposoby organizacji ruchu w czasie zamknięcia. Algorytm wyznaczania opóźnień w czasie zamknięcia oparty jest na analizie różnych wariantów organizacji ruchu i wyborze rozwiązania o minimalnych stratach czasu. W artykule omówiono również rozkład potoków ruchu zamykanego odcinka na sieć, który jest podstawą planowania optymalnych tras objazdowych.

TRAFFIC ORGANIZATION DURING ROAD CLOSURE

Summary. The classification of road works with regard to closed roadnet element has been presented in the article. The organization during road closure has been determined depending on impediment to traffic. The algorithm of delay calculation during road closure is based on analysis of different traffic organization variants and solution choice with minimal time loss. The traffic assignment of closing link has been also discussed in the article. It is the basis of optimal diversion planning.

1. WPROWADZENIE

Każda robota wykonywana w obszarze pasa drogowego zwykle prowadzi do utrudnień w prowadzeniu ruchu pojazdów lub pieszych. Właściwa organizacja ruchu w czasie zamknięcia drogi powoduje, że straty czasu ponoszone przez poszczególnych użytkowników są znacznie mniejsze.

Biorąc pod uwagę dopuszczalny poziom strat jakości ruchu, w niektórych przypadkach może się okazać, że zadane zamknięcie nie powoduje strat, w związku z czym niepotrzebne są zmiany organizacji ruchu. Dzieje się tak często, gdy zamykany jest jeden pas ruchu na ulicy o średnim natężeniu. Ruch prowadzony jest wtedy najczęściej metodą wahadłową - w przypadku dwupasowych ulic dwukierunkowych; natomiast dla ulic o liczbie pasów dla każdego kierunku większej niż jeden nie powoduje konieczności zmiany organizacji ruchu. Inaczej dzieje się na drogach o dużym natężeniu ruchu, gdzie wyznaczenie dróg okrężnych jest warunkiem sprawnego funkcjonowania układu drogowego.

W Zakładzie Inżynierii Ruchu Politechniki Śląskiej opracowano algorytm postępowania przy wyznaczaniu opóźnień przy zastosowaniu określonego wariantu organizacji ruchu w czasie zajęcia pasa lub całkowitego zamknięcia drogi. Analiza opóźnień dla różnych rozwiązań organizacyjnych ma zasadniczy wpływ na wybór odpowiedniego wariantu.

[1] Zakład Inżynierii Ruchu, Wydział Transportu, Politechnika Śląska, ul. Krasińskiego 8, 40 – 019 Katowice, tel. 603 41 21, mail: renzoc@polsl.katowice.pl.

Podstawą wyznaczenia optymalnych dróg objazdowych jest znajomość rozkładu potoków ruchu zamykanego odcinka drogi na sieć. Jest to również jeden z analizowanych wariantów organizacji ruchu jako przykład sytuacji bez zastosowania jakiegokolwiek rozwiązania organizacyjnego (przykład samoorganizacji ruchu). W oparciu o prace: [1] i [2] do rozłożenia potoków ruchu zamykanego fragmentu sieci zastosowano metodę iteracyjną, uwzględniającą zmiany parametrów przepustowościowych na każdym etapie.

Kryterium wyboru najlepszego rozwiązania organizacyjnego jest minimalizacja opóźnień wyznaczonych dla poszczególnych wariantów.

2. KLASYFIKACJA ROBÓT DROGOWYCH ORAZ ORGANIZACJA RUCHU W CZASIE ICH WYKONYWANIA

Planowe zamknięcie pasa drogowego w celu prowadzenia robót powinno wynikać z projektu technicznego i może nastąpić [3]:

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

Prowadzący roboty powinien wybrać taką technologię i organizację wykonania, która umożliwi bezpieczne prowadzenie ruchu pojazdów i pieszych przy ograniczonej w sposób bezwzględnie konieczny skrajni drogi.

Wykonywane w obszarze pasa drogowego roboty związane zarówno z samą drogą, jak również z urządzeniami i obiektami znajdującymi się na niej lub obok niej powodują niejednokrotnie istotne utrudnienia i zagrożenia dla ruchu. Prowadzący roboty powinien zadbać o to, aby odcinek jezdni wyłączonej z ruchu był jak najkrótszy, a zwężenie jak najmniejsze. Stosowane w czasie robót rozwiązania mają charakter tymczasowy i sprowadzają się do właściwego zabezpieczenia miejsca robót oraz wprowadzenia ewentualnych zmian w istniejącej organizacji ruchu i wyznaczenia objazdów.

Prowadzenie robót drogowych powoduje konieczność zamknięcia elementów układu drogowego. Na podstawie [3] opracowano klasyfikację zamknięć pod względem umiejscowienia robót drogowych oraz sposobów organizacji ruchu w czasie zamknięcia, którą przedstawiono w tablicy 1.

Całkowite zamknięcie drogi dla potrzeb prowadzenia robót może nastąpić tylko wtedy, gdy warunki drogowe lub względy techniczno-technologiczne uniemożliwiają wykonanie robót przy utrzymaniu pojazdów [3]. Jeżeli jest to droga o istotnym znaczeniu komunikacyjnym dla danego obszaru, to jej zamknięcie wymaga zorganizowania objazdu, który w zależności od warunków lokalnych może być prowadzony po drodze zastępczej wybudowanej obok lub trasie objazdowej wyznaczonej sąsiednimi drogami. Należy brać pod uwagę fakt, że geometria i konstrukcja zarówno drogi zastępczej, jak i trasy objazdowej powinna zapewniać możliwość utrzymania przejętego ruchu.

Przy całkowitym zamknięciu drogi i skierowaniu ruchu pojazdów na trasę objazdową należy wcześniej przeprowadzić analizę ekonomiczną możliwych do zastosowania rozwiązań. Budowa tymczasowej drogi objazdowej jest zalecana w przypadku, gdy spełniony jest następujący warunek [3]:

$$K_o < K_s + K_p \tag{1}$$

gdzie:

K_o - koszt budowy tymczasowej drogi objazdowej,
K_s - koszty społeczne spowodowane objazdem po istniejącej sieci drogowej,
K_p - koszt przystosowania tymczasowej drogi objazdowej do nowych warunków ruchu.

Tablica 1

Klasyfikacja zamknięć drogowych

ZAMKNIĘCIE	UTRUDNIENIA RUCHU	SPOSÓB ORGANIZACJI RUCHU
część chodnika	ograniczenie ruchu pieszego	ruch utrzymany na niezajętej części chodnika
cały chodnik	całkowite ograniczenie ruchu pieszego	przeprowadzenie pieszych na drugą stronę ulicy
	zwężenie jezdni	wygrodzenie zaporami drogowymi części jezdni wzdłuż zamkniętego chodnika dla potrzeb pieszych
pobocze	zwężenie jezdni	ruch utrzymany na niezajętej części drogi
część drogi dwukierunkowej	zwężenie jezdni	ruch utrzymany na niezajętej części drogi
		wprowadzenie ruchu wahadłowego
		budowa w rejonie robót poszerzenia jezdni zapewniającego równoczesny przejazd pojazdów w obu kierunkach
		skierowanie jednego z kierunków na trasę objazdową
część drogi jednokierunkowej	zwężenie jezdni	ruch utrzymany na niezajętej części drogi
		ruch prowadzony częściowo po wykonanym poszerzeniu jezdni albo utwardzonym poboczu
		część ruchu (np. ciężarowy lub indywidualny) skierowana na zalecany objazd innymi ulicami
cała droga	całkowite ograniczenie ruchu drogowego	prowadzenie ruchu po wybudowanej obok drodze zastępczej
		skierowanie ruchu na trasę lub trasy objazdowe wyznaczonymi drogami

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [3].

Do obliczenia kosztów społecznych K_S należy zastosować podaną poniżej zależność [3]:

$$K_S = N \times D \times L \times C \tag{2}$$

gdzie:
N – liczba pojazdów/dobę,
D – liczba dób trwania objazdu,
L – długość objazdu w km,
C – cena 10 litrów etyliny 94 x 0,01.

Jeżeli $K_O > K_S + K_P$, to należy wykorzystać jako trasę objazdową istniejącą sieć drogową.

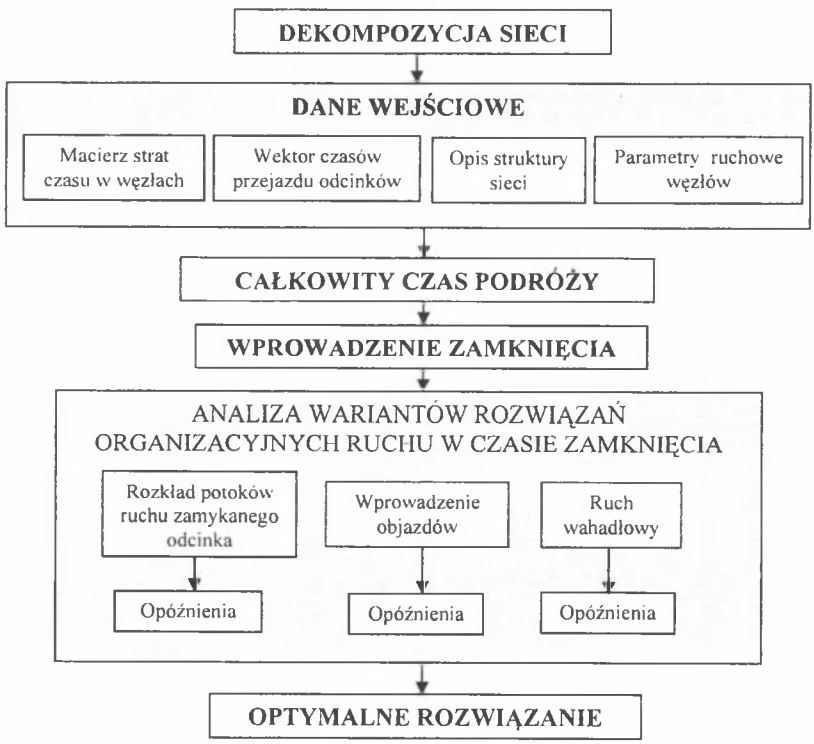
W sytuacji gdy zamykana droga jest drogą z pierwszeństwem przejazdu, należy na drogach prowadzących objazd wprowadzić również pierwszeństwo przejazdu. Jeżeli z uwagi na duże natężenie ruchu prowadzenie objazdu w obu kierunkach tymi samymi drogami jest niemożliwe, należy wyznaczyć oddzielne trasy objazdowe dla każdego kierunku. W celu poprawienia płynności ruchu na drogach prowadzących objazd można na nich ograniczyć postój lub zatrzymywanie się pojazdów, w zależności od potrzeb – po jednej albo po jej obu stronach.

3. WYZNACZANIE OPÓŹNIEŃ W CZASIE ZAMKNIĘCIA

Głównym składnikiem kosztów podróży jest czas podróży, który często staje się czynnikiem decydującym o wyborze danej trasy. Zamknięcie częściowe lub całkowite drogi wynikające z konieczności przeprowadzenia robót drogowych często powoduje zmianę dotychczasowego rozkładu potoków ruchu.

Opóźnienia w okresie zamknięcia wyrażają dodatkowy czas zużyty przez pojedynczy pojazd na przejazd z węzła wyjazdowego do węzła docelowego po wprowadzeniu zamknięcia pewnego fragmentu sieci w stosunku do czasu przejazdu pomiędzy tymi dwoma węzłami w sytuacji, gdy w sieci nie występuje analizowane zamknięcie.

Ponieważ straty czasu są miernikami bezpośrednio odczuwalnymi przez kierowców i na nich opiera się ocena jakości proponowanego projektu, analizując opóźnienia w okresie zamknięcia należy wziąć pod uwagę różne warianty rozwiązań organizacji ruchu w czasie zamknięcia. Algorytm postępowania przy wyznaczaniu opóźnień przedstawiono na rys. 1. poszczególne jego elementy wymagają jednak szczegółowego omówienia.



Rys. 1. Algorytm postępowania przy wyznaczaniu opóźnień w czasie zamknięcia
Fig. 1. Algorithm of closure delay calculation process

Dekompozycja sieci

Ze względu na złożoność problemu, sieć transportową można rozłożyć na kilka mniejszych sieci o możliwych do przyjęcia rozmiarach. Wprawdzie dzisiejsza technika komputerowa osłabiła dążenie do minimalizacji kosztów obliczeń, jednak ze względu na to,

że analizy przepustowości węzłów transportowych mają charakter iteracyjny, w którym niezbędne jest sprawdzenie wielu pośrednich wariantów ruchu i sieci, to nie można lekceważyć możliwości uproszczenia modeli [4].

Dane wejściowe

Danymi wejściowymi niezbędnymi do wyznaczenia czasów podróży pomiędzy poszczególnymi węzłami sieci są:
- macierz $\boldsymbol{S}$ strat czasu na wejściach węzłów sieci,
- wektor czasów przemieszczania dla poszczególnych odcinków sieci,
- parametry geometryczno-ruchowe węzłów i odcinków,
- opis struktury sieci.

Dodatkowymi danymi pomocniczymi są ścieżki pomiędzy określonymi węzłami ustalone wcześniej na podstawie badań.

Całkowity czas podróży

Dla ustalonej struktury sieci drogowej, charakterystyką kolizyjności węzłów jest macierz średnich opóźnień w węźle – $\boldsymbol{W}$, zależna od obciążenia skrzyżowania - $\boldsymbol{Q}$.

Sumę wartości oczekiwanych opóźnień przemieszczania w n węzłach sieci można określić jako:

$$F_S = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{3} q_{ik}^{(j)} \cdot w_{ik}^{(j)} \tag{3}$$

gdzie:

F_S - suma wartości oczekiwanych opóźnień przemieszczania w n potokach i m węzłach,

$q_{ik}^{(j)}$ - natężenie j-tego węzła i-tego wlotu oraz k-tej relacji (1 – lewo, 2 – wprost, 3 – prawo),

$w_{ik}^{(j)}$ - średnie opóźnienie i-tego potoku j-tego węzła oraz k-tej relacji.

Dla węzła podstawowego j wartość oczekiwana czasu przemieszczania jednostki ruchowej $t_{ik}^{(j)}$ na odcinku łączącym poprzedni węzeł podstawowy z wlotem i węzła j korzystającej z relacji kierunkowej k można określić jako:

$$t_{ik}^{(j)} = w_{ik}^{(j)} + t_i^{(j)} \tag{4}$$

gdzie:

$t_i^{(j)}$ - czas przemieszczania na odcinku łączącym poprzedni węzeł podstawowy z i-tym wlotem j-tego węzła.

Czas przemieszczania jednostek ruchowych o natężeniu $q_{ik}^{(j)}$ na odcinku łączącym poprzedni węzeł podstawowy z wlotem i węzła j korzystającej z relacji k wynosi:

$$F_{CP}(q_{ik}^{(j)}) = q_{ik}^{(j)} \cdot t_{ik}^{(j)} \tag{5}$$

Oznaczając przez $L^{(j)}$ zbiór wszystkich relacji kierunkowych węzła j, sumę strat przemieszczania można wyrazić jako:

$$F_{SCP} = \sum_{j=1}^{m} \sum_{(i,k)\in L^{(j)}} q_{ik}^{(j)} \cdot t_{ik}^{(j)} \tag{6}$$

Wprowadzając oznaczenie L jako zbiór relacji kierunkowych pomiędzy węzłami elementarnymi wszystkich węzłów podstawowych *(1 ... m)* analizowanej sieci:

$$L = \sum_{j=1}^{m} L^{(j)} \tag{7}$$

sumę wartości oczekiwanej czasu przemieszczania wszystkich jednostek ruchowych określaną jako **globalny czas przemieszczania** F_{GCP} można wyrazić następująco:

$$F_{GCP} = \sum_{(i,k)\in L} q_{ik} \cdot t_{ik} \tag{8}$$

gdzie:

q_{ik} - natężenie k-tej relacji i-tego wlotu węzła należącego do zbioru L,

t_{ik} - czas przemieszczania jednostki ruchowej korzystającej z relacji k na odcinku łączącym poprzedni węzeł podstawowy z wlotem i węzła należącego do zbioru L.

Korzystając z zależności (5) globalny czas przemieszczania w sieci można zapisać jako:

$$F_{GCP} = \sum_{(i,k)\in L} F_{CP}(q_{ik}) \tag{9}$$

Wprowadzenie zamknięcia

Wprowadzenie zamknięcia powoduje pewne zmiany struktury i parametrów sieci. Na tym etapie należy określić charakter zmian koniecznych do przeprowadzenia robót drogowych oraz warianty rozwiązań organizacyjnych ruchu w czasie zamknięcia. W oparciu o tablicę 1 opracowano schemat zależności sposobów organizacji ruchu w czasie zamknięcia od utrudnień ruchu pojazdów, który przedstawiono na rys.2.

Analiza wariantów rozwiązań organizacyjnych ruchu w czasie zamknięcia

W zależności od utrudnienia spowodowanego przez wprowadzane zamknięcie analiza obejmuje następujące rozwiązania organizacyjne:

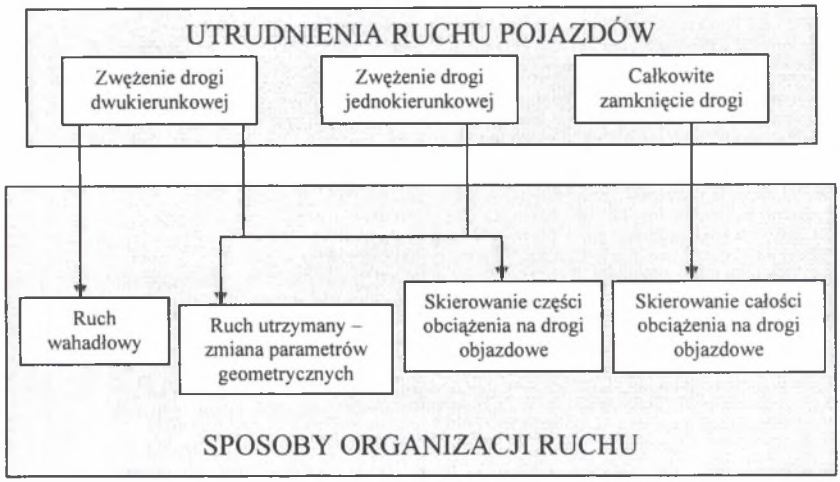
- wprowadzenie objazdów (jednego lub kilku),
- wprowadzenie ruchu wahadłowego.

Jako jeden z wariantów analizowany jest rozkład potoków ruchu zamykanego odcinka. Odpowiada on sytuacji, w której nie podejmuje się żadnych rozwiązań organizacyjnych a podróżni zachowują się zgodnie z drugą zasadą Wardopa.

Dla każdego z wariantów wyznaczane są opóźnienia wyrażone stratami czasu.

Optymalne rozwiązanie

Kryterium oceny najlepszego rozwiązania są straty czasu dla poszczególnych wariantów. Rozwiązanie o minimalnych stratach staje się tymczasowym rozwiązaniem optymalnym wykorzystywanym w dalszych obliczeniach i analizach.



Rys. 2. Schemat zależności sposobów organizacji ruchu od utrudnień ruchu pojazdów
Fig. 2. Scheme of organization depending on impediment to traffic

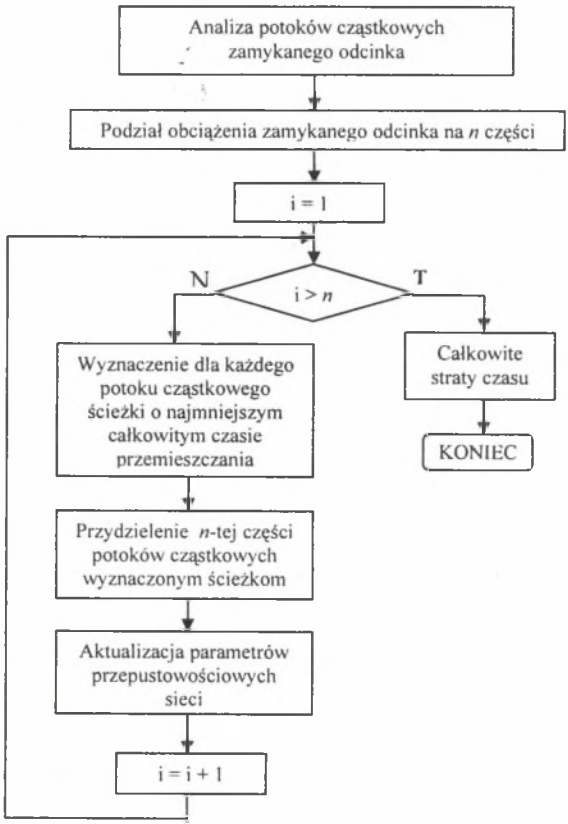
4. ROZKŁAD POTOKÓW RUCHU ZAMYKANEGO ODCINKA NA SIEĆ

Częściowe lub całkowite zamknięcie drogi lub pasa drogowego często powoduje konieczność rozłożenia potoków ruchu zamykanej drogi na pozostałe istniejące w sieci połączenia. Jedną z metod wyznaczania optymalnego rozkładu potoków ruchu jest metoda iteracyjna omówiona w pracach [1], [2], [5]. W Zakładzie Inżynierii Ruchu Politechniki Śląskiej wykorzystano tę metodę do rozłożenia potoków ruchu zamykanego fragmentu sieci drogowej.

Analiza obciążenia zamykanego odcinka pod względem potoków cząstkowych jest pierwszym krokiem w procesie iteracyjnym. Rozpoznanie potoków cząstkowych zostaje dokonane na podstawie znajomości ścieżek pomiędzy poszczególnymi węzłami sieci. Potok na drodze zamykanej zostaje podzielony na mniejsze części i stopniowo rozłożony na sieć. W każdym kroku iteracji wyznacza się drogi o najmniejszym przyroście strat i aktualizuje parametry przepustowościowe modelu. Schemat algorytmu rozkładania potoków ruchu na sieć przedstawiono na rys.3.

Procedury iteracyjne są odbiciem naturalnych procesów kształtowania się rozkładu ruchu. W sieciach transportowych wielkich aglomeracji, w których dokonuje się okresowego zamknięcia intensywnie eksploatowanego odcinka drogi, w krótkim czasie ustala się nowy rozkład ruchu, co świadczy o samoorganizacji tego ruchu [6]. Mechanizmem zmian jest minimalizacja kosztów przemieszczania przez indywidualnych użytkowników (druga zasada Wardropa).

Powyższy schemat postępowania trafnie opisuje sytuację rzeczywistą w przypadku awaryjnego zamknięcia lub dla zamknięć bez ustalanych objazdów. Kierowcy dokonując indywidualnie oceny warunków ruchu przy danym napełnieniu sieci, wybierają optymalną w danym momencie trasę i korzystając z niej przyczyniają się do zwiększenia jej obciążenia. W rezultacie kolejni użytkownicy drogi dokonują oceny warunków ruchu przy zmienionych obciążeniach. Często wybór ich trasy jest nieco inny niż poprzedników.



Rys. 3. Algorytm rozkładania potoków ruchu na sieć
Fig. 3. Algorithm of traffic assignment

5. WPROWADZENIE OBJAZDÓW

Przyjęcie niskiego poziomu dopuszczalnych strat jakości ruchu może powodować konieczność wyznaczenia dróg okrężnych. Drogi te wyznacza się, przyjmując określone kryteria, np. najkrótszy czas, najniższe koszty, najkrótsza droga. Rozwiązanie optymalne jest zwykle rozwiązaniem pośrednim z zachowaniem pewnych proporcji. Konieczność wyznaczania dróg okrężnych w przypadku częściowego lub całkowitego zamknięcia drogi zależy od wielkości strat przepustowości w wyniku zamknięcia. Zakres tych strat jest różny w zależności od typu zamknięcia i jego umiejscowienia w sieci.

W przypadku analizy jednoczesnego rozmieszczenia zamknięć w sieci [7, 8] należy zwrócić uwagę, aby drogi okrężne nie zawierały dróg objętych planem robót w tym samym czasie, ponieważ tylko wtedy przeniesienie na nie ruchu z odcinków przeciążonych jest opłacalne.

Przy zamknięciu określonego odcinka drogi w zależności od wielkości potoków na tym odcinku można wyznaczyć jedną lub kilka dróg objazdowych. Wyznaczanie optymalnych objazdów oparte jest na znajomości optymalnego rozkładu ruchu. Liczba objazdów zależna jest od wielkości udziałów potoków cząstkowych na zamykanym odcinku. W związku ze zmianą obciążenia na drogach objazdowych należy dokonać analizy zmian organizacji ruchu na węzłach przejmujących dodatkowe natężenie.

6. PODSUMOWANIE

Każdorazowe wprowadzenie zamknięcia powoduje zachwianie równowagi w sieci drogowej. Jest to przyczyną wzrostu czasu podróży dla indywidualnych użytkowników. Właściwa organizacja ruchu w czasie prowadzenia robót drogowych zapewnia sprawne działanie układu komunikacyjnego miasta.

Przedstawiony w artykule algorytm wyznaczania opóźnień w czasie zamknięcia oparty jest na analizie różnych dopuszczalnych wariantów rozwiązań organizacyjnych. Kryterium przyjęcia danego wariantu są minimalne straty czasu. Powyższy algorytm daje możliwość ingerencji i decyzji projektantowi, co jest korzystne z tego względu, że w pewnych sytuacjach zalecane jest rozwiązanie pośrednie, tzn. niekoniecznie optymalne pod względem minimalnych strat czasu. Powyższy przypadek może mieć miejsce, gdy np. względy bezpieczeństwa ruchu stanowią priorytet w wyborze wariantu optymalnego.

Wyznaczenie optymalnych objazdów często jest warunkiem sprawnego funkcjonowania sieci drogowej. Podstawą określenia tras objazdowych powinna być analiza rozkładu potoków ruchu zamykanego odcinka na sieć drogową.

Omówione w artykule różne aspekty związane z ograniczeniem ruchu na drogach stanowią istotne elementy systemu optymalizacji zamknięć w złożonych sieciach drogowych opracowywanego w Zakładzie Inżynierii Ruchu Politechniki Śląskiej. System ten oprócz wyboru odpowiedniej organizacji ruchu w czasie zamknięcia, wyznacza optymalne rozmieszczenie robót drogowych w każdym dniu ustalonego okresu planowania na podstawie koordynacji zamknięć jednoczesnych.

Literatura

1. Heinrich L.: Metoda wyznaczania optymalnego rozkładu potoków ruchu w sieci kolejowej. Praca doktorska, Instytut Transportu Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1988.
2. Steenbrink P.: Optymalizacja sieci transportowych. WKiŁ, Warszawa 1978.
3. Instrukcja oznakowania robót prowadzonych w pasie drogowym. Monitor Polski, załącznik do nru 24, poz. 184 z dn. 18 czerwca 1990.
4. Woch J.: Kształtowanie płynności ruchu w gęstych sieciach transportowych. Polska Akademia Nauk – Oddział w Katowicach, Komisja Transportu, Wydawnictwo Szumacher, Kielce 1998.
5. Heinrich L.: Metoda wyznaczania dróg okrężnych na czas zamknięć torowych. Modelowanie matematyczne w transporcie – monografia 47, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1986.
6. Woch J.: Podstawy inżynierii ruchu kolejowego. WKiŁ, Warszawa 1983.

7. Żochowska R.: Koordynacja zamknięć w gęstych sieciach drogowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Transport, Zeszyt nr 41, Gliwice 2000.
8. Żochowska R.: Optymalizacja zamknięć w złożonych sieciach drogowych. Materiały konferencji nt. Telematyka systemów transportowych, Ustroń 2001.

Abstract

Every application of closure is the reason of growth of travel time for individual users. The proper traffic organization during road works provides efficient functioning of urban system. The algorithm of delay calculation during road closure, presented in the article, is based on the analysis of different acceptable organization variants. Minimal time losses are the criterion of acceptance of the solution.

Traffic organization during road works is a temporary solution. It requires proper protection of work zone and application of possible changes in existing traffic organization.

The closure often makes the traffic assignment of closing link into other links in roadnet necessary. Iteration procedures are reflection of formation natural traffic processes. They are the basis of designing the diversions.