

Renata ŻOCHOWSKA

## INFORMATYCZNE NARZĘDZIA WSPOMAGANIA PLANOWANIA ZAMKNIĘĆ DROGOWYCH – PRZEPUSTOWOŚĆ SKRZYŻOWAŃ BEZ SYGNALIZACJI ŚWIETLNEJ

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono budowę programu PRZEPUST obliczającego parametry przepustowościowe skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej. Program został opracowany jako narzędzie pomocnicze w systemie optymalizacji zamknięć drogowych w złożonych sieciach transportowych. W programie wykorzystano znaną metodę opartą na badaniach w warunkach polskich.

## COMPUTING AID IN ROAD CLOSURES PLANNING – PRIORITY-TYPE INTERSECTIONS CAPACITY

**Summary.** The construction of PRZEPUST program has been presented in this article. The program computes priority-type intersections capacity parameters and it has been built as a auxiliary tool in road closures optimization system. The popular method based on traffic research in polish conditions has been used in the program.

### 1. WPROWADZENIE

Prace drogowe prowadzone w miastach powodują okresowe przeciężenia lub wyłączenia pewnych dróg. Taka sytuacja prowadzi do ogromnych strat czasu podróży. Wobec stale rosnącej liczby pojazdów jednym z zasadniczych zagadnień sprawnego funkcjonowania systemu miejskiego staje się planowanie zamknięć drogowych oparte na specyficznych algorytmach optymalizacyjnych. Określenie liczby i czasu pojedynczego zamknięcia drogowego, jak również rozmieszczenie zamknięć na sieci wymagają oceny strat przewidywanego ruchu dla zadanego czasu zamknięcia [1, 2].

Straty czasu, będące efektem zagęszczenia ruchu, stanowią istotny składnik czasu przemieszczania pojazdów i silnie zależą od wielkości i struktury obciążenia. Ponieważ w analizie planowania zamknięć drogowych obciążenie to jest zmienne i zależne od zmian organizacji ruchu podczas zamknięcia, parametry przepustowościowe również powinny stale ulegać aktualizacji. W związku z tym warto sięgnąć po sprawdzone metody wyznaczania przepustowości dla usprawnienia obliczeń prowadzących do optymalizacji rozmieszczenia zamknięć drogowych na sieci.

## 2. PRZEPUSTOWOŚĆ SKRZYŻOWAŃ BEZ SYGNALIZACJI ŚWIETLNEJ

Większość wszystkich węzłów jednopoziomowych w sieci drogowej stanowią skrzyżowania, na których ruch jest regulowany znakami [3]: A7 („Ustąp pierwszeństwa przejazdu”) lub D1 („Droga z pierwszeństwem przejazdu”) oraz B20 („Stop”). Analiza przepustowości takich skrzyżowań sprowadza się do oceny przepustowości relacji podporządkowanych: strumienia pojazdów skręcających z drogi głównej w lewo i wszystkich strumieni z wlotów podporządkowanych.

Zagadnieniom związanym z wyznaczaniem wartości liczbowych przepustowości poświęcono znaczną liczbę prac teoretycznych i eksperymentalnych. Zaowocowało to dużą różnorodnością metod, wśród których można wyróżnić metodę opracowaną na Politechnice Krakowskiej. W oparciu o przeprowadzone w kraju badania ruchu, symulację komputerową ruchu [4] oraz niektóre wyniki badań zagranicznych uzyskano największą zbieżność z warunkami rzeczywistymi, dzięki czemu metoda ta jest zalecana w Polsce [5]. W związku z tym została ona wykorzystana do budowy programu wspomagającego planowanie rozmieszczeń zamknięć drogowych PRZEPUST.

## 3. BUDOWA PROGRAMU POMOCNICZEGO „PRZEPUST”

Ze względu na konieczność wielokrotnego przeliczania parametrów przepustowościowych oraz dostosowania formatu danych wejściowych i wyjściowych do potrzeb relacyjnej bazy danych zbudowano program pomocniczy, który można wykorzystać jako element systemu optymalizującego planowanie zamknięć drogowych. Program zaimplementowany został narzędziami Borland Delphi 4.0. Są to narzędzia typu RAD (Rapid Application Development) umożliwiające szybkie tworzenie aplikacji, wyposażone w jeden z najlepszych kompilatorów optymalizujących kod wynikowy.

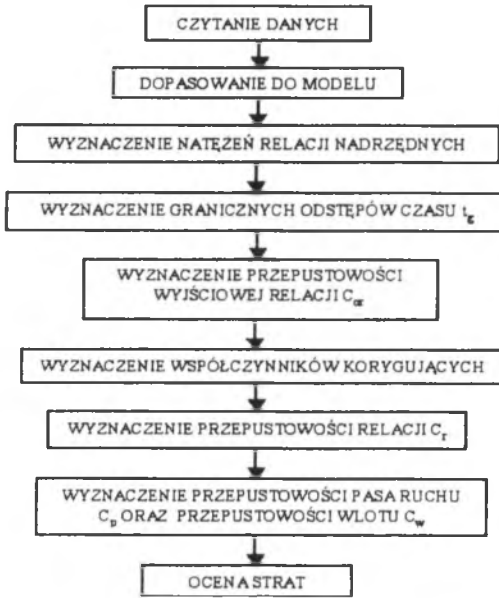
Ogólny schemat metody zastosowanej w programie przedstawiono na rys.1. Poszczególne kroki wymagają dokładniejszego omówienia.

### 3.1. Czytanie danych

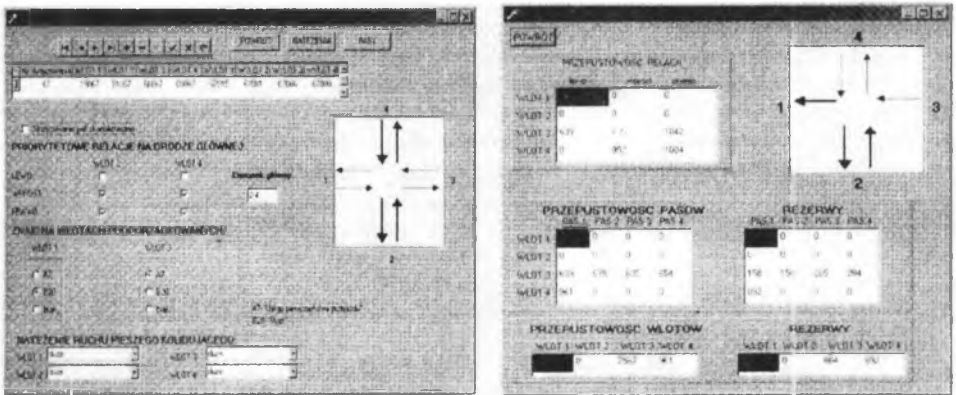
Wprowadzenie danych umożliwia formularz przedstawiony na rys.2. Dla danego skrzyżowania powinny być określone takie parametry, jak: natężenia na poszczególnych wlotach, wloty priorytetowe, szerokość pasów, natężenie ruchu pieszych, znaki drogowe na wlotach podporządkowanych, liczbę pasów na wlotach, dozwolone relacje na poszczególnych pasach, pochylenie wlotu oraz widoczność na wlocie. Program pobiera niezbędne dane i przetwarza je w odpowiedni dla siebie format.

### 3.2. Rozpoznanie i dopasowanie do modelu

W programie uwzględniono dwa modele skrzyżowań z różnymi kierunkami priorytetowymi przedstawione na rys.3.



Rys. 1. Schemat blokowy programu PRZEPUST  
 Fig. 1. Block diagram of PRZEPUST program

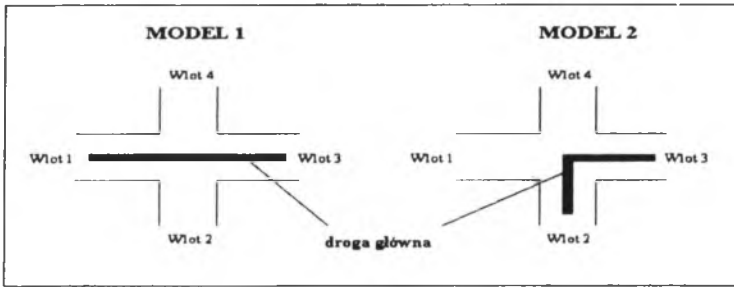


Rys. 2. Widok ekranu wprowadzania danych oraz ekranu z parametrami przepustowościowymi  
 Fig. 2. Screen of data inputing and screen with capacity parameters

Model skrzyżowania zadeklarowany jest w tabelicy danych jako zmienna: „kiergl” (kiernek główny). Każdemu z modeli przyporządkowano stałą macierz „prioryt” określającą hierarchię potoków ruchu według pierwszeństwa przejazdu.

$$\text{prioryt}_{\text{model1}} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\text{prioryt}_{\text{model2}} = \begin{bmatrix} 3 & 3 & 2 \\ 2 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 4 & 4 & 3 \end{bmatrix}$$



Rys. 3. Dwa modele skrzyżowań  
Fig. 3. Two models of intersections

Poszczególne wiersze macierzy oznaczają numer wlotu, natomiast kolumny – relacje: lewo (1), wprost (2), prawo (3). Elementy macierzy określają numer grupy dławienia.

Ponieważ dane zaczerpnięte są z bazy danych z geograficznym układem skrzyżowań, należy tak przestawić odpowiednie elementy tablic, aby doprowadzić do układów przedstawionych na rys.3.

### 3.3. Wyznaczenie natężeń relacji nadrzędnych

Natężenie relacji nadrzędnych ( $Q_n$ ) dla danej relacji podporządkowanej jest sumą natężeń ruchu wszystkich relacji mających pierwszeństwo i równocześnie kolidujących z tą relacją podporządkowaną, lub relacji wyraźnie oddziałujących na reakcje kierujących pojazdami relacji podporządkowanej [3].

Dla każdego z modeli zasada ustalania natężeń relacji nadrzędnych jest inna. Oznaczając:  
 $Q_{nij}$  – natężenie relacji nadrzędnej dla  $i$ -tego wlotu i  $j$ -tego kierunku,  
 $Q_{ij}$  – natężenie na  $i$ -tym wlocie w  $j$ -tym kierunku ( $j=1$  – lewo,  $j=2$  – wprost,  $j=3$  – prawo),  
można sformułować wzory służące do wyznaczania natężeń relacji nadrzędnych, które przedstawiono w tabelcy 1.

Tablica 1

MODEL 1	MODEL 2
$Q_{n11} = Q_{32} + Q_{33}$	$Q_{n22} = Q_{31} + Q_{32} + Q_{33}$
$Q_{n31} = Q_{12} + Q_{13}$	$Q_{n21} = Q_{31} + Q_{32} + 0.5 * Q_{33}$
$Q_{n23} = Q_{12} + 0.5 * Q_{13}$	$Q_{n13} = Q_{31} + 0.5 * Q_{32} + 0.5 * Q_{33}$
$Q_{n43} = Q_{32} + 0.5 * Q_{33}$	$Q_{n12} = Q_{21} + Q_{22} + Q_{23} + Q_{31} + 0.5 * Q_{32} + 0.5 * Q_{33}$
$Q_{n22} = Q_{11} + Q_{12} + 0.5 * Q_{13} + Q_{31} + Q_{32} + Q_{33}$	$Q_{n11} = Q_{21} + Q_{22} + 0.5 * Q_{23} + Q_{32} + Q_{33}$
$Q_{n42} = Q_{11} + Q_{12} + Q_{13} + Q_{31} + Q_{32} + 0.5 * Q_{33}$	$Q_{n43} = Q_{21} + 0.5 * Q_{31} + Q_{32} + 0.5 * Q_{33}$
$Q_{n21} = Q_{11} + Q_{12} + 0.5 * Q_{13} + Q_{31} + Q_{32} + 0.5 * Q_{33} + Q_{42} + Q_{43}$	$Q_{n42} = Q_{11} + Q_{12} + Q_{13} + Q_{21} + Q_{31} + Q_{32} + 0.5 * Q_{33}$
$Q_{n41} = Q_{11} + Q_{12} + 0.5 * Q_{13} + Q_{22} + Q_{23} + Q_{31} + Q_{32} + 0.5 * Q_{33}$	$Q_{n41} = Q_{11} + Q_{12} + 0.5 * Q_{13} + 0.5 * Q_{21} + Q_{22} + Q_{23} + Q_{31} + Q_{32} + 0.5 * Q_{33}$

Do obliczeń natężeń relacji nadrzędnych włączono również niektóre relacje, które pomimo iż nie kolidują bezpośrednio z pojazdami wjeżdżającymi na skrzyżowanie, są uwzględniane przez kierowców ze względu na ograniczone zaufanie do zachowań kierowców pojazdów drogi głównej (np. relacja  $Q_{13}$  w ustalaniu relacji nadrzędnej  $Q_{n23}$ ).

### 3.4. Wyznaczenie granicznych odstępów czasu

W modelach skrzyżowań priorytetowych zakłada się, że kierowca na drodze podporządkowanej zatrzymuje się na znaku, ocenia każdy odstęp między pojazdami drogi głównej i podejmuje decyzję o jego wykorzystaniu. Istotnym parametrem jest **graniczny odstęp czasu relacji podporządkowanej ( $t_g$ )** [3]. Jego wartość zależy od rodzaju manewru, sposobu podporządkowania wlotu, organizacji ruchu oraz prędkości ruchu na drodze głównej.

Standardowo w program wbudowano dwie (dla dwóch modeli) stałe tablice, określające wielkości granicznych odstępów czasu dla poszczególnych relacji podporządkowanych przy założeniu prędkości ruchu na drodze głównej równej 50 km/h oraz znaku „Ustęp pierwszeństwa przejazdu” (A-7). Wiersze tablic odpowiadają wlotom, natomiast kolumny relacjom kierunkowym (analogicznie jak przy tablicach „priority”).

$$t_{K_{model1}} = \begin{bmatrix} 5,0 & 0,0 & 0,0 \\ 6,0 & 5,5 & 5,0 \\ 5,0 & 0,0 & 0,0 \\ 6,0 & 5,5 & 5,0 \end{bmatrix} \quad t_{K_{model2}} = \begin{bmatrix} 5,5 & 5,5 & 5,0 \\ 5,0 & 5,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 6,0 & 6,0 & 5,5 \end{bmatrix}$$

Program odpowiednio koryguje wielkości tablic w przypadkach występowania warunków ruchu odbiegających od typowych rozwiązań [3].

### 3.5. Wyznaczenie przepustowości wyjściowej relacji $C_{or}$

Jako **przepustowość wyjściową relacji  $C_{or}$**  definiuje się maksymalną liczbę samochodów osobowych, przecinających potok nadrzędny w okresie jednej godziny, które wykorzystują wszystkie dostępne odstępy czasu większe od ustalonego odstępu granicznego  $t_g$  [3]. W praktyce oznacza to ciągłe występowanie kolejki pojazdów relacji podporządkowanych.

Na podstawie pomiarów, badań ruchu oraz symulacji komputerowych, przeprowadzonych na Politechnice Krakowskiej, sporządzono wykresy służące do wyznaczania wyjściowej przepustowości relacji. Danymi wyjściowymi są: natężenie relacji nadrzędnych  $Q_n$  oraz graniczny odstęp czasu  $t_g$ .

### 3.6. Wyznaczenie współczynników korygujących

Przepustowość wyjściowa  $C_{or}$  odpowiada idealnym warunkom ruchowym [3]. Aby uzyskać przepustowość rzeczywistą, wprowadzono współczynniki korygujące:

- $f_d$  – uwzględniający wpływ dławienia ruchu na wlocie,
- $f_p$  – uwzględniający wpływ szerokości pasa ruchu, typ wlotu i natężenie ruchu pieszego.

**Dławienie ruchu** to ograniczenie możliwości wykonania manewrów pojazdów z drogi podporządkowanej przez relacje dławiące z drogi głównej i bocznej, których pojazdy, mając pierwszeństwo przejazdu przed pojazdami analizowanych relacji, są równocześnie same podporządkowane innym relacjom z drogi głównej. Do wyznaczenia współczynnika  $f_d$  potrzebny jest **wskaźnik wykorzystania przepustowości relacji dławiącej  $\rho_{rd}$** , określane ze wzoru:

$$\rho_{rd} = \frac{Q_{rd}^k}{C_{rd}}$$

gdzie:

$Q_{rd}^E$  – natężenie relacji dławiącej wyrażone w pojazdach umownych [E],

$C_{rd}$  – przepustowość relacji dławiącej.

Wielkości współczynników korygujących  $f_{rd}$  są również stabilizowane. Dla poszczególnych relacji dławiących „rd” odczytuje się wartości odpowiednich  $f_{rd}$ , których iloczyn jest szukaną wartością współczynnika  $f_d$ :

$$f_d = f_{rd1} * f_{rd2} * \dots * f_{rdb}$$

gdzie:

$n$  – liczba relacji dławiących ( $n \leq 4$ ).

Oznaczając jako  $f_{dij}$  wartość współczynnika korygującego wpływ dławienia na i-tym wlocie dla j-tego kierunku, można określić współczynniki występujące w obu modelach:

- dla modelu 1:

$$f_{d22} = f_{rd11} * f_{rd31}$$

$$f_{d42} = f_{rd11} * f_{rd31}$$

$$f_{d21} = f_{rd11} * f_{rd31} * f_{rd42} * f_{rd43}$$

$$f_{d41} = f_{rd11} * f_{rd31} * f_{rd22} * f_{rd23}$$

- dla modelu 2:

$$f_{d12} = f_{rd21} * f_{rd22}$$

$$f_{d11} = f_{rd21} * f_{rd22}$$

$$f_{d43} = f_{rd21}$$

$$f_{d42} = f_{rd21} * f_{rd12} * f_{rd11} * f_{rd13}$$

$$f_{d41} = f_{rd22} * f_{rd12} * f_{rd11}$$

Wartości współczynnika  $f_p$  wyznacza się zgodnie z zaleceniami autorów metody [3].

### 3.7. Wyznaczenie przepustowości relacji $C_r$

W zagadnieniach optymalizacji zamknięć drogowych najistotniejsza jest przepustowość relacji  $C_r$  w odniesieniu do rzeczywistych warunków geometryczno-ruchowych, którą wyznaczono ze wzoru:

$$C_r = C_{or} * f_d * f_p$$

Przepustowość pasa oraz całego wlotu wyznacza się, korzystając z ogólnie znanych wzorów [3]. W pewnych przypadkach konieczna jest znajomość rozkładu natężeń relacji na poszczególnych pasach wlotu. Jest to o tyle kłopotliwe, że typowe pomiary ruchu drogowego zwykle ograniczają się do określenia liczby pojazdów danej relacji na wlocie jako całości. Algorytm, na podstawie którego zbudowano program PRZEPUST, rozkłada natężenie równomiernie na pasy w zależności od zatłoczenia drogi w sposób iteracyjny aktualizując cząstkowe natężenia po każdym kroku. Taki schemat postępowania trafnie opisuje sytuację rzeczywistą. Kierowcy dokonują oceny warunków ruchu przy danym napełnieniu wlotu, wybierają najmniej zatłoczony pas i ustawiając się na nim przyczyniają się do zwiększenia jego obciążenia. W konsekwencji kolejny kierujący dokonują oceny warunków ruchu przy zmienionych obciążeniach i ich optymalny wybór pasa może być nieco inny niż poprzedników.

Widok ekranu wynikowego, zawierającego parametry przepustowościowe, przedstawiono na rys.2. Dodatkowo na formularzu umieszczono schemat skrzyżowania z zaznaczonym (pogrubionym) kierunkiem głównym ułatwiający orientację w organizacji ruchu.

### 3.8. Problem oszacowania strat

Średnia strata czasu  $d_{sr}$  jest to dodatkowy średni czas zużyty przez pojazd na przejazd przez skrzyżowanie w stosunku do czasu przejazdu podobnego odcinka drogi o identycznej długości bez skrzyżowania [3]. Opisana metoda nie prowadzi bezpośrednio do wyznaczania strat czasu.

Średnią całkowitą stratę czasu przypadającą na pojazd relacji podporządkowanej obliczono według zasad podanych w metodzie HCM [6] korzystając ze wzoru:

$$d_{sr} = \frac{3600}{C_r} + 900t_a \left[ \frac{Q_r}{C_r} - 1 + \sqrt{\left( \frac{Q_r}{C_r} - 1 \right)^2 + \frac{\left( \frac{3600}{C_r} \right) Q_r}{450t_a C_r}} \right]$$

gdzie:

$d_{sr}$  – średnia całkowita strata czasu [s/P],

$C_r$  – przepustowość relacji podporządkowanej [E/h],

$t_a$  – okres analizy [h],

$Q_r$  – natężenie ruchu relacji podporządkowanej.

## 4. PODSUMOWANIE

Ocena przepustowości elementów układu komunikacyjnego umożliwia racjonalne planowanie i usprawnianie ruchu w sieciach drogowych i jest niezbędna w analizie rozmieszczenia zamknięć na sieci w celu przeprowadzenia robót drogowych. Jej celem jest uzyskanie obrazu zdolności transportowych sieci wyrażających się zależnością między natężeniem a warunkami ruchu na poszczególnych drogach i skrzyżowaniach. Przepustowość pojedynczych skrzyżowań ma decydujące znaczenie dla przepustowości sieci i z tego powodu skrzyżowania są krytycznym elementem sieci ulicznej. Występują tu największe zaburzenia ruchu potoków pojazdów.

W wyborze metody wyznaczania przepustowości skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej jako najistotniejsze kryterium określono największą zbieżność z warunkami rzeczywistymi. Metoda opracowana na Politechnice Krakowskiej opiera się na stabilizowanych wartościach parametrów przepustowościowych uzyskanych dzięki zarówno gruntownym badaniom ruchu w kraju i za granicą, jak i symulacjom komputerowym.

Pomimo istnienia wielu narzędzi komputerowych służących do wyznaczania przepustowości skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej zdecydowano się na napisanie nowego programu PRZEPUST ze względu na możliwość jego ciągłej obróbki. Stanowi on pomocne narzędzie w budowanym systemie optymalizującym zamknięcia drogowe. Konieczność stałego uaktualniania parametrów przepustowościowych sieci wymaga zastosowania odpowiednich narzędzi umożliwiających bezpośrednie korzystanie z bazy danych. Program PRZEPUST dostosowany jest do współpracy z bazą danych wykorzystywaną w zamknięciach. Praca nad programem ma charakter otwarty. Jest on poddawany ciągłym uzupełnieniom i weryfikacjom.

## 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. Żochowska R.: Koordynacja zamknięć w gęstych sieciach drogowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Transport, Zeszyt nr 41. Gliwice 2000.
3. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu. WKiŁ, Warszawa 1999.
4. Krystek R. i inni: Symulacja ruchu potoków pojazdów - wybrane zagadnienia. WKiŁ, Warszawa 1980.
5. Instrukcja obliczania przepustowości skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej. Politechnika Krakowska – GDDP, Warszawa 1988.
6. Highway Capacity Manual. Transportation Research Board Special Report 209. Washington, D.C. 1994.

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

## Abstract

Estimation of traffic component capacity makes rational planning and traffic improving possible. It is essential in analysis of road closures placing during road works. The capacity of single intersection is of great importance for the network capacity and for this reason intersections are critical component of the road network.

The most essential criterion of selection of method calculating priority-type intersections capacity is similarity to real polish conditions. The method worked out in Cracow uses capacity parameters which have been received on the basis of thorough traffic research conducted abroad and in Poland. It also makes use of computer simulation.

The PRZEPUST program has been built as a helpful tool for the road closures optimization system. The program is adapted for cooperation with the database used in the road closures system. It also enables continuous updating of road network capacity parameters. The work on the program has not been finished. It has been still developing and verifying.

*Praca wykonana w ramach badań własnych BW 429/RM10/2001*