

Anna Żak

## FUNKCJA OPORU DROGI W ZAGADNIENIU NAKŁADANIA RUCNU NA SIEĆ

**Streszczenie.** W niniejszym artykule przedstawia się przegląd metod nakładania ruchu na sieć ze szczególnym uwzględnieniem sposobów obliczania wartości funkcji oporu drogi i porównanie postaci tych funkcji w stosowanych modelach.

### 1. WSTĘP

Nałożenie ruchu na sieć drogową pozwala nam ocenić ją pod względem wymagań funkcjonalnych i ekonomicznych. Proces ten daje obraz sieci istniejącej lub projektowanej w odniesieniu do potrzeb komunikacyjnych. Pozwala nam dokonać analizy sieci drogowej pod względem eksploatacyjnym, sprawdzić, czy proponowany układ drogowy odpowiada przewidywanym podróżom i zapewnieniu dostatecznej przepustowości, bezpieczeństwa i wygody ruchu. Jednym z czynników mających wpływ na kształt nałożenia ruchu jest opór drogi. Wynika on z istniejących lub założonych parametrów dróg i sieci oraz panujących lub zakładanych warunków ruchu. Można go wyrazić przez długość drogi, czas lub koszt podróży po trasie ze źródła "i" do celu "j" lub przez elementy wyrażające wielkość wpływów psychologicznych.

Cel podróży, nastrój i wiek kierowców również oddziałuje na podstawie przyjętego kryterium wyboru drogi i aktualną ocenę oporu drogi.

W niniejszym artykule przedstawia się przegląd metod nakładania ruchu na sieć drogową ze szczególnym uwzględnieniem sposobów obliczania wartości funkcji oporu drogi w stosowanych modelach.

### 2. ELEMENTY PROGNOZOWANIA RUCHU ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM ROZKŁADU RUCNU NA SIEĆ

W prognozowaniu ruchu dąży się do ustalenia przyszłego natężenia ruchu na istniejącej i planowanej sieci drogowej. Schemat prognozowania przewiduje:

- 1) globalne ustalenie wielkości ruchu na podstawie charakterystyki użytkownika terenu oraz warunków socjologiczno-ekonomicznych,
- 2) rozkład przestrzenny ruchu (więźba ruchu),

- 3) podział ruchu na środki transportu,
- 4) nałożenie ruchu na sieć drogową i linie komunikacji zbiorowej.

Wyniki służą do wymiarowania sieci komunikacyjnej dla środków transportu zbiorowego i indywidualnego.

W rozkładzie ruchu na sieć drogową chodzi o znalezienie takiej trasy przejazdu, która by uwzględniała rozliczne czynniki wpływające na wybór trasy. Dawniej stosowane metody postępowania przy nakładaniu ruchu na sieć miały odpowiedzieć na pytanie, jaką część ruchu przejmie w przyszłości planowana trasa drogową. Przede wszystkim w USA zostały opracowane na podstawie badań empirycznych odpowiednie wykresy i wzory, za pomocą których można określić, jaka część danego połączenia na podstawie korzystniejszych relacji czasu, drogi (długości) i komfortu jazdy po nowej drodze w stosunku do starej będzie korzystała w przyszłości z nowej drogi.

Stopniowo zaczęto przechodzić od rozważań dotyczących pojedynczej drogi do analizowania całej sieci drogowej. Na podstawie wielkości relacji ruchowych między źródłami i celami ruchu (tzw. więzby ruchu) można, dokonując nałożenia, określić wielkości ruchu na wszystkich odcinkach i węzłach sieci. Jest to zadanie bardzo pracochłonne i w praktyce (przy większej ilości węzłów) może być wykonane tylko przy użyciu maszyn liczących. Użycie maszyn liczących wymaga przekształcenia sieci drogowej w idealną, opisaną matematycznie sieć, czyli określony model matematyczny sieci rzeczywistej (istniejącej lub planowanej). Opis ten redukuje się ostatecznie do informacji o węzłach, połączeniach z węzła do węzła i pewnej cechy każdego odcinka, która w literaturze matematycznej jest głównie określana jako długość, zaś w inżynierii ruchu jako opór (funkcja oporu). Oprócz długości cechą taką może być czas podróży, komfort, standard obsługi. Wszystkie cztery czynniki uważane są za ważne, długość i czas podróży najczęściej brane są pod uwagę ze względu na łatwość obliczenia w porównaniu z pozostałymi.

### 3. ROZKŁAD RUCHU NA DWIE TRASY

Przy istnieniu tylko dwu dróg łączących źródło "i" z celem "j" procentowego rozłożenia ruchu można dokonać na podstawie krzywych doświadczalnych, wykreślonych w zależności od stosunku długości tras bądź stosunku czasów podróży [1].

Znając najkrótszą ścieżkę i drugą najkrótszą ścieżkę między źródłem i celem ruchu, czy w ogólności dwie trasy między zadanymi węzłami sieci, dla rozdzielenia ruchu możemy posłużyć się zgodnie z [2] zależnością:

$$\frac{F_{ij2}}{F_{ij1}} = a + b \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^\alpha \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^\beta \left( \frac{M_1}{M_2} \right)^\gamma \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^\delta$$

gdzie:

- $F_{ij}$  - wielkość relacji ruchowych,
- 1 - numer czasowo krótszej trasy,
- 2 - numer czasowo dłuższej trasy,
- T - czas podróży między źródłem i celem,
- L - długość trasy między źródłem i celem,
- M - maksymalne obciążenie pasma na pośrednim odcinku trasy,
- A - ilość możliwych zatrzymań między węzłami.

Parametry:  $a, b, \alpha, \beta, \gamma, \delta$  zależą od odpowiednich współczynników i wynoszą:

$$\alpha = 3 \div 8$$

$$\beta = 2 \div 4$$

$$\gamma = 0,5 \div (-1,0)$$

$$\delta = 0 \div 1$$

$$a = (-0,1) \div (+0,1)$$

$$b = 0,93 \div 1,1$$

Model ten w postaci iloczynowej wiąże ze sobą niektóre z czynników wpływających na wybór drogi w sieci, co związane jest z jej przyszłym obciążeniem ruchem.

#### 4. KRYTERIA WYBORU DROGI PRZEZ KIEROWCÓW

Zwykle istnieje kilka różnych tras łączących źródło ruchu "i" z celem "j". W takim przypadku wykorzystujemy inne modele rozkładu ruchu, uwzględniające możliwość wyboru przez kierowców dróg najkorzystniejszych.

Wardrop [3] sformułował dwie zasady dla rozdziału ruchu na alternatywne trasy w sieci dróg.

Pierwsza zasada stanowi, że każdy kierowca zakłada wybór drogi, która będzie minimalizować jego czas podróży w sieci. Druga, że wszyscy kierowcy dokonają wyboru przy tym samym kryterium. Proponuje również wprowadzenie uogólnienia przez zastąpienie czasu przejazdu - odczuwanym przez kierowców kosztem przejazdu, który może zawierać inne czynniki oprócz czasu. Wiadomo, że kierowcy przy wyborze drogi będą w sposób logiczny korzystać z połączeń o najmniejszym oporze. Jeżeli wszyscy kierowcy rozstrzygną według jednego zgodnego kryterium i znajdą się w sytuacji, że bezbłędnie oszacują miarodajne czynniki, wówczas wszyscy oni posłużą się tą samą drogą. W przypadku ekstremalnym prowadziłyby to do obciążenia optymalnej trasy całkowitą liczbą pojazdów. Byłby to podział na zasadzie "wszystko albo nic". W takim jednak przypadku trasa nie spełniłaby oczekiwań kierowców i stosowanie tej metody podziału ruchu daje bardzo niedokładne przybliżenia.

Dlatego też przyjęcie tylko jednego czynnika jako odzwierciedlenia oporu jest niewystarczające. Metoda połączonych kryteriów [4] pozwala na

stosunkowo bliskie rzeczywistości określenie relacji ruchowych. Wprowadza ona do obliczeń zarówno długość drogi, jak i czas. W Polsce [5] stosowany jest 2-parametrowy wzór Sidorenki, który określa wielkość oporu:

$$R = 3,61 \left( \frac{\xi}{v} + \frac{1-\xi}{v} \right)$$

gdzie:

- R - opór trasy s ,
- l - długość trasy m ,
- v - prędkość jazdy km/h ,
- $\xi$  - współczynnik proporcji kryteriów drogi i czasu (0÷1),
- $\eta$  - współczynnik ujednolicenia oporu.

Gdy  $\xi = 1$ , opór zależy tylko od kryterium czasu, przy  $\xi = 0$  o wyborze drogi decyduje długość drogi.

Z reguły przyjmuje się  $\xi = 0,5$ , co oznacza, że w równym stosunku uwzględnione są obie wielkości. Wtedy

$$R = 1,81 \left( \frac{1}{v} + \frac{1}{v} \right)$$

Wielkość współczynnika  $\eta$  również decyduje o proporcjach wpływu czasu i odległości. Przy obniżaniu wartości  $\eta$  rośnie wpływ długości drogi, przy podwyższaniu wzrasta wpływ czasu. Na podstawie dotychczasowych prób można przyjmować, że wielkość  $\eta$  dla różnych wartości winna zawierać się w granicach 20÷60 [4]. Można też uwzględniać w obliczeniach zmiany czasu związane z przejazdem przez skrzyżowania przez przyjęcie współczynnika  $\beta$ . Uniezależnienie go od pozostałych współczynników pozwala na swobodne ustalenie elementów wpływających na wybór drogi.

## 5. MODELE ROZKŁADU "SWOBODNEGO" RUCHU NA SIĘĆ

Cel podróży, nastrój i wiek kierowców również nie pozostają bez wpływu na podstawę przyjętego kryterium i ich aktualną ocenę oporu. Zawsze więc będą istniały różne wchodzące w rachubę trasy, które są różnie oceniane i przyjmowane przez kierowców. Proporcje ruchu przypadające na poszczególne alternatywne trasy będą się różnić, gdy zostaną ujawnione korzyści jakiejś trasy w porównaniu z innymi. Do określania wielkości przydziałów na poszczególne trasy ustalono na podstawie badań, ankietowania, pomiarów i obliczeń tzw. krzywe proporcjonalnego odchylenia [6]. Na podstawie korzyści czasowych i w długości drogi można określić procent kierowców, którzy skorzystają z danej drogi. Krzywe te są miarodajne dla dróg szybkiego ruchu lub autostrad i wybranych arterii miejskich i pozamiejskich.

Istniejąca technika rozdziału ruchu oparta na analogii do prawa Kirchhoffa również bierze pod uwagę opór, który przypisuje każdej branej pod uwagę trasie.

Stosując probabilistyczną interpretację tego prawa można określić, jaka część ruchu przypadnie na  $i$ -tą drogę:

$$P_i = \frac{w_i^{-n}}{\sum_{i=1}^k (w_i^{-n})} \quad n > 1 \quad i = 1, 2, \dots, k$$

$w$  - opór

Badania wykładnika " $n$ " wykazały, że jest on zależny zarówno od kryterium oporu, jak i rodzaju terenów otaczających drogę oraz celów podróży. Podczas gdy na niewielkich obszarach obserwuje się wartość wykładnika " $n$ " w granicach 4÷6, to na dużych obszarach wielkość ta sięga do 10. Stąd autorzy metody proponują przyjmować " $n$ " w postaci funkcji oporu.

Często występującą trudnością przy nakładaniu ruchu na sieć jest fakt, że brane pod uwagę drogi różnią się tylko częścią odcinków, podczas gdy pozostałe są takie same. W tego typu przypadkach oszacowania oporów nie mogą być niezależne od siebie. Jeśli pewna droga " $z$ " składa się z odcinka o oporze  $w_{z1}$ , który nie jest jednocześnie częścią jakiejś innej drogi oraz odcinka  $K$  dróg, wówczas można przy założeniu łącznej formuły  $K(w_z) = w_z^{-n}$  dla kombinowanego oporu drogi " $z$ " przyjąć:

$$w_z = w_{z1} + w_{z2} \sqrt[n]{K}$$

Opisane modele rozdziału ruchu dają w wyniku stosowania "rodział swobodny", co oznacza, że wielkości ruchu przydzielane są drodze optymalnej bez względu na wielkość potoku, jaki powstanie na drodze po zsumowaniu wszystkich przydziałów. Na niektórych trasach sieci wystąpi wielkość ruchu, która przekracza zdolność przepustowości.

## 6. MODELE ROZKŁADU UWZGLĘDNIAJĄCE OGRANICZENIE PRZEPUSTOWOŚCI

W przeciwieństwie do długości dróg, czasy podróży zależą nie tylko od charakterystyk połączeń i węzłów, lecz również od przypadającego na nie obciążenia ruchem. Ponieważ muszą być one ustalone, a początkowo są nieznanne, można się tylko zorientować co do czasu początkowego na podstawie warunków drogowych, które są tylko miarodajne przy bardzo słabym ruchu. Oznacza to, że otrzymany w wyniku tego założenia obraz obciążeń wówczas odzwierciedla warunki rzeczywiste, gdy wielkości ruchu są niewielkie w porównaniu z przepustowością. W modelu sukcesywnego obciążenia ruchem w

kolejnych krokach tylko określona część potencjału ruchowego rozkładana jest na pierwsze znalezione drogi. Następnie korygowane są opory poszczególnych obciążonych odcinków, tzn. czasy podróży. W następnym kroku iteracji najlepsze trasy pomiędzy węzłami "i" oraz "j" nie muszą być koniecznie tymi samymi trasami, jakie występowały w poprzedniej iteracji. Proces ten kontynuowany jest tak długo, aż cały ruch zostanie nałożony na sieć.

Autorzy Detroit Area Traffic Study [6], zgodnie z założeniem, że prędkość na połączeniu jest zależna od potoku, czas podróży po każdej iteracji modyfikowali zgodnie ze wzorem:

$$T_A = T_0 \cdot e^{(\nu/c-1)}$$

gdzie:

$T_A$  - dostosowany czas podróży,

$T_0$  - początkowo przyjęty czas podróży lub czas na połączeniu, gdy  $\nu=c$ ,

$\nu$  - przydzielane natężenie,

$c$  - obliczona przepustowość.

Zastosowanie metody ograniczonej przelotowości pozwala w pewnym sensie symulować rzeczywiste warunki ruchu, w których atrakcyjność trasy maleje wraz ze wzrostem natężenia ruchu. Niektóre programy [4] przewidują możliwość uwzględniania tego faktu poprzez korygowanie czasu podróży na połączeniu według wzoru:

$$T = T_0 \left\{ 1 + 0,15 \left( \frac{N}{C} \right)^4 \right\}$$

gdzie:

$T$  - skorygowany czas podróży na połączeniu,

$T_0$  - czas podróży przyjęty początkowo,

$N$  - obliczone natężenie ruchu na połączeniu,

$C$  - przepustowość połączenia,

0,15 oraz 4 - liczby ustalone empirycznie.

W metodzie szacowania błędu faktyczny opór wchodzących w rachubę tras może być średnią wartością wszystkich oszacowań, wokół której mogą być rozrzucone wg rozkładu normalnego prawdopodobieństwa opory poszczególnych dróg. Przy założonej gęstości prawdopodobieństwa można wariantować w obliczeniach komputerowych opór każdego połączenia w sieci tak, że w każdej iteracji jest wyszukana inna optymalna trasa z węzła "i" do węzła "j". Model prognozowania trasy TRC [7] konfrontuje czasy podróży z zależnościami natężenia, co wykorzystuje się w procedurze iteracyjnej do wyznaczania przewidywanych natężeń ruchu maksymalnie na czterech drogach pomiędzy każdymi dwoma węzłami. Sformułowano dwa równania, z których pierwsze wykorzystuje natężenie jako zmienną zależną; jest ono wynikiem badań

i analiz. Drugie równanie dzieli natężenie ruchu z węzła "i" do węzła "j" pomiędzy różne trasy zgodnie z odwrotnością czasów podróży. Stwierdzono, że uzyskane czasy podróży w sposób dostatecznie dokładny reprezentują poszczególne trasy.

W metodzie "wielu dróg", będącej częścią systemu "Podróż" opracowanego w Biurze Rozwoju Krakowa, rozpatruje się wszystkie drogi rozchodzące się z danego węzła. Potoki ruchu między poszczególnymi węzłami dzieli się na trasy proporcjonalnie do obliczonego prawdopodobieństwa skorzystania z danej drogi:

$$p = e^{-\psi z}$$

gdzie:

- $p$  - prawdopodobieństwo skorzystania z drogi,
- $\psi$  - zadany parametr skupienia ruchu,
- $z$  - nadwyżka oporu badanej drogi nad oporem drogi najkrótszej,
- $\psi = 0$  - ruch równomiernie rozłożony,
- $\psi = \infty$  - ruch skupiony na najkrótszych trasach.

Obliczenia można wykonywać zarówno dla ruchu indywidualnego, jak i zbiorowego.

## 7. KOMENTARZ

Od dawna poszukuje się metod, które by w sposób najbardziej zbliżony do rzeczywistości odzwierciedlały złożoność problemów przy nakładaniu ruchu na sieć. Dotychczas brak jest wyrażenia, ujmującego dokładnie wszystkie występujące wpływy. Nie występuje takie określenie funkcji oporu drogi, które by w sposób jednoznaczny i możliwy do szerokiego zastosowania odzwierciedlało zagadnienie. Aktualnie proponowane ujęcia są tylko przybliżeniami i próbami powiązania wszystkich istotnych czynników, przy czym rozważania teoretyczne są dosyć zaawansowane.

W praktyce zachodzi konieczność przeprowadzenia dużej ilości wielokierunkowych badań, których wyniki mogłyby dać podstawę do zbudowania takiego wyrażenia na funkcję oporu drogi, które by w oparciu o modele teoretyczne znalazło zastosowanie w obliczeniach praktycznych przy nakładaniu ruchu na sieć. Kierowca wybiera swoją trasę podróży z różnorodnych przyczyn, np. czas, odległość, koszt przejazdu, dogodność, wygoda i bezpieczeństwo.

W tablicy 1 dokonano zestawienia stosowanych metod nakładania ruchu na sieć z wypukleniem kryteriów, branych pod uwagę w poszczególnych modelach, a mających wpływ na kształt nałożenia ruchu.

W teorii istnieje w każdej sytuacji optymalna trasa, która zapewnia kierowcy najlepszą kombinację tych wszystkich elementów.

Tablica 1

Zestawienie stosowanych metod nakładania ruchu na sieć z uwzględnieniem kryteriów branych pod uwagę w poszczególnych modelach

Liczba dróg przy podziale	Rodzaj rozdziału ruchu	Kryterium przy rozdziale ruchu <sup>x)</sup>	Zastosowanie
Rozdział ruchu na dwie trasy	Rozdział ruchu swobodny	L, T	wzory i wykresy
		T, L, M, A	przy znanej najkrótszej i drugiej najkrótszej ścieżkach
Rozdział ruchu na wiele dróg	Rozdział ruchu swobodny	T	wyбір drogi przez kierowców zgodnie z zasadą Wardropa
		dowolnie przyjęta za opór wielkość identyczna dla wszystkich dróg	metoda "wszystko albo nic"
		L, T przy $\xi = 0,5$ L przy $\xi = 0$ T przy $\xi = 1$	metoda połączonych kryteriów
		L, T	krzywe proporcjonalnego odchylenia
		dowolnie przyjęta za opór wielkość taka sama dla wszystkich dróg	probabilistyczna interpretacja prawa Kirchhoffa
	Rozdział ruchu uwzględniający ograniczenie przepustowości	$T_0, \psi, C$ modyfikacja czasu $T_A = T_0 \cdot e^{(\psi/C-1)}$	metoda oprac. przez autorów Detroit Area Traffic Study
		$T_0, N, C$ modyfikacja czasu $T = T_0 \cdot \left\{ 1 + 0,15 \left( \frac{N}{C} \right)^4 \right\}$	metoda wykorzystana w programie na maszynie ZAM-41
		dowolnie przyjęta za opór wielkość, taka sama dla wszystkich dróg	metoda szacowania błędów
		T, N	model prognozowania TRC
		$\psi^1$ , dowolnie przyjęta za opór wielkość taka sama dla wszystkich dróg	metoda "wielu dróg"

<sup>x)</sup>Oznaczenia symboli jak w tekście.

Mimo osiągnięcia znacznego postępu, między innymi dzięki wprowadzeniu maszyn liczących, można twierdzić, że dostępne metody nie są w stanie zinterpretować komplikacji ludzkiego postępowania i zdarzeń zachodzących w otaczającej przestrzeni.

## LITERATURA

- [1] Mensenbach W.: Podstawy inżynierii ruchu drogowego. WKŁ, Warszawa 1978.
- [2] Stadt region land: Instituts für Stadt Bauwesen Aachen nr 9. (tłum. własne).
- [3] Charlesworth I.A.: Control and routing of traffic in a road network. Traffic Engineering + Control 1979 (tłum. własne).
- [4] Sidorenko A., Wyborski B.: Rozdział relacji ruchu kołowego na sieć ulic. Mat. powielone IKŚ, Warszawa.
- [5] Podoski J.: Transport w miastach, WKŁ, Warszawa 1977.
- [6] O'Flaherty E.A.: Highways and Traffic. London 1974 (tłum. własne).
- [7] Dickey J.W.: Metropolitan Transportation Planning (tłum. własne).

ФУНКЦИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДОРОГИ В ЗАДАЧЕ НАНЕСЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ  
НА ДОРОЖНУЮ СЕТЬ

## Р е з ю м е

В настоящей статье представлен просмотр методов нанесения движения на дорожную сеть, в частности методов расчета значений функций сопротивления дороги и сравнение вида этих функций в примененных моделях.

ROAD RESISTANCE FUNCTION IN THE PROBLEM  
OF THE NETWORK TRAFFIC DISTRIBUTION

## S u m m a r y

The article presents a survey of methods of network traffic distribution as well as the means of calculating magnitudes of functions and a comparison of the forms of those functions in the applied models.