

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

Rozprawy
nr 40

TOMASZ SZCZURASZEK

**MODEL RUCHU POTOKU
POJAZDÓW NA DWUPASOWEJ
DRODZE DWUKIERUNKOWEJ**

BYDGOSZCZ – 1990

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

Rozprawy
nr 40

TOMASZ SZCZURASZEK

**MODEL RUCHU POTOKU
POJAZDÓW NA DWUPASOWEJ
DRODZE DWUKIERUNKOWEJ**

Biblioteka Główna ATR w Bydgoszczy



00000005374

BYDGOSZCZ – 1990

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
prof. dr hab. Ojcumiła Stefaniak

OPINIODAWCY
prof. dr hab. Ryszard Krystek
prof. dr inż. Wojciech Suchorzewski

REDAKTOR NAUKOWY
prof. dr hab. inż. Kazimierz Braun

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Halina Klupczyńska, Zbigniew Gackowski



Wydano za zgodą Rektora
Akademii Techniczno-Rolniczej
w Bydgoszczy

ISSN 0209-0597

**WYDAWNICTWO UCZELNIANE AKADEMII TECHNICZNO-ROLNICZEJ
W BYDGOSZCZY**

Wyd. I. Nakład 150. Ark. aut. 4,7 ark. druk. 5,4. Papier drukowy kl. V, B-1
Oddano do druku 27.04.1990 r. Druk ukończono w maju 1990 r.
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii ATR, Bydgoszcz, ul. Olszewskiego 20
Zamówienie nr 107/90.
Cena 2.500 zł

Spis treści

	str.
WSTĘP	5
1. CHARAKTERYSTYKA SPOSOBÓW MODELOWANIA RUCHU POTOKU POJAZDÓW	7
1.1. Model ruchu potoku przyjęty w HCM-65 i w metodach będących jej modyfikacją	7
1.2. Inne sposoby wyznaczania modelu ruchu potoku	11
1.3. Struktura rodzajowa pojazdów a modelowanie ruchu	13
2. CEL I ZAKRES PRACY ORAZ OPIS BADAŃ TERENOWYCH	19
2.1. Cel i zakres pracy	19
2.2. Zakres badań	20
2.3. Metody badań	23
3. WSTĘPNE ZAŁOŻENIA	25
3.1. Propozycja klasyfikacji grup rodzajowych pojazdów	25
3.2. Charakterystyka grup rodzajowych pojazdów samochodowych ..	27
3.3. Ogólna koncepcja wyznaczenia modelu ruchu potoku	29
4. OPIS RUCHU SWOBODNEGO	33
4.1. Charakter rozkładu prędkości pojazdów w potoku	33
4.2. Metoda szacowania średniej prędkości pojazdów potoku oraz poszczególnych grup rodzajowych	34
4.3. Metoda szacowania odchylenia standardowego prędkości	38
4.4. Ocena dokładności szacowania parametrów rozkładów prędkości	42
5. OPIS STANU ZATORU	45
6. OPIS RUCHU NIESWOBODNEGO	47
6.1. Charakter rozkładu prędkości pojazdów w potoku	47
6.2. Zapotrzebowanie na wyprzedzanie	49
6.3. Możliwość wyprzedzania	51
6.4. Metoda szacowania średniej prędkości pojazdów potoku	52
6.5. Metoda szacowania średnich prędkości pojazdów poszczególnych grup rodzajowych	56
6.6. Metoda szacowania pozostałych parametrów rozkładów prędkości	60
7. PRAKTYCZNE WYKORZYSTANIE MODELU	63
7.1. Fundamentalne zależności ruchu	63
7.2. Przykład wyznaczania podstawowych charakterystyk ruchu ...	64
7.3. Model ruchu potoku a metoda oceny warunków ruchu	67
8. WNIOSKI	69
LITERATURA	72
STRESZCZENIA	80

WSTĘP

Głównym problemem przy opracowywaniu metody oceny warunków ruchu i obliczania przepustowości dróg zamiejskich jest wyznaczenie modelu ruchu potoku pojazdów. Problem ten jest szczególnie trudny w przypadku dwupasowych dróg dwukierunkowych oraz krótkich, jednorodnych geometrycznie odcinków drogi. Wynika to zarówno z dużej liczby, jak i z dużego zakresu zmienności czynników wpływających na proces ruchu.

Dwupasowe drogi dwukierunkowe stanowią w Polsce przeważającą część sieci drogowej, z tego względu opracowanie dla nich szczegółowej metody oceny warunków ruchu jest zadaniem bardzo ważnym. Specyfika ruchu w Polsce uniemożliwia jednak bezpośrednio wykorzystanie w tym celu wyników badań prowadzonych za granicą. Ponadto dotychczasowe sposoby modelowania ruchu potoku pojazdów posiadają wiele wad, utrudniających poprawne opracowanie takiej metody.

Zaproponowany przez autora w niniejszej pracy model ruchu potoku pojazdów na dwupasowej drodze dwukierunkowej obejmuje: ogólną koncepcję jego wyznaczenia, postacię najważniejszych funkcji (w tym fundamentalne zależności, tj. między średnią prędkością, gęstością i natężeniem ruchu) oraz ogólny sposób rozwiązania pozostałych jego elementów. W analizie wykorzystano wyniki badań około 250 tys. pojazdów. Badania te realizowane były od 1982 roku, przez osiem lat, na 128 różnych odcinkach dróg kilkunastu województw kraju. Zastosowano w nich między innymi nowe w kraju urządzenie do półautomatycznego pomiaru cech ruchu drogowego, zaprojektowane przy współpracy autora.

Przedstawiony w pracy model ruchu potoku pojazdów został opracowany w sposób odmienny, niż to czyniono dotychczas. Zasadniczymi elementami modelu są (zdefiniowane przez autora): zależność średniej prędkości od średniego wskaźnika efektywnej mocy jednostkowej pojazdów samochodowych oraz wskaźniki zapotrzebowania na wyprzedzanie i możliwości wyprzedzania. Ponadto ważną cechą modelu jest uwzględnienie szczegółowej struktury rodzajowej potoku, bez konieczności stosowania współczynników do przeliczania pojazdów różnych typów na jednostki umowne. Dzięki tym elementom uzyskano prosty model o dużej dokładności. Na jego podstawie jest opracowywana obecnie w kraju nowa szczegółowa metoda obliczania przepustowości i o eny warunków ruchu na zamiejskich, dwupasowych drogach dwukierunkowych.

1. CHARAKTERYSTYKA SPOSOBÓW MODELOWANIA RUCHU POTOKU POJAZDÓW

Podstawowym narzędziem decyzyjnym, umożliwiającym świadomą i ekonomiczną politykę instytucjom drogowym różnego szczebla w zakresie planowania, projektowania, eksploatacji i modernizacji dróg zamiejskich, jest metoda oceny warunków ruchu.

Zasadniczym elementem, i jednocześnie bazą przy konstruowaniu wspomnianej metody, jest model ruchu potoku pojazdów - czyli matematyczny opis związków między wybranymi miarami warunków ruchu potoku a cechami drogi i ruchu. Na proces ruchu drogowego wpływa wiele czynników, stąd wyznaczenie dokładnego modelu ruchu jest zadaniem złożonym, i to zarówno na etapie prac empirycznych, jak i analitycznych, oraz zdecydowanie najtrudniejszym przy opracowywaniu metody.

Pierwsze w świecie badania warunków ruchu na drogach zamiejskich, zakrojone na szeroką skalę, wykonano w USA. Efektem tych badań było opublikowanie podręcznika Highway Capacity Manual w 1950 roku [8, 26]. Zaproponowana w tym opracowaniu metoda oceny warunków ruchu zyskała wówczas na świecie duże uznanie. Została ona zastosowana w praktyce w wielu krajach, ponieważ zainteresowanie własnymi badaniami ruchu było jeszcze bardzo małe. Dopiero po piętnastu latach, kiedy Amerykanie opracowali poprawioną i uzupełnioną wersję metody zwaną HCM-65 [27, 80], oraz kiedy nastąpiło znaczne zwiększenie problemów komunikacyjnych, wzrosło zainteresowanie także w innych krajach pracami własnymi. Pod względem sposobu modelowania ruchu potoku, prace te można najogólniej podzielić na dwie grupy:

- a) prace stanowiące adaptację lub modyfikację metody HCM-65,
- b) prace reprezentujące odmienny sposób rozwiązania od przyjętego w HCM-65.

1.1. Model ruchu potoku przyjęty w metodzie HCM-65 i w metodach będących jej modyfikacją

Zastosowany w metodzie HCM-65 model ruchu potoku pojazdów opracowano na podstawie wieloletnich badań empirycznych [8, 27]. Badania ruchu wykonano głównie w celu określenia podstawowej zależności między tzw. prędkością operacyjną, a natężeniem ruchu we wzorcowych warunkach drogowo-ruchowych, oraz w celu oszacowania wpływu na warunki ruchu poszczególnych zmiennych niezależnych, charakteryzujących wybrane cechy drogi. Za miary warunków ruchu przyjęto w tej metodzie prędkość operacyjną i natężenie ruchu. Natomiast za wzorcowe warunki drogowo-ruchowe uznano ruch pojazdów osobowych

(tzw. umownych) na prostym, poziomym odcinku drogi, o określonym przekroju poprzecznym.

W metodzie HCM-65 model ruchu potoku przy dowolnej kombinacji zmiennych niezależnych wyznaczono za pomocą funkcji ustalonych a priori. Wynikało to przede wszystkim z zakresu przeprowadzonych badań, który nie obejmował pełnej oceny wielkości wzajemnego oddziaływania uwzględnianych cech drogi na warunki ruchu. Również, wykorzystując w dużej części teoretyczne zależności, w omawianej metodzie uwzględniono wpływ struktury rodzajowej potoku na warunki ruchu. Zastosowano w tym celu tzw. współczynniki przeliczeniowe, umożliwiające wyrażenie każdego pojazdu w potoku ekwiwalentem pojazdów osobowych.

Po ukazaniu się HCM-65, w wielu krajach podjęto próby adaptacji metody amerykańskiej, sprowadzającej się zwykle do nieznacznej korekty tej metody i pełnej akceptacji jej modelu ruchu. Podobnie postąpiono w Polsce [80], czego efektem są, stosowane od 1971 roku do chwili obecnej, wytyczne obliczania przepustowości [109].

W późniejszym okresie zaczęto jednak dostrzegać coraz więcej wad modelu ruchu potoku przyjętego w HCM-65, a przede wszystkim małą jego przydatność w innych warunkach niż amerykańskie. Wyniki wielu badań wskazywały bowiem na fakt występowania w poszczególnych krajach różnych charakterystyk ruchu, czego podłożem były indywidualne i zarazem odmienne cechy: parku samochodowego, sieci drogowej i zachowania się kierowców w ruchu. Takie wnioski zostały wysunięte również przez badania prowadzone w Polsce [46, 54, 88], w wyniku których należało uznać stosowane w naszym kraju wytyczne [109] za nieprawidłowe. Stwierdzone np. błędy szacowania przepustowości sięgały 70%. Z podobnych powodów, na konferencji naukowej poświęconej metodom oceny warunków ruchu na dwupasowych drogach dwukierunkowych, która odbyła się w 1984 roku w Warszawie, uznano, że nie powinno się stosować w Polsce innych, obcych metod.

Do najczęściej wymienianych wad modelu ruchu metody HCM-65 należą [58, 61, 62, 63]:

- przyjęcie prędkości operacyjnej jako jednej z miar warunków ruchu; prędkość ta nie jest możliwa do zmierzenia w rzeczywistym ruchu drogowym, za jej pomocą ocenia się ruch pojedynczych, szybkich pojazdów, a nie cały potok ⁽¹⁾;
- nieprawidłowe określenie wartości współczynników przeliczeniowych dla pojazdów ciężarowych; w przypadku odcinków wzniesień i dużego udziału w potoku pojazdów ciężarowych szacowana przepustowość drogi była często znacznie mniejsza od obserwowanego natężenia ruchu;
- brak uwzględnienia niektórych, istotnych z punktu widzenia warunków ruchu, cech drogi i ruchu.

Przedstawione powyżej problemy spowodowały, że w wielu krajach podjęto badania nad własną metodą. W badaniach tych znaczącą rolę odgrywała

(1) Ze względu na trudności pomiaru prędkości operacyjnej, niekiedy przyjmowaną ją jako równą kwantylowi 85% prędkości potoku [55, 58, 65].

Jednak nadal adaptacja metody HCM-65, lecz realizowana już w szerszym zakresie. Badania zmierzające do przystosowania metody amerykańskiej do warunków własnego kraju przeprowadzono w ostatnich latach między innymi w: Australii, Czechosłowacji, Holandii, Jugosławii, Portugalii [58], Danii [65], Szwecji [60], ZSRR [68, 88] i w Polsce [33, 54]. Należy także zaznaczyć, że wydana niedawno nowa wersja metody amerykańskiej HCM-85 [28, 56, 64, 96, 97] również została opracowana na podstawie modyfikacji poprzedniej wersji metody z 1965 roku.

Adaptacja i modyfikacja metody HCM-65 była dokonywana przy częściowych tylko zmianach konstrukcji modelu ruchu potoku oraz przy niezmiennym sposobie uwzględniania struktury rodzajowej pojazdów. Zakres prac obejmował przede wszystkim usunięcie najważniejszych, zdaniem ich autorów, wad modelu w metodzie amerykańskiej. Bardzo często urealniano na podstawie badań empirycznych podstawową zależność, tj. między prędkością a natężeniem (lub gęstością) ruchu potoku w warunkach wzorcowych, oraz określano nowe wartości współczynników przeliczeniowych. Ponadto zmiany w modelowaniu ruchu dotyczyły przyjęcia innych niż w HCM-65 mierników warunków ruchu. Szczególnie często zastępowano prędkość operacyjną średnią prędkością potoku. Tak postąpiono również przy opracowywaniu nowej wersji metody amerykańskiej. Obok tego parametru przyjęto w niej dodatkowe mierniki warunków ruchu, tj. procentowy czas blokowania pojazdów w potoku oraz stopień wykorzystania przepustowości. Najczęściej jednak, za dodatkowy miernik warunków ruchu przyjmowano nadal natężenie lub gęstość ruchu. Różnice w modelowaniu ruchu polegały w wielu przypadkach także na uwzględnianiu większej liczby cech drogi, obejmujących takie elementy, jak np. geometrię planu ⁽²⁾, pobocza, istnienie na wzniesieniu pasa ruchu powolnego, oznakowanie, oraz na uwzględnianiu dalszych cech ruchu, takich jak np. struktury kierunkowej, udziału w ruchu pojazdów rekreacyjnych, wolnobieżnych itp.

Dokonywane zmiany modelu ruchu potoku przyjętego w HCM-65 niestety nie usuwały jego podstawowych wad. Z tej racji nie zawsze przyczyniały się do istotnej poprawy dokładności metody. Zdaniem niektórych autorów [58, 81, 88] wadami mającymi największy wpływ na dokładność modelu są: nieprawidłowy charakter zależności między miernikami warunków ruchu a cechami drogi i ruchu oraz sposób uwzględniania struktury rodzajowej pojazdów. Zarówno tę zależność, jak i zależność opisującą oddziaływanie struktury rodzajowej pojazdów na warunki ruchu opracowano w metodzie HCM-65 i w metodach stanowiących jej modyfikację przy wykorzystaniu w dużym stopniu założeń teoretycznych. Na taki wybór rozwiązań obu zależności wpływ miała przede wszystkim ogólna trudność definiowania funkcji wielowymiarowych i wynikający stąd zakres badań empirycznych.

W omawianych pracach jedna z najważniejszych funkcji modelu, dotycząca natężenia ruchu, przyjęta została w postaci iloczynu kilku lub kilkunastu czynników. Iloczyn ten stanowią: natężenie ruchu we wzorcowych wa-

(2) W metodzie HCM-65 geometria planu sytuacyjnego drogi jest uwzględniana w sposób pośredni poprzez prędkość projektową, co uniemożliwia ocenę warunków ruchu na konkretnym łuku poziomym.

runkach drogowo-ruchowych oraz współczynniki korygujące wartość tego natężenia w zależności od cech drogi i cech ruchu (najczęściej tylko struktury rodzajowej pojazdów). Jak wynika z wielu prac [3, 51, 75, 78, 88], funkcja ta powoduje zaniżanie obliczanych wartości. Nawet w przypadku małej liczby zmiennych niezależnych, błędy wynikające z zastosowania tej funkcji mogą przekraczać 20%. Należy przy tym nadmienić, że w niektórych metodach, w celu uwzględnienia większej liczby czynników drogowych, przyjęto dużą liczbę współczynników korygujących. Skrajnym przykładem jest nowa wersja metody radzieckiej MADI [68, 88], w której ta liczba wynosi aż 15. W konsekwencji tego, co jest pewnym paradoksem, nowa wersja metody stała się znacznie mniej dokładna od wersji poprzedniej [45].

Badania przeprowadzone przez autora wykazały na przykład, że na wzniesieniach wpływ na warunki ruchu innych cech drogi, nie związanych z profilem podłużnym, jest zmienny w zależności od wartości pochylenia podłużnego [50]. Jako dodatkowe cechy odcinka drogi analizowano przeszkody boczne w odległości 0,60 m od krawędzi jezdni oraz promień krzywizny poziomej wynoszący 150 + 160 m. Największy wpływ dodatkowych cech występował w przypadku małego pochylenia podłużnego odcinka drogi (około 0%), natomiast w przypadku dużego pochylenia podłużnego (powyżej 6%) wpływ ten praktycznie malał do zera. Przyczyną zaniku wpływu rozważanych dodatkowych cech drogi były, zdaniem autora, duże opory ruchu powstające na skutek samego pochylenia podłużnego drogi. Powodowały one obniżenie prędkości pojazdów w większym stopniu, niż wymagałoby bezpieczeństwo jazdy (zgodnie z subiektywną oceną kierowców) na odcinku o danych cechach drogowych. Zupełnie odmienne tendencje zaobserwowano na odcinkach położonych na spadkach. Zwiększenie pochylenia podłużnego powodowało wyraźny wzrost wpływu na warunki ruchu rozważanych, dodatkowych cech drogi - zwłaszcza krzywizny poziomej. Można to wytłumaczyć tym, że ruch na łuku poziomym położonym w spadku zwiększa, w stosunku do odcinka płaskiego, ryzyko poślizgu i zarzucenia pojazdu, przez co wpływa na obniżenie przez kierowców prędkości jazdy.

Powyższe wyniki badań wskazują, że oddziaływanie danego czynnika na warunki ruchu jest ściśle uzależnione od charakterystyki innych czynników. Ten wniosek potwierdzają również wyniki badań wielu prac omówionych w podrozdziale 1.2. W metodzie HCM-65 i w metodach stanowiących jej modyfikację zastosowaną funkcją do opisu tego oddziaływania jest iloczyn współczynników korygujących, stanowiących niezależny od siebie wpływ na warunki ruchu poszczególnych czynników lub grupy czynników⁽³⁾ drogowo-ruchowych. Funkcja ta nie jest więc określona poprawnie. Należy zaznaczyć, że może ona zapewniać pożądaną dokładność obliczeń w przypadku małej liczby oraz pewnego przedziału wartości współczynników korygujących [75, 88]. Jednak nie powinna ona być stosowana do opracowania szczegółowej metody oceny warunków ruchu, wymagającej uwzględnienia wielu czynników drogowo-ruchowych.

(3) W niektórych pracach [27, 28] pewne czynniki uwzględniane są łącznie, jak np. szerokość jezdni i odległość przeszkód bocznych.

1.2. Inne sposoby wyznaczania modelu ruchu potoku

Stwierdzenie wad w sposobie modelowania ruchu przyjętego w HCM-65 i w metodach stanowiących jej modyfikację spowodowało nowe rozwiązania. Wy różnić tutaj można dwa kierunki postępowania. Pierwszy z nich, w ogólnym ujęciu, polega na wyznaczeniu modelu ruchu potoku tylko częściowo przy wykorzystaniu badań empirycznych, drugi natomiast - wyłącznie na ich podstawie.

Pierwszy kierunek postępowania

W przypadku pierwszego kierunku postępowania model ruchu potoku określa się w sposób pośredni. Na podstawie badań empirycznych wyznacza się go najpierw przy kilku wybranych układach zmiennych niezależnych (najczęściej w tzw. warunkach wzorcowych), a następnie szacuje się go przy pozostałych układach zmiennych, poprzez:

- interpolację i ekstrapolację wyników prowadzoną intuicyjnie [36, 40, 59, 69, 70, 94],
- zastosowanie modelu symulacyjnego [6, 43, 74, 104],
- wykorzystanie teoretycznych modeli ruchu [2, 23, 42, 68, 78],
- wykorzystanie dodatkowych funkcji regresji ustalanych w oparciu o dane teoretyczno-empiryczne [85, 101, 102].

Te sposoby modelowania ruchu są podobne do sposobu wykorzystywanego w HCM-65 i w metodach jej pokrewnych. Różnica polega jednak na innym podejściu w części rozważań teoretycznych. W przypadku metody amerykańskiej pewne funkcje, opisujące zależność między miernikami warunków ruchu a cechami drogi i ruchu, były przyjmowane arbitralnie. W nowych pracach natomiast próbuje się zastosować różne techniki umożliwiające uzyskanie tych funkcji o większej dokładności - tzn. lepiej odzwierciedlających rzeczywiste związki. Ponadto w większości z tych prac rezygnuje się z dotychczasowego sposobu uwzględniania struktury rodzajowej pojazdów, polegającego na wykorzystywaniu współczynników przeliczeniowych.

Tak wyznaczony model ruchu potoku był zaproponowany również przez autora niniejszej pracy [85] w ramach badań przeprowadzonych w latach 1984 - 1986 na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych Ministerstwa Komunikacji [49, 54]. Celem tych badań było opracowanie tymczasowych wytycznych obliczania przepustowości i oceny warunków ruchu na drogach zamiejskich, które są obecnie na etapie wdrażania [34, 55]. Mają one zastąpić stare wytyczne z 1971 roku [109], do chwili opracowania nowej, kompleksowej metody polskiej.

Wymienione wyżej sposoby postępowania zwiększają dokładność wyznaczonego modelu ruchu w stosunku do metody HCM-65 i metod stanowiących jej modyfikację. Trudno jest jednak również na podstawie tych procedur opracować szczegółowy model uwzględniający wszystkie statystycznie istotne zmienne niezależne. W tym przypadku bowiem także uwzględnianie większej liczby zmiennych niezależnych prowadzi często do większych błędów modelu [85, 88].

Stąd też znamionnymi cechami omawianej grupy prac są: bardzo mały zakres wykorzystywanych w modelu czynników drogowych i ruchowych oraz nadanie metodzie oceny warunków ruchu charakteru metody ogólnej, umożliwiającej tylko przybliżoną ocenę warunków ruchu. Przyczyną tego jest fakt, że analizowane procedury w pewnym zakresie wartości zmiennych niezależnych oparte są na uproszczeniach, które polegają głównie na:

- korzystaniu z teoretycznych lub intuicyjnie przyjętych zależności nie potwierdzonych badaniami empirycznymi, zwłaszcza w odniesieniu do jednoczesnego działania wielu czynników drogowo-ruchowych;
- uogólnieniu wybranych zagadnień procesu ruchu potoku, pozbawiającym model ruchu dużej szczegółowości, np. traktowanie obu pasów ruchu łącznie, bez względu na występujące w nich różnice w cechach drogowych czy ruchowych (ma to szczególnie wpływ na dokładność modelu ruchu potoku na odcinkach wzniesień);
- przyjmowaniu niektórych zmiennych niezależnych, które tylko w ogólny sposób charakteryzują cechy drogi lub ruchu, jak np. krętość, fałistość, udział w potoku pojazdów innych niż osobowe.

Drugi kierunek postępowania

Chęć zwiększenia dokładności modelowania ruchu oraz lepszego poznania związków występujących między miernikami warunków ruchu a cechami drogi i ruchu zapewne stała się przyczyną powstania prac reprezentujących drugi kierunek rozwiązań, całkowicie odmienny od pozostałych. Definiowanie modelu ruchu prowadzone jest w nich głównie na podstawie badań empirycznych. Wykorzystuje się jednak do tego celu tylko rachunek regresji wielowymiarowej - i to w sposób bezpośredni - polegający na opisie podstawowych funkcji modelu bezpośrednio poprzez wszystkie, przyjęte w analizie zmienne niezależne. Rezygnuje się w nich więc zarówno z opisu warunków wzorcowych, jak i z wykorzystywania współczynników przeliczeniowych przy uwzględnianiu struktury rodzajowej pojazdów. Prace tego rodzaju wykonano między innymi w: ZSRR [2, 3], Wielkiej Brytanii [12, 47, 72, 76, 77, 99, 106], RFN [18, 22, 24, 30], Kanadzie [1, 110, 111], Australii [15, 16, 17] i Finlandii [100].

Przeprowadzenie analizy regresji z uwzględnieniem wielu zmiennych niezależnych wymaga, jak wiadomo, dużej liczby danych empirycznych. W przypadku więc rozważanych sposobów wyznaczania modelu, realna do wykonania liczba badań terenowych ogranicza niejako możliwą do przyjęcia w analizie liczbę czynników. Zmusza to z kolei do pominięcia w modelu niektórych, istotnych z punktu widzenia warunków ruchu, parametrów drogi i ruchu. W efekcie drugi kierunek postępowania w modelowaniu ruchu staje się bardziej pracochłonny i kosztowny, niż kierunek pierwszy, nie gwarantując przy tym zawsze lepszej dokładności wyznaczanego modelu. Przykładem wdrożenia takiej procedury postępowania może być jeden ze sposobów oceny warunków ruchu w wytycznych radzieckich MADI-82 [68]. Z uwagi na małą liczbę uwzględnianych czynników sposób ten uznano jednak w tych wytycznych jako uzupełniający, zalecany przy wstępnym i szybkim szacowaniu warunków ruchu.

1.3. Struktura rodzajowa pojazdów a modelowanie ruchu

Rozwój przemysłu motoryzacyjnego, jaki miał miejsce w ostatnich latach na świecie, spowodował powstanie pojazdów o bardzo zróżnicowanych właściwościach konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, a tym samym i o dużym zróżnicowaniu zachowań w ruchu [83]. Stąd wiele prac [87], w tym również prace autora [82, 89, 92], wskazują na niewystarczającą dokładność szacowania warunków ruchu przy sklasyfikowaniu pojazdów w dwie lub trzy grupy rodzajowe. Klasyfikacja ta powinna być bardziej szczegółowa i uzależniona od specyfiki zarówno parku samochodowego, jak i ruchu w danym kraju. Sugestia rozbudowy podziału pojazdów dotyczy szczególnie tworzenia nowych grup rodzajowych, takich jak pojazdy rekreacyjne [44, 104, 105, 107] (w krajach o wysokim poziomie motoryzacji) i pojazdy powolne [58, 92] (pojazdy wolnobieżne, ciągniki rolnicze, pojazdy zaprzęgowe itp.) oraz podziału pojazdów ciężarowych na trzy lub więcej grupy [3, 31, 66, 98].

W aspekcie klasyfikacji pojazdów w metodach oceny warunków ruchu zarysowały się ostatnio na świecie dwie, w pewnym sensie sprzeczne, tendencje [87]. Przyczynami tego zjawiska są: z jednej strony duży wpływ stopnia szczegółowości klasyfikacji rodzajowej pojazdów na dokładność metody, a z drugiej niedoskonałość niektórych, wykorzystywanych obecnie sposobów wyznaczania modelu ruchu, utrudniająca uwzględnienie dokładniejszego podziału pojazdów.

Pierwsza tendencja polega na zwiększaniu liczby grup rodzajowych w stosunku do analogicznych założeń w HCM-65. Wpływ struktury rodzajowej pojazdów na warunki ruchu potoku uwzględnia się w tym przypadku za pomocą współczynników przeliczeniowych.

Druga tendencja natomiast polega na minimalizowaniu tego podziału i przyjmowaniu dwóch (pojazdy osobowe i ciężarowe) lub wyjątkowo trzech grup rodzajowych. Wykorzystywana jest ona przeważnie tylko w tych pracach, w których model ruchu wyznacza się w sposób bezpośredni na podstawie badań empirycznych. Struktura rodzajowa ujmowana jest wówczas poprzez procentowy udział w potoku pojazdów poszczególnych grup rodzajowych. Na takie założenia, odnośnie liczby grup rodzajowych pojazdów, składają się wcześniej już opisane przyczyny natury obiektywnej, wynikające z bezpośrednio zastosowanej analizy regresji wielowymiarowej do wyznaczenia modelu. Zmusiły one autorów omawianych prac do pewnego kompromisu wynikającego z zachowania odpowiedniej dokładności wyznaczonego modelu, a polegającego na wyborze między liczbą zmiennych reprezentujących w modelu samą strukturę rodzajową pojazdów potoku oraz pozostałe czynniki ruchowe i drogowe. Należy przypuszczać, że przyjęcie szerszej, niż to uczyniono, klasyfikacji rodzajowej pojazdów, kosztem zwiększenia ogólnej liczby zmiennych, spowodowałoby niewspółmiernie duży, w stosunku do efektów, wzrost nakładów finansowych i pracochłonności badań terenowych.

Obecnie nadal najbardziej rozpowszechnionym sposobem uwzględniania struktury rodzajowej pojazdów w metodach oceny warunków ruchu pozostają współczynniki przeliczeniowe. Ideą tego sposobu jest przypisanie wag po-

szczególnym rodzajom pojazdów, których oszacowanie przeprowadza się za pomocą specjalnie do tego celu opracowanych modeli ruchu potoku, w znacznej części teoretycznych. Takie ujęcie różnorodności rodzajowej pojazdów potoku daje trzy korzyści. Najważniejszą z nich jest stworzenie możliwości wyznaczenia modelu ruchu tylko potoku jednorodnego (tylko pojazdy osobowe), pomijając na tym etapie opracowywania metody czynnik struktury rodzajowej. Konsekwencją tego jest znaczne uproszczenie wyznaczenia modelu i tym samym mniejszy zakres niezbędnych badań terenowych. Drugą korzyścią jest możliwość uwzględniania w metodzie oceny warunków ruchu bardziej rozbudowanej klasyfikacji rodzajowej pojazdów, co z kolei powinno mieć duży wpływ na jej dokładność. Natomiast trzecią jest możliwość zdefiniowania prostszej, ze względów praktycznych, formy metody, co wynika z prostszych zależności modelu ruchu.

Pojęcie współczynnika przeliczeniowego można w ogólnym ujęciu sformułować następująco: „Współczynnik przeliczeniowy E pojazdów danej grupy rodzajowej jest to liczba samochodów osobowych, tzw. umownych, która odpowiada pojazdowi tej grupy w określonych warunkach ruchu” [31].

Śród sposobów wyznaczenia wartości współczynników przeliczeniowych można wyróżnić dwie podstawowe grupy:

- a) sposoby, w których porównuje się natężenia dwóch potoków (osobowego i mieszanego) przy jednakowych warunkach ruchu,
- b) sposoby, w których porównuje się inne parametry ruchu dwóch potoków (osobowego i mieszanego) lub parametry ruchu dwóch pojazdów (osobowego i innego pojazdu).

Poszczególne sposoby obliczeń z grupy pierwszej różnią się zasadniczo tylko przyjętym miernikiem warunków ruchu. Najczęściej do szacowania poziomu tych warunków wykorzystuje się następujące parametry ruchu:

- średni czas podróży w potoku [7, 19, 31] - sposób I,
- średnią prędkość podróży lub chwilową potoku [1, 4, 75] - sposób II,
- 85 %-owy kwantyl prędkości potoku [49, 85] - sposób III,
- maksymalne natężenie ruchu [60, 75] - sposób IV,
- łączny czas podróży wszystkich pojazdów potoku [29, 31, 91] - sposób V,
- średnią prędkość pojazdów osobowych w potoku [31, 35] - sposób VI.

W drugiej grupie natomiast można wyróżnić sposoby, w których porównuje się:

- gęstości ruchu występujące w warunkach przepustowości lub zatoru dwóch potoków: osobowego i mieszanego [31, 75] - sposób VII,
- średnie odstępy czasu lub odległości między pojazdami w dwóch jednorodnych potokach (osobowym i składającym się tylko z pojazdów analizowanej grupy rodzajowej) [38, 75] - sposób VIII,
- liczbę wyprzedzeń jednego pojazdu osobowego i pojazdu analizowanego w danym potoku [7, 63, 104, 105] - sposób IX,
- średni czas zwłoki spowodowany wyprzedzaniem pojazdu osobowego i analizowanego w danym potoku [7, 58] - sposób X.

Wykonana przez autora w pracy [84] analiza wymienionych sposobów obliczania współczynników przeliczeniowych wykazała, że charakteryzują się one bardzo zróżnicowanymi postaciami funkcji, dającymi w efekcie, przy pewnych kombinacjach danych wejściowych, odmienne wyniki obliczeń - różniące się nawet znacznie powyżej 100 % (patrz tablica 1.1 oraz prace [7, 31, 60, 61, 75, 107]).

Tablica 1.1

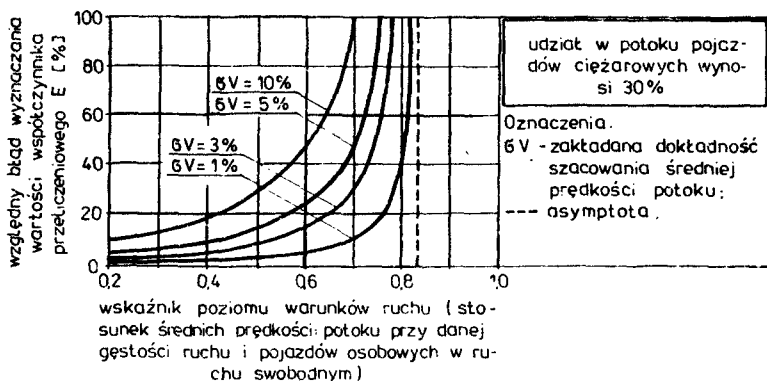
WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKÓW PRZELICZENIOWYCH POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH NA POJAZDY UMOWNE wg POSZCZEGÓLNYCH SPOSOBÓW OBLICZEŃ PRZY WYBRANYCH DANYCH DROGOWO - RUCHOWYCH												
Lp.	Ogólna charakterystyka warunków drogowych	Ogólna charakterystyka warunków ruchowych	Wartości współczynnika E wg sposobów obliczania									
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1.	prosty, poziomy odcinek na dwupasowej drodze dwukierunkowej	$P_c = 21\%$ $\bar{V}_k = 71 \text{ km/h}$	2156,7	286	28	1,9	1,3	2,0	1,6	—	1,8	1,8
2.	j.w.	$P_c = 20\%$ (**) $\bar{V}_k = 0 \text{ km/h}$	1,6	1,6	1,6	1,9	2,0	2,0	1,6	1,6	—	—
3.	odcinek wzniesienia o pochyleniu 5,5 % na dwupasowej drodze dwukierunkowej	$P_c = 5\%$ $\bar{V}_k = 52 \text{ km/h}$	53,6	18,4	2,9	2,5	1,9	3,1	1,7	—	6,2	5,2
4.	j.w.	$P_c = 10\%$ $\bar{V}_k = 52 \text{ km/h}$	—	18,2	16,7	2,5	1,9	3,1	1,7	—	6,2	5,2
5.	j.w.	$P_c = 50\%$ $\bar{V}_k = 30 \text{ km/h}$	4,2	3,1	3,9	2,8	2,3	3,1	1,7	8,3	7	—
6.	j.w.	$P_c = 5\%$ (*) $\bar{V}_k = 33 \text{ km/h}$	4,7	4,2	3,5	12,3	10,6	2,5	2,6	—	5,0	5,7
7.	j.w.	$P_c = 10\%$ (*) $\bar{V}_k = 22 \text{ km/h}$	19,9	3,4	18,2	130	122	2,5	2,6	—	30,1	11,3
Oznaczenia: — nie można określić wartości współczynnika. (*) jako pojazd ciężarowy przyjęto pociąg drogowy o pełnym obciążeniu. (**) przyjęte warunki dotyczą stanu zatoru (Istojące kolumny pojazdów). P_c - procentowy udział w potoku pojazdów ciężarowych. \bar{V}_k - średnia prędkość potoku												

Bardzo duży wpływ na końcową postać funkcji E mają także założenia uproszczające, jak i ustalenia warunków wyjściowych do modelu ruchu potoku stanowiącego podstawę jej wyznaczenia. Można to stwierdzić między innymi po porównaniu prac: Johna [35], Hubera [31] i niektórych prac przedstawionych na XVII Światowym Kongresie Drogowym w Sydney [58] lub Hubera [31] z pracami autora [91] i [29]. Powyższe fakty dowodzą, że w szerokim zakresie wartości zmiennych niezależnych można przyjąć jako możliwą teoretycznie bardzo różną wartość współczynnika przeliczeniowego. Wykazanie zaś poprawności tego działania zależy będzie od umiejętnego dobrania sposobu obliczeń.

Istotną cechą współczynników przeliczeniowych jest także to, że ich wartość uzależniona jest od bardzo wielu czynników drogowych i ruchowych. Znaczący wpływ na nią mają przede wszystkim cechy drogi oraz poziom warunków ruchu. Ponadto, na co również należy zwrócić uwagę, wartość współczynnika E jest determinowana innymi czynnikami, które ze względu na zakres uproszczeń poszczególnych sposobów obliczeń (przede wszystkim wykorzystywanych modeli ruchu potoków) nie są uwzględniane lub uwzględniane tylko w niektórych z nich, jak np. struktura kierunkowa i rodzajowa ruchu (procentowy udział w potoku pojazdów danych grup rodzajowych). Z przytoczonych argumentów wynika więc, że wyznaczenie poprawnego modelu obliczeń współczynnika E jest zagadnieniem bardzo złożonym, wymagającym wielu badań empirycznych. Niezależne formułowanie tej funkcji, obok zasadniczego modelu ruchu potoku, staje się tym samym zadaniem bezcelowym.

Bardzo ważny zarzut podważający sens stosowania współczynników przeliczeniowych wynika, zdaniem autora, także z zakresu ich wartości. We wszystkich prezentowanych sposobach obliczeń (wyjątek stanowi sposób VII, ale odnosi się on tylko do warunków maksymalnego natężenia i gęstości ruchu) zakres ten obejmuje prawie całą dodatnią oś liczbową, tj. od 1 do ∞ [7, 31, 84]. W związku z powyższym w pewnym przedziale zmiennych niezależnych wartości współczynników przeliczeniowych są ostatecznie nierealne, tzn. zbyt duże. W niektórych publikacjach, zarówno krajowych jak i zagranicznych, można było spotkać informację o stwierdzeniu natężeń ruchu w jednostkach umownych znacznie przekraczających przepustowość [54, 58]. Dotyczyło to głównie wzniesień. Nic też dziwnego, że w ostatnich latach z wielką ostrożnością, i zarazem z niepewnością, podchodzono do wartości współczynników przeliczeniowych.

Zakres wartości współczynnika E jest też powodem dużych błędów jej szacowania. Na rysunku 1.1 przedstawiono obliczone błędy wyznaczania współczynnika przeliczeniowego w zależności od poziomu warunków ruchu oraz względnej dokładności szacowania średniej prędkości pojazdów na wybranym odcinku drogi [84].



Rys. 1.1. Względne błędy wyznaczania wartości współczynnika przeliczeniowego E pojazdu ciężarowego na pojazdy umowne (odcinek wzniesienia 5% na dwupasowej drodze dwukierunkowej)

W obliczeniach powyższych wykorzystano sposób I [31], który jest dość często stosowany w praktyce. Założono ponadto, że sam wzór na obliczanie współczynnika przeliczeniowego [31, 84] nie jest obarczony błędem, czyli poprawnie odzwierciedla warunki rzeczywiste. Pomimo powyższych założeń - jak widać na rysunku - błędy osiągają w dość szerokim przedziale zmiennych niezależnych wartości niedopuszczalne.

2. CEL I ZAKRES PRACY ORAZ OPIS BADAŃ TERENOWYCH

2.1. Cel i zakres pracy

Przeprowadzona w pierwszym rozdziale analiza dotychczasowych sposobów modelowania ruchu dla potrzeb metody oceny warunków ruchu na drogach zamieszkanych upoważnia do sformułowania następujących wniosków:

1. Obecnie stosowane sposoby modelowania ruchu mają wiele wad, utrudniających opracowanie modelu o dużej dokładności.
2. W celu opracowania modelu ruchu potoku nie powinno się bezpośrednio wykorzystywać obcych wyników badań, ze względu na odmienność charakterystyk ruchu w poszczególnych krajach.
3. Model ruchu potoku powinien być opracowany przede wszystkim na podstawie badań empirycznych, ponieważ trudno jest na bazie teoretycznej uzyskać dużą zgodność modelu z warunkami rzeczywistymi, a tym samym - wymaganą jego dokładność.
4. Opracowanie modelu ruchu potoku nie powinno być bezpośrednio dokonywane na podstawie regresji wielowymiarowej, ponieważ wymaga ona znacznego ograniczenia liczby zmiennych niezależnych lub realizacji bardzo szerokiego programu badań empirycznych.
5. Jednym z najbardziej istotnych i trudnych problemów przy modelowaniu ruchu jest uwzględnianie struktury rodzajowej potoku, co wynika z następujących faktów:
 - na dokładność modelu bardzo duży wpływ ma stopień szczegółowości przyjętej w nim struktury rodzajowej pojazdów;
 - wykorzystanie współczynników przeliczeniowych w celu uwzględnienia w metodzie oceny warunków ruchu faktu różnorodności rodzajowej pojazdów w potoku jest rozwiązaniem nieprawidłowym, powodującym duże błędy metody;
 - zrezygnowanie ze współczynników przeliczeniowych znacznie komplikuje konstruowanie modelu ruchu, ponieważ wymaga wprowadzenia do analizy tylu zmiennych niezależnych, ile wynosi liczba przyjętych grup rodzajowych.

Powyższe wnioski stanowią podstawę zdefiniowania celu niniejszej pracy, który w ogólnym ujęciu brzmi: opracowanie modelu ruchu potoku pojazdów na dwupasowej drodze dwukierunkowej.

Zakres opracowania modelu obejmuje: ogólną koncepcję jego wyznaczenia, szczegółowe postacie najważniejszych funkcji oraz ogólny sposób rozwiązania większości pozostałych jego elementów. Za najważniejsze funkcje

modelu uznano te, które stanowią dotychczasową podstawę wyznaczania modelu oraz były niezbędne dla strony dowodowej całości proponowanego rozwiązania. W miarę szczegółowo opracowano także wszystkie elementy modelu, na które istotny wpływ ma rodzajowa struktura potoku. Wymagało to między innymi opracowania nowej klasyfikacji pojazdów. O podejściu takim zdecydowały przede wszystkim dotychczasowe trudności uwzględniania tego czynnika w modelowaniu ruchu.

Zakładany przez autora zakres opracowania modelu miał umożliwić w przyszłości sformułowanie nowej metody oceny warunków ruchu przy stosunkowo niewielkiej liczbie dodatkowych badań empirycznych i prostym programie tych badań. Ponadto zakres ten miał umożliwić opracowanie metody szczegółowej, służącej do oceny warunków ruchu na poszczególnych, jednorodnych pod względem cech geometrycznych odcinkach drogi. Proponowana koncepcja wyznaczania modelu ruchu potoku musiała więc zapewniać:

- wystarczającą ze względów praktycznych dokładność modelu opisującego ruch w przedziale od ruchu swobodnego (o gęstości bliskiej zeru) do przepustowości; warunki ruchu w pozostałym przedziale są niedopuszczalne w praktyce i rzadko występują, stąd nie charakteryzuje się ich bliżej w metodach oceny warunków ruchu;
- uwzględnienie najważniejszych z punktu widzenia warunków ruchu zmiennych niezależnych oraz dokładnej klasyfikacji rodzajowej pojazdów.

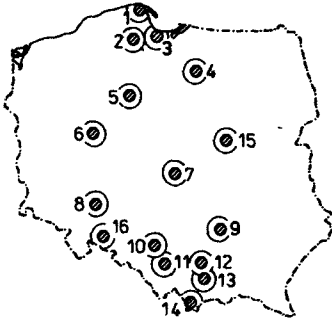
W pracy przyjęto, że model ruchu potoku będzie obejmował dwupasowe drogi dwukierunkowe. W Polsce od kilku już lat warunki ruchu na tych drogach stanowią przedmiot prac naukowo-badawczych, realizowanych z udziałem autora na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych [49, 50, 51, 54] oraz w ramach Centralnego Programu Badań Podstawowych 02.19 [84].

Wybór dwupasowych dróg dwukierunkowych do analizy wynikał z następujących faktów:

- dwupasowe drogi dwukierunkowe stanowią w Polsce przeważającą część sieci drogowej i z tej racji opracowanie dla nich szczegółowej metody oceny warunków ruchu jest zadaniem bardziej pilnym, niż dla dróg wielopasowych;
- łatwiejsza jest adaptacja modelu ruchu potoku z dwupasowych dróg dwukierunkowych na drogi wielopasowe, niż odwrotnie, ponieważ w przypadku dróg wielopasowych mniejsza jest liczba czynników mających wpływ na warunki ruchu, mniej złożony jest opis procesu wyprzedzania, mniejsze jest uzależnienie od siebie pojazdów w potoku i mniejszy jest też zakres wartości poszczególnych zmiennych niezależnych.

2.2. Zakres badań

Badania ruchu wykonano w latach 1982 + 1989 na 128 różnych odcinkach dróg kilkunastu województw kraju (rys.2.1).



Oznaczenia :

- 1- Władystawowo rok 1986 i 1987;
- 2- Kartuzy rok 1982;
- 3- Gdańsk rok 1982 + 1988;
- 4- Ostróda rok 1988;
- 5- Bydgoszcz rok 1982 + 1988;
- 6- Poznań rok 1983 i 1988;
- 7- Łódź rok 1984 i 1985;
- 8- Wrocław rok 1983;
- 9- Kielce rok 1985;
- 10- Katowice rok 1982;
- 11- Bielsko Biala rok 1984;
- 12- Kraków rok 1983 i 1984;
- 13- Myślenice rok 1987;
- 14- Zakopane rok 1983 i 1988;
- 15- Warszawa rok 1983 i 1985;
- 16- Otmuchów rok 1989.

Rys.2.1. Lokalizacja obszarów dróg objętych badaniami

Na długości każdego z odcinków zachowane były jednorodne cechy drogowe. Wybór poligonu badawczego uzależniony był przede wszystkim trzema czynnikami, tj.: spełnieniem wymogów wynikających z założeń modelu ruchu i sposobu jego wyznaczenia oraz uzyskaniem w miarę reprezentatywnych wyników badań dla całej sieci dróg w kraju.

Prawie wszystkie odcinki badawcze zlokalizowane były na dwupasowych drogach dwukierunkowych. Wyjątek stanowiły cztery z nich, które znajdowały się na drogach wielopasowych. Badania na tych czterech odcinkach obejmowały jednak tylko ruch o bardzo małej gęstości, a ich celem było uzyskanie poziomu odniesienia w opracowywanym modelu ruchu potoku i stworzenie możliwości ewentualnej, późniejszej adaptacji tego modelu dla dróg wielopasowych.

Obserwacjami objęto około 250 tysięcy pojazdów, mierząc następujące parametry ruchu:

- prędkość i czas podróży,
- odstępy czasu między pojazdami,
- strukturę rodzajową (rodzaj, markę, stopień załadowania lub napełnienia pojazdu),
- natężenie ruchu i czas podróży na kierunku przeciwbieżnym,
- liczbę wyprzedzeń (tylko na niektórych odcinkach pomiarowych),
- długości kolumn (także tylko na niektórych odcinkach pomiarowych).

Pomiary były realizowane przy gęstościach ruchu potoku od około 0 do 66 P/km · pas (w warunkach przepustowości gęstość ruchu wynosi zwykle od 20 do 40 P/km · pas).

Aby uzyskać większą liczbę prób i szerszy zakres zmienności warunków ruchu między próbnymi, na każdym z odcinków pomiarowych badania były realizowane kilkakrotnie - w różnych godzinach doby i dniach tygodnia. Liczebności poszczególnych prób były dobierane z co najmniej 15-sto minutowego nieprzerwanego czasu pomiaru, zapewniającego stabilność mierzonych parametrów ruchu [21, 23, 33, 94], oraz jednocześnie przy spełnieniu warunku statystycznie minimalnej liczebności na poziomie ufności 0,95. Praktycznie, w większości przypadków prób, liczebności były jednak dwu- lub nawet

trzykrotnie większe od liczebności statystycznie minimalnej, co dało większą dokładność odtwarzanych szczegółowych charakterystyk ruchu. Miało to przede wszystkim znaczenie dla prób o małej gęstości ruchu, w warunkach której obserwuje się duże zróżnicowanie zachowań kierowców.

OGólny opis warunków drogowych, ruchowych i pogodowych poligonu badawczego przedstawiono w tabelicy 2.1.

Tabela 2.1.

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA POLIGONU BADAWCZEGO				
Lp.	Wyszczególnienie parametrów		Zakres zmienności parametrów	
			dwupasowe drogi dwukierunkowe	drogi wielopasowe
1.	warunki drogowe	promień krzywizny drogi w planie [m]	75 + ∞	∞
2.		pochylenie podłużne [%]	-9,2 + +9,2	-3,0 + +3,0
3.		szerokość jezdni [m]	5,0 + 7,0	2 × 7,0; 2 × 10,5
4.		długość odcinka [m]	50 + 1500	50 + 300
5.		rodzaj i szerokość pobocza [m]	utwardzone 1,0 + 2,5 nieutwardzone 0,5 + 2,5	—
6.		odległość przeszkód bocznych od krawędzi jezdni [m]	0,6 + → 2,5	brak
7.		odległość widoczności powierzchni jezdni [m]	82 + → 500	→ 500
8.		lokalne ograniczenia prędk. ruchu [km/h]	brak, 50, 70	brak, 80
9.		długość odcinka z zakazem wyprzedzania [m]	0 + 2000	0
10.	warunki pogodowe	—	stonecznie, deszcz, mgła	stonecznie
11.	warunki ruchowe	natężenie ruchu [P/h] (*)	0 + 1700	ok. 0
12.		gęstość ruchu [P/km] (*)	0 + 66	ok. 0
13.		procentowy udział w potoku pojazdów ciężarowych	3 + 86	11 + 41
14.		względne obciążenie ruchem kierunku przeciwbieżnego (w stosunku do obu kierunków) [%]	11 + 88	45 + 55

(*) dane dotyczą jednego kierunku ruchu

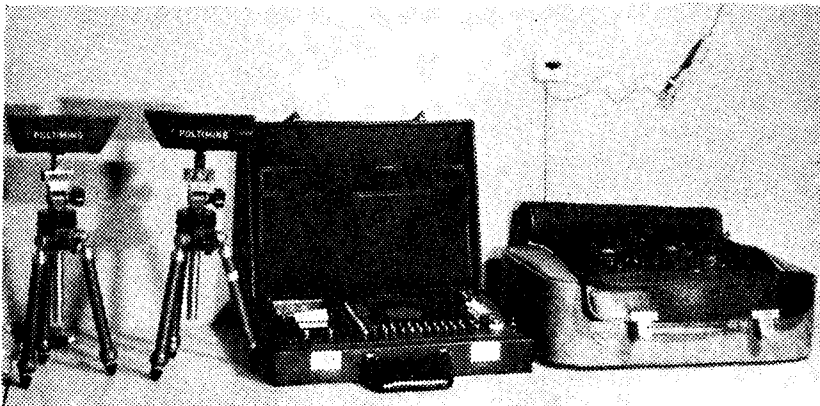
Wykonanie tak złożonego i obszernego programu badań byłoby niemożliwe bez współpracy kilku zespołów naukowo-badawczych. Autor czuje się zobowiązany wobec kolegów z Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy oraz Politechniki Gdańskiej i Politechniki Warszawskiej za współpracę w realizacji programu badawczego. Na szczególną ocenę zasługuje udział studentów, członków Kół Naukowych Inżynierii Ruchu Akademii Techniczno-Rolniczej i Politechniki Gdańskiej, którzy wykonali wiele trudnych i pracochłonnych badań terenowych.

2.3. Metody badań

W Polsce, w zakresie statycznych metod badawczych warunków ruchu drogowego, praktycznie nie stosowano do niedawna automatycznych ani półautomatycznych technik pomiarowych, co wynikało głównie z braku odpowiedniej aparatury. Początkowo więc, to jest do roku 1986, do realizacji programu badawczego niniejszej pracy wykorzystywano tzw. proste techniki pomiarowe [52]. W pomiarach zastosowano: stopery, magnetofony (do zapisu niektórych informacji), radary i kamerę filmową.

Powyższe techniki pomiarowe charakteryzują się, jak wiadomo, znacznymi kosztami wykonywania badań oraz dużą pracochłonnością przetwarzania danych (zwłaszcza za pomocą stoperów oraz kamery filmowej). Spowodowało to dodatkowe prace autora, których celem było skonstruowanie urządzenia do półautomatycznego pomiaru podstawowych cech ruchu, takich jak: prędkość, odstępy czasu i struktura rodzajowa. Dwa takie urządzenia⁽⁴⁾ autor wykonał wspólnie z kolegami z Pracowni Budownictwa Drogowego Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy oraz firmą Poltiming z Poznania w roku 1986 [48]. Od tegoż roku były one wykorzystywane przy realizacji programu badawczego niniejszej pracy. Przeszły pomyślnie próby terenowe w różnych warunkach atmosferycznych i wykazały dużą przydatność w praktyce kompleksowych badań warunków ruchu drogowego. Zaletami urządzenia są także: małe wymiary i masa, łatwość obsługi oraz szybkie instalowanie w terenie.

Urządzenie, nazwane przez autorów URD-1, składa się z następujących, zasadniczych części (fot.2.1): korpusu z pulpitem sterowniczym (rys.2.2), kompletu czujników, kabli łączących i źródła prądu stałego do zasilania pulpitu sterowniczego.

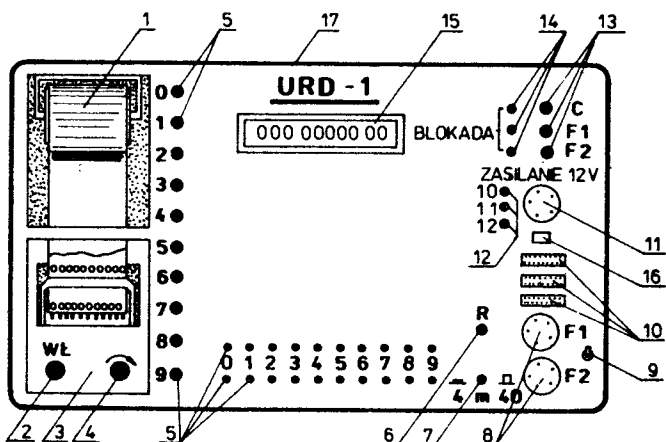


Fot.2.1. Zestaw urządzenia URD-1 do pomiaru cech ruchu drogowego

W skład korpusu wchodzi sześć zespołów: elektroniczny (do przetwarzania impulsów z czujników, obliczania czasu i prędkości), zasilania, znacznia

(4) Rozwiązania wykorzystane przy budowie tego urządzenia zostały zarejestrowane w Urzędzie Patentowym PRL w 1988 roku.

ników i przełączników, drukowania danych oraz kontroli pracy urządzenia. Zastosowany rodzaj czujników może być praktycznie dowolny. Ze względu na łatwość pozyskania i niewielkie koszty wykorzystano w badaniach jako czujniki: węże gumowe, fotokomórki oraz przyciski zwarciove.



Oznaczenia:

1- taśma papierowa, 2- wtycznik drukarki, 3- drukarka, 4- przycisk przesuwu taśmy papierowej, 5- przyciski znaczników, 6- wtycznik blokady impulsów podanych z czujników w odstępie mniejszym od ustalonego, 7- przycisk długości bazy pomiarowej, 8- gniazda podłączenia dodatkowych pulpitów znaczników, 9- przycisk przelazania czujników, 10- gniazda podłączenia dodatkowych pulpitów znaczników, 11- gniazdo zasilania, 12- lampki kontrolne zasilania, 13- przelazniki blokady czujników, 14- lampki kontrolne blokady czujników, 15- wyświetlacz cyfrowy, 16- przycisk umożliwiający pomiar tylko czasu bieżącego, 17- korpus.

Rys.2.2. Korpus z pulpitem sterowniczym urządzenia URD-1

Pomiar prędkości dokonywany jest przez urządzenie URD-1 na podstawie czasu przejazdu odcinka drogi między dwoma czujnikami. W zależności od długości tego odcinka, do badań wykorzystuje się jeden lub dwa zestawy urządzenia. Pomiar czasu jest wykonywany z dokładnością 0,001 s, natomiast prędkości (w zakresie od 15 do 150 km/h) z dokładnością 1 km/h. Obok czasu bieżącego i prędkości, które są mierzone automatycznie, rejestrować można poprzez znaczniki przyciskowe inne dowolne informacje. W badaniach wykorzystano je do zapisu danych dotyczących struktury rodzajowej pojazdów.

Opracowane urządzenie URD-1 jest jedną z pierwszych, wyjściowych wersji zestawu aparaturowego do półautomatycznego pomiaru cech ruchu drogowego w kraju, mającego jeszcze pewne wady [48]. Zapewniło ono jednak realizację znacznie szerszego programu badawczego, niż byłoby to możliwe przy zastosowaniu obecnie dostępnego w kraju sprzętu pomiarowego. Ponadto dzięki niemu uzyskano wyniki badań o większej dokładności i przy dużo mniejszych nakładach finansowych i czasowych.

3. WSTĘPNE ZAŁOŻENIA

3.1. Propozycja klasyfikacji grup rodzajowych pojazdów

Poprawne szacowanie warunków ruchu na dwupasowych drogach dwukierunkowych w Polsce wymaga sklasyfikowania pojazdów w co najmniej sześć grup rodzajowych, w tym: dwóch grup pojazdów osobowych, trzech ciężarowych i grupy pojazdów powolnych. Wniosek ten wynika z badań i analiz autora przedstawionych między innymi w pracach [82, 87, 89, 92]. Szczegółowy opis tych grup zawarto w tabelicy 3.1. Dobór grup rodzajowych pojazdów samochodowych wykonano na podstawie oceny jednorodności rodzajowej pojazdów, obejmującej analizę błędów szacowania podstawowych charakterystyk ruchu, takich jak: rozkładu prędkości, średniej prędkości i średniej gęstości ruchu [89].

W klasyfikacji pominięto pojazdy jednośladowe, bowiem uznano, że ich wpływ na warunki ruchu potoku jest nieduży. Uzasadnieniem tego założenia jest mały udział omawianych pojazdów w ruchu oraz łatwość wyprzedzania tych pojazdów w potoku (wynikająca z ich rozmiarów).

Nowym podejściem, w stosunku do dotychczasowych praktyk systematyzowania struktury rodzajowej, jest podział pojazdów osobowych na dwie grupy. O słuszności tego podziału świadczą następujące fakty:

- na drogach naszego kraju występują najliczniej dwie grupy pojazdów osobowych różniących się wyraźnie standardem, a których reprezentantami są odpowiednio: Fiat 126 P i Fiat 125 P (FSO-1500);
- udział obu grup pojazdów w potoku jest zmienny w szerokim zakresie, zarówno w czasie, jak i na poszczególnych drogach sieci [53, 87, 89];
- pojazdy obu grup rodzajowych charakteryzują się odmiennymi warunkami podróży (np. różnice średnich prędkości między pojazdami obu grup dochodzą do 25 km/h, podczas gdy między wszystkimi pojazdami ciężarowymi wynoszą maksymalnie 20 km/h [89]);
- połączenie wszystkich pojazdów osobowych w jedną grupę rodzajową prowadzi do większych błędów przy estymacji warunków ruchu, niż połączenie wszystkich pojazdów ciężarowych, łącznie z dostawczymi (potwierdzeniem tego wniosku mogą być także wyniki badań przedstawione w pracach [16, 57, 71]).

Do grupy pojazdów osobowych o tzw. niskim standardzie jazdy zaliczono również wszystkie samochody osobowe eksploatowane przez wiele lat oraz pojazdy osobowe z przyczepami. Z badań własnych oraz prac np. [16, 56] wynika, że w ruchu zamiejskim pojazdy te charakteryzują się stosunkowo niskimi prędkościami, najbardziej odpowiadającymi tej właśnie grupie rodza-

Tablica 3.1

CHARAKTERYSTYKA PRZYJĘTYCH GRUP RODZAJOWYCH POJAZDÓW									
lp	Nazwa grupy rodzajowej		Przyjęte oznaczenie	Charakterystyka grup rodzajowych			Średnia długość [m]	Przykłady pojazdów należących do danej grupy	
	ogólna	szczegółowa		Wskaźnik mocy jednostkowej	Wskaźnik efektywnej mocy jednostkowej	Średnia wartość odchył. standard.			
[—]	[—]	[—]	[—]	zakres	wartość odchył. średnia	zakres	wartość odchył. średnia stand.	[—]	
1		osobowe o średnim i wysokim standardzie jazdy	0 1	≥ 25	39,3	4,3	44,5	5,4	Fiat 125, 127, Lada Polonez, Zastawa 1100, Dacia 1300, Skoda 105 L, 105 S, 120 L S, oraz samochody osobowe marek zachodnich o średniej i wyższej pojemności silnika
2		osobowe o niskim standardzie jazdy	0 2	≤ 25	23,0	1,9	27,0	4,0	Fiat 126, Trabant, Syrena, Zastawa 750, GAZ 69, Zaporozec, Skoda Oktavia, samochody osobowe z przyczepami, małolitrażowe samochody osobowe marek zachodnich oraz wszystkie samochody osobowe eksploatowane powyżej 20 lat
3		ciężarowe lekkie	C 1	≥ 13	19,8	2,5	23,4	5,1	wszystkie pojazdy dostawcze typu Nysa, Żuk
4		ciężarowe średnie	C 2	≥ 7 ≤ 13	10,6	1,1	14,3	4,6	pojazdy ciężarowe bez przyczep, autobusy, lekkie ciągniki siodłowe
5		ciężarowe ciężkie	C 3	≤ 7	5,4	0,6	8,5	3,9	pojazdy ciężarowe z przyczepami, pozostałe ciągniki siodłowe
6		powolne	W	—	—	—	—	—	ciągniki rolnicze, pojazdy wolnobieżne, pojazdy za-przewowe

wej. Ponadto czynnikiem uzasadniającym powyższe założenie jest niewielki udział procentowy tych pojazdów w potoku.

Definicję pojazdu powolnego przyjęto na podstawie wniosków autora zawartych w pracy [92]: .. „Jest to pojazd, którego cechy konstrukcyjne uniemożliwiają rozwijanie na prostym, poziomym odcinku drogi prędkości większej od 40 km/h. Do grupy tych pojazdów zaliczamy między innymi: ciągniki rolnicze, pojazdy wolnobieżne (samobieżne maszyny budowlane, drogowe i rolnicze) oraz pojazdy zaprzęgowe”. Sklasyfikowanie pojazdów powolnych w oddzielną grupę rodzajową spowodowane było znacznym wpływem tych pojazdów na warunki ruchu potoku. Dodatkowym argumentem, potwierdzającym słuszność wydzielenia w klasyfikacji tej grupy rodzajowej, jest duży udział dwupasowych dróg dwukierunkowych w sieci drogowej i zarazem duża dostępność tych dróg dla ruchu pojazdów powolnych w Polsce [67]. Należy przy tym nadmienić, że większość stosowanych na świecie metod oceny warunków ruchu nie uwzględnia pojazdów powolnych w strukturze ruchu. Wyjątkiem są wytyczne zachodnoniemieckie [59] oraz holenderskie [58]. Przyczyny tego stanu rzeczy należy przypuszczalnie upatrywać w tym, że udział omawianych pojazdów w ruchu jest nieduży. Jednakże pojazdy powolne powinny być uwzględniane w analizach ruchu na dwupasowych drogach dwukierunkowych. Czynnikiem uzasadniającym taką konieczność jest bardzo mała ich prędkość. Nawet przy niewielkiej liczbie tych pojazdów w potoku, ich mała prędkość może spowodować wyraźny wzrost zapotrzebowania na wyprzedzanie. To z kolei, przy jakimkolwiek utrudnieniu realizacji tych manewrów, może wywołać znaczne obniżenie poziomu warunków ruchu dla wielu pojazdów potoku.

Na podstawie obserwacji autor stwierdził [92], że w przypadku bardzo małego natężenia ruchu (tj. poniżej 100 P/h) oraz pełnej możliwości wyprzedzania (dobra widoczność na wyprzedzanie oraz małe natężenie ruchu na pasie przeciwbieżnym) pojazdy powolne nie stwarzają specjalnego utrudnienia w ruchu dla innych jego uczestników. Sytuacja zmienia się jednak, gdy wzrasta natężenie na pasie analizowanym lub przeciwbieżnym, albo też, gdy warunki terenowe uniemożliwiają wyprzedzanie. Przykładowo: na prostym, poziomym odcinku dwupasowej drogi dwukierunkowej przejazd pojazdu powolnego przy natężeniu ruchu około 300 P/h. pas powodował tworzenie się kolumn do 16 pojazdów, a na odcinku z zakazem wyprzedzania - dwukrotnie większych. Nawet przy bardzo małym natężeniu ruchu, tj. około 150 P/h. pas, prawdopodobieństwo przejazdu pojazdu powolnego bez blokowania innych uczestników ruchu przez odcinek długości 1 km z zakazem wyprzedzania wynosiło zaledwie 0,28.

3.2. Charakterystyka grup rodzajowych pojazdów samochodowych

Zgodnie z zasadami teorii ruchu samochodu, o maksymalnej prędkości, zdolności przyspieszeń, czy możliwości pokonywania wzniesień decydują w głównej mierze właściwości dynamiczne pojazdu. Właściwości te najczęściej są charakteryzowane poprzez tzw. wskaźnik mocy jednostkowej M , który defi-

niowany jest jako iloraz maksymalnej mocy silnika netto⁽⁵⁾ i masy pojazdu brutto (łącznie masy własnej pojazdu oraz dopuszczalnego ładunku i napełnienia [9]).

Na podstawie analizy wyników badań obejmujących ruch swobodny na 56 różnych odcinkach dróg autor stwierdził, że wskaźnik ten rzeczywiście jest silnie skorelowany ze średnimi prędkościami pojazdów samochodowych. Współczynnik korelacji wynosił powyżej 0,95. Wskaźnik mocy jednostkowej może więc być z powodzeniem uznany za istotną z punktu widzenia warunków ruchu cechę pojazdu⁽⁶⁾. Należy jednak przy tym zaznaczyć, że stwierdzona korelacja między prędkością a wskaźnikiem M przypuszczalnie nie ma swojego podłoża tylko we wspomnianym wcześniej aspekcie teorii ruchu. Przyczyn tego zjawiska prawdopodobnie jest więcej, o czym pisze autor w pracach [83, 89]. Między innymi wpływ na nie mogą mieć także cechy psychiczne kierowców, takie jak: stopień zaspokojenia egoistycznych i hedonistycznych celów oraz poziom odczuwanego ryzyka wypadku.

Do analizy wprowadzono jednak inny miernik właściwości dynamicznych pojazdów, a mianowicie wskaźnik efektywnej mocy jednostkowej N. Wskaźnik ten został określony przez autora jako iloraz maksymalnej mocy silnika netto i efektywnej (rzeczywistej) masy pojazdu. Wprowadzono go do analizy ze względu na jego istotne znaczenie w dalszych rozważaniach, tj. przy formułowaniu modelu ruchu. Stanowi on bowiem cechę dokładniej odzwierciedlającą możliwości dynamiczne pojazdu od wskaźnika M oraz cechę łatwiejszą do matematycznego opisu. Rozkłady wskaźnika M (w odróżnieniu od wskaźnika N) w poszczególnych grupach rodzajowych są nieregularne, niekiedy nieciągłe i stąd trudne do matematycznego zdefiniowania.

Na podstawie badań przeprowadzonych na 56 odcinkach dróg stwierdzono, że między średnim wskaźnikiem efektywnej mocy jednostkowej \bar{N} a średnim wskaźnikiem mocy jednostkowej \bar{M} danej grupy rodzajowej pojazdów samochodowych j istnieje następująca zależność:

$$\bar{N}_j = 2,86 + 1,05 \cdot \bar{M}_j, \quad [W/kg]. \quad (3.1)$$

Współczynnik korelacji dla tej zależności wynosił 0,99, a średniokwadratowy błąd aproksymacji 0,27 W/kg. Powyższy związek wynika w dużej części ze stosunkowo stałej charakterystyki stopnia załadowania i napełnienia pojazdów danych grup rodzajowych na poszczególnych drogach kraju.

Największy wpływ wskaźników N i M na warunki ruchu występuje w wypadku bardzo małej gęstości ruchu. Wynika to z faktu, że na proces ruchu oddziałują wówczas głównie tylko cechy drogi, w związku z czym kierowcy

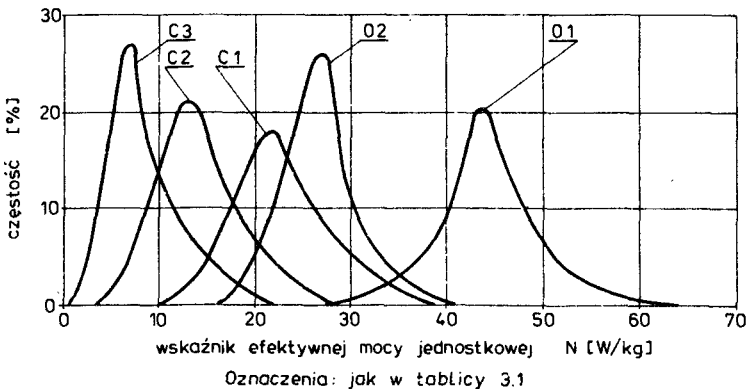
(5) Moc silnika przy największej prędkości obrotowej oraz przy danych, innych warunkach pracy ustalonych odpowiednimi normami [9]. Wartość tej mocy podawana jest przez producenta.

(6) Wskaźnik stanowiący odwrotność wskaźnika mocy jednostkowej został wykorzystany jako miernik klasyfikacji rodzajowej pojazdów ciężarowych w nowym wydaniu amerykańskiej metody HCM-85 [28].

mają dużą możliwość wyboru prędkości jazdy, a tym samym wykorzystania właściwości dynamicznych swoich pojazdów. Natomiast w miarę zwiększania się gęstości ruchu warunki ruchu są w coraz większym stopniu utrudniane dodatkowo poprzez innych użytkowników drogi. Stąd właściwości dynamiczne pojazdów mają coraz mniejszy wpływ na wybór przez kierowców prędkości jazdy.

Jak wykazały wyniki badań autora, przedstawione w pracach [86, 89], inną cechą pojazdów mającą istotny wpływ na warunki ruchu, obok właściwości dynamicznych, jest długość L . Cecha ta wpływa jednak wyraźnie na warunki ruchu dopiero w ruchu wymuszonym - ruchu determinowanym głównie innymi pojazdami potoku. Wówczas bowiem bardzo silnie oddziałuje ona na gęstość ruchu. Oddziaływanie to jest największe w przypadku stanu zatoru, w którym to o gęstości ruchu na danym odcinku drogi decydują prawie wyłącznie długości pojazdów w potoku.

W tabelicy 3.1 przedstawiono charakterystykę przyjętych grup rodzajowych pojazdów samochodowych, wykonaną na podstawie wyników badań autora. Dotyczy ona omawianych cech pojazdów M, N i L. Charakterystykę grup rodzajowych w aspekcie wskaźnika efektywnej mocy jednostkowej N ilustruje także rysunek 3.1.



Rys.3.1. Rozkłady wskaźnika efektywnej mocy jednostkowej pojazdów samochodowych w poszczególnych grupach rodzajowych

3.3. Ogólna koncepcja wyznaczenia modelu ruchu potoku

Najczęściej za podstawowy miernik warunków ruchu na drogach zamieszkanych przyjmuje się średnią prędkość potoku, natomiast za uzupełniający - natężenie lub gęstość ruchu [10,81].

Średnia prędkość jest zapewne czułym i dobrym miernikiem warunków ruchu, jednakże charakteryzować może tylko przeciętny poziom zachowań kierowców w danej populacji [11, 37], bowiem możliwość dokładniejszej oceny warunków ruchu stwarza dopiero znajomość prędkości wszystkich pojazdów, a więc całego ich rozkładu. Dzięki odpowiednim korelacjom rozkład ten moż-

liwia także wyznaczenie dalszych mierników warunków ruchu, takich jak: praca przewozowa [93, 95, 98], straty czasu [18, 41], czas blokowania [28], koszty ruchu [73], szum przyspieszeń [79, 108] itp.

W związku z powyższą argumentacją w proponowanym modelu ruchu potoku przyjęto za podstawowe funkcje, obok wartości średnich, dodatkowe parametry rozkładu prędkości. W przypadku ruchu swobodnego parametrem takim jest odchylenie standardowe. Jego znajomość i wartości średniej umożliwia odtworzenie prędkości wszystkich pojazdów. Natomiast w przypadku ruchu nieswobodnego, ze względu na złożony charakter rozkładu prędkości, konieczne jest stosowanie innych parametrów, takich jak wybrane kwantyle.

Za ruch swobodny uznano w niniejszej pracy ruch pojazdów, na który nie mają wpływu inni użytkownicy drogi z wyjątkiem pojazdów potoku przeciwniebnego. W przypadku istnienia tego wpływu ruch pojazdów przyjęto nazywać ruchem nieswobodnym [90].

Jak wynika z dotychczasowych rozważań autora, opis powyższych funkcji prędkości wymaga uwzględnienia, obok gęstości lub natężenia oraz cech drogi i struktury kierunkowej ruchu, również kilku zmiennych niezależnych reprezentujących strukturę rodzajową pojazdów (udział w potoku poszczególnych grup rodzajowych). Wobec tego szukanie postaci modelu poprzez wykonanie bezpośrednio analizy regresji wielowymiarowej przy wszystkich wymienionych zmiennych niezależnych byłoby oczywiście mało realne, głównie ze względu na liczbę i zakres koniecznych do przeprowadzenia badań.

Proponowana w pracy koncepcja rozwiązania polega na etapowym opracowaniu modelu ruchu potoku. Celem tego etapowego postępowania jest przede wszystkim kumulowanie określonych grup zmiennych niezależnych, dające w efekcie mniejszy liczbowo ich zbiór przy kolejnym kroku analizy. Dzięki temu poszukiwanie zasadniczej zależności modelu ruchu potoku, tj. między średnią prędkością (lub innym parametrem rozkładu prędkości) a cechami ruchu i drogi, może odbywać się przy znacznie ograniczonej liczbie zmiennych niezależnych.

W proponowanym opracowaniu modelu ruchu potoku można wyróżnić trzy ogólne bloki, tj. dotyczące: ruchu swobodnego, nieswobodnego i stanu zatoru.

Podstawą opisu ruchu swobodnego jest zależność $\bar{V}_j = f(\bar{N}_j)$ - między średnią prędkością i średnim wskaźnikiem efektywnej mocy jednostkowej pojazdów samochodowych danej grupy rodzajowej. Umożliwia ona, przy określonych cechach drogi i ruchu, wyznaczenie parametrów rozkładu prędkości pojazdów potoku i pojazdów poszczególnych grup rodzajowych.

Opis stanu zatoru przeprowadzony jest za pomocą funkcji maksymalnej gęstości (średniej gęstości w warunkach zatoru), na którą to wartość wpływ mają także cechy drogi oraz udział w potoku poszczególnych grup rodzajowych. Zgodnie z wcześniejszymi założeniami warunki ruchu w stanie zatoru nie są przedmiotem modelu. Funkcja maksymalnej gęstości pełni w nim tylko rolę uzupełniającą.

Wyznaczenie modelu ruchu nieswobodnego jest dokonywane po uprzednim zdefiniowaniu dwóch pozostałych bloków (ruchu swobodnego i stanu zatoru). Parametry rozkładu prędkości pojazdów potoku wyznaczone są tutaj w zależności od wskaźnika zapotrzebowania na wyprzedzenie, określanego na podstawie modelu ruchu swobodnego, wskaźnika możliwości wyprzedzenia, gęstości ruchu i gęstości maksymalnej. Natomiast w celu wyznaczenia parametrów rozkładów prędkości pojazdów poszczególnych grup rodzajowych wykorzystywana jest, podobnie jak w ruchu swobodnym, zależność między prędkością i wskaźnikiem efektywnej mocy jednostkowej pojazdów.

4. OPIS RUCHU SWOBODNEGO

4.1. Charakter rozkładu prędkości pojazdów w potoku

Rozkład zmiennej losowej prędkości pojazdów potoku w wielu pracach przyjmowany jest jako pojedynczy rozkład dwu-, a czasem nawet jednoparametryczny [39, 103]. Z analiz przeprowadzonych przez autora wynika, że podejście takie, zwłaszcza w odniesieniu do warunków ruchu swobodnego, obarczone może być dużym błędem. Spowodowane jest to faktem, że w składzie potoku występują pojazdy o odmiennych cechach konstrukcyjnych i dynamicznych, które w ruchu swobodnym poruszają się w zróżnicowany sposób (patrz rozdział 3). Poszukiwania teoretycznego rozkładu prędkości o trzech i więcej parametrach okazały się mało efektywne, ponieważ takie parametry jak np. współczynnik asymetrii czy ekscesu nie wykazywały korelacji z warunkami ruchu [39]. Statystyczne testy zgodności χ^2 i Λ -Kołmogorowa wykazały natomiast pozytywny wynik, we wszystkich analizowanych przypadkach, przy opisanu pojedynczym rozkładem normalnym prędkości ruchu swobodnego pojazdów każdej, ustalonej wcześniej, grupy rodzajowej (wartości badanych statystyk były znacznie mniejsze od statystyk krytycznych). Rozpatrywano przy tym około 80 odcinków dróg o różnym przekroju poprzecznym, podłużnym i planie sytuacyjnym.

Powyższe wyniki analizy nasunęły autorowi myśl, aby w przypadku ruchu swobodnego funkcję gęstości zmiennej losowej prędkości V pojazdów potoku zapisać jako splot pojedynczych rozkładów normalnych:

$$f(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^6 \frac{p_i}{S_i} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{V - \bar{V}_i}{S_i} \right)^2 \right], \quad (4.1)$$

gdzie:

p_i - prawdopodobieństwo wystąpienia i -tej grupy rodzajowej w potoku pojazdów,

\bar{V}_i - średnia prędkość pojazdów i -tej grupy rodzajowej, [km/h],

S_i - odchylenie standardowe prędkości pojazdów grupy rodzajowej i , [km/h].

Podstawowe parametry tego rozkładu, tj. wartość oczekiwaną \bar{V} i odchylenie standardowe S , określają następujące wzory:

$$\bar{V} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(V) \cdot V \cdot dV = \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{i=1}^6 [p_i \cdot f(V)_i] \cdot V \cdot dV,$$

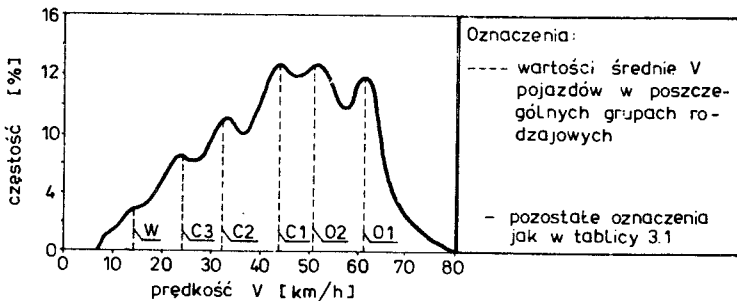
$$S = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(v) \cdot (v - \bar{v})^2 \cdot dv \right]^{0,5} = \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{i=1}^6 [p_i \cdot f(v)_i] \cdot (v - \bar{v})^2 \cdot dv \right\}^{0,5},$$

które po przekształceniu przybiorą postać

$$\bar{v} = \sum_{i=1}^6 p_i \cdot \bar{v}_i, \quad [\text{km/h}], \quad (4.2)$$

$$S = \left[-\bar{v}^2 + \sum_{i=1}^6 p_i \cdot (\bar{v}_i^2 + S_i^2) \right]^{0,5}, \quad [\text{km/h}]. \quad (4.3)$$

Ilustracją powyższych zależności jest rysunek 4.1, na którym przedstawiono rozkład prędkości pojazdów potoku w ruchu swobodnym uzyskany z badań na jednym z odcinków pomiarowych. Widać wyraźnie, że rozkład ten jest wielomodalny, stanowiący sumę sześciu rozkładów jednomodalnych.



Rys. 4.1. Rozkład prędkości pojazdów potoku w ruchu swobodnym na wzniesieniu 5% dwukierunkowej

4.2. Metoda szacowania średniej prędkości pojazdów potoku oraz poszczególnych grup rodzajowych

Przeprowadzona przez autora analiza wyników badań wykazała, że istnieje ścisła zależność między średnią prędkością ruchu swobodnego na danym odcinku drogi, a średnim wskaźnikiem efektywnej mocy jednostkowej pojazdów samochodowych danej grupy rodzajowej (por. rozdział 3). Na podstawie aproksymacji wyników badań pochodzących z 56 różnych pod względem geometrycznym odcinków dróg stwierdzono, że funkcją poprawnie opisującą powyższą zależność jest parabola drugiego stopnia. Średniokwadratowe błędy aproksymacji nie przekraczały wartości 1,5 km/h. Średnią prędkość pojazdów samochodowych j-tej grupy rodzajowej na danym odcinku drogi można więc przedstawić następująco:

$$\bar{v}_j = A_1 \cdot \bar{N}_j^2 + A_2 \cdot \bar{N}_j + A_3, \quad (4.4)$$

gdzie:

- \bar{N}_j - średni wskaźnik efektywnej mocy jednostkowej pojazdów samochodowych j-tej grupy rodzajowej (por. tablica 3.1) [W/kg],
 A_1, A_2, A_3 - współczynniki równania zależne od cech drogi, warunków atmosferycznych i gęstości ruchu przeciwbieżnego.

Na podstawie aproksymacji wyników badań stwierdzono również, że funkcja (4.4) jest w zakresie realnych (praktycznie występujących) wartości zmiennych funkcją rosnącą. Największe wartości tej funkcji układają się poza tym realnym zakresem wartości zmiennych, jednakże w ściśle określonym obszarze. Ustalając ten obszar określono początkowo współczynniki równania A_1, A_2 i A_3 w 56 analizowanych przypadkach. Następnie dla każdego z otrzymanych równań wyznaczono położenie punktu maksimum $[\bar{v}_{j \max}, \bar{N}_{j \max}]$ na podstawie warunku:

$$\frac{\partial \bar{v}_j}{\partial \bar{N}_j} = 2 \cdot A_1 \cdot \bar{N}_{j \max} + A_2 = 0 \quad (4.5)$$

i przy spełnionej nierówności:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{N}_j} \left(\frac{\partial \bar{v}_j}{\partial \bar{N}_j} \right) = 2 \cdot A_1 < 0 .$$

Stąd

$$\begin{cases} \bar{v}_{j \max} = - \frac{(A_2)^2}{4 \cdot A_1} + A_3 , \\ \bar{N}_{j \max} = - \frac{A_2}{2 \cdot A_1} . \end{cases} \quad (4.6)$$

Uzyskany zbiór punktów $[\bar{v}_{j \max}, \bar{N}_{j \max}]$ poddano kolejnej analizie regresji i korelacji poszukując izolinii największych wartości funkcji (4.4). Najmniejsze błędy aproksymacji otrzymano przy określeniu tej izolinii poprzez dwie przecinające się funkcje prostoliniowe o postaci:

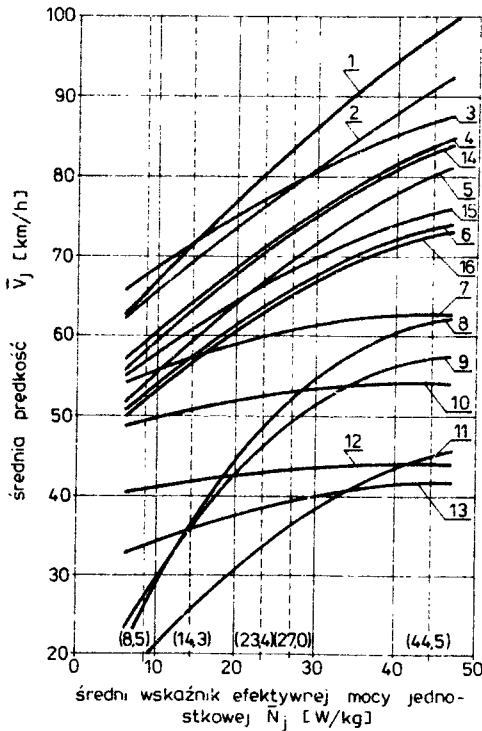
$$\bar{v}_{j \max} = \begin{cases} 0,8 \cdot \bar{N}_{j \max} + 26,1 & \text{przy } \bar{N}_{j \max} > 44,9875 \approx 45 \text{ W/kg} , \\ 161,1 \bar{N}_{j \max} - 7185,4 & \text{przy } \bar{N}_{j \max} \leq 44,9875 \approx 45 \text{ W/kg} \end{cases} \quad (4.7)$$

Średniokwadratowe błędy aproksymacji wynosiły odpowiednio: 3,63 km/h i 0,60 W/kg, a współczynniki korelacji: 0,95 i 0,10 (mała wartość ostatniego współczynnika wynika z faktu quasirównoległości funkcji do osi $\bar{v}_{j \max}$).

Wyznaczone położenie największych wartości funkcji (4.4) umożliwiło, po wykorzystaniu wzoru (4.6), zdefiniowanie współczynnika A_3 :

$$A_3 = \begin{cases} \frac{A_2}{4 \cdot A_1} \cdot (A_2 - 1,6) + 26,1 & \text{przy } A_2/A_1 < -89,975 \approx -90, \\ \frac{A_2}{4 \cdot A_1} \cdot (A_2 - 322,2) - 7185,4 & \text{przy } A_2/A_1 \geq -89,975 \approx -90. \end{cases} \quad (4.8)$$

Fakt ten ma bez wątpienia duże znaczenie praktyczne, ponieważ do jednoznacznego określenia funkcji (4.4) - a tym samym warunków ruchu swobodnego - wystarczy teraz znajomość tylko dwóch współczynników równania, tj. A_1 i A_2 . Na rysunku 4.2 oraz w tabelicy 4.1 przedstawiono wybrane wyniki analizy tej funkcji.



Oznaczenia jak w tabelicy 4.1

Rys.4.2. Zależność między średnią prędkością a średnim wskaźnikiem efektywnej mocy jednostkowej pojazdów danej grupy rodzajowej w wybranych przypadkach cech drogi i ruchu

Należy zaznaczyć, że punkt rozgraniczający stosowalność obu wyrażeń zależności (4.8) odpowiada $\bar{v}_{j, \max} = 62,1$ km/h, co z pewnym przybliżeniem można także zapisać jako $\bar{v}_{01} \approx 62$ km/h (\bar{v}_{01} - średnia prędkość pojazdów grupy rodzajowej 01).

Tablica 4.1

WYBRANE WYNIKI ANALIZY FUNKCJI $\bar{V} = f(\bar{N})$						
Lp.	Opisna charakterystyka odcinka drogi	Współczynniki równania			Współczynnik korelacji	Średniokwadratowy błąd aproksymacji [km/h]
		A1	A2	A3		
1	prosty, poziomy odcinek wewnętrznej pasa ruchu drogi dwujezdniowej, czteropasowej	-0,004360	1,1040	57,45	0,99	1,26
2	prosty, poziomy odcinek zewnętrznej pasa ruchu drogi dwujezdniowej, czteropasowej	-0,004930	0,9780	56,96	0,99	1,01
3	prosty, poziomy odcinek wewnętrznej pasa ruchu drogi dwujezdniowej, sześciopasowej z ograniczeniem prędkości do 80 km/h	-0,004530	0,7750	61,36	0,98	0,72
4	prosty, poziomy odcinek dwupasowej drogi dwukierunkowej z pobocznymi utwardzonymi	-0,005920	1,0020	51,39	0,99	1,20
5	prosty, poziomy odcinek dwupasowej drogi dwukierunkowej o szerokości jezdni 5,0 m	-0,007200	1,0990	45,21	0,99	0,76
6	j.w. lecz o szerokości jezdni 7,0 m, w warunkach deszczu	-0,008030	1,0040	44,73	0,99	0,49
7	tuk R=150 m na spadku o nachyleniu 5,0% - dwupasowa droga dwukierunkowa o szerokości jezdni 7,0 m	-0,005580	0,5100	51,00	0,96	0,38
8	j.w. lecz na wzniesieniu 5,0%	-0,026570	2,3904	7,64	0,96	0,42
9	wzniesienie o nachyleniu 7,0% na dwupasowej drodze dwukierunkowej o szerokości jezdni 7,0 m, w warunkach deszczu	-0,022610	2,0330	11,51	0,97	0,40
10	prosty, poziomy odcinek dwupasowej drogi dwukierunkowej o szerokości jezdni 7,0 m, w warunkach bardzo dużego natężenia ruchu przeciwbieżnego	-0,003729	0,3352	46,69	0,97	0,13
11	tuk R=75 m na wzniesieniu o nachyleniu 9,2% - dwupasowa droga dwukierunkowa o szerokości jezdni 7,0 m	-0,020427	1,8335	3,64	0,98	0,64
12	j.w. lecz na spadku	-0,0023855	0,2141	39,11	0,96	0,43
13	tuk R=75 m na spadku o nachyleniu 3% - dwupasowa droga dwukierunkowa o szerokości jezdni 7,0 m (w obszarze dużego miasta)	-0,005977	0,5363	29,36	0,96	0,60
14	prosty, poziomy odcinek dwupasowej drogi dwukierunkowej o szerokości jezdni 7,0 m i poboczu gruntowym szerokości 1,5 - 2,0 m	-0,006220	1,0260	49,78	0,99	0,73
15	tuk poziomy o promieniu R=480 m - dwupasowa droga dwukierunkowa o szerokości jezdni 7,0 m	-0,006680	0,8710	49,87	0,99	0,86
16	prosty, poziomy odcinek dwupasowej drogi dwukierunkowej o szerokości jezdni 7,0 m, z przeszkodami bocznymi w odległości 0,50 m	-0,008390	1,0236	43,69	0,99	0,53

Funkcja (4.4) umożliwia wyznaczenie średniej prędkości pojazdów samochodowych dowolnej grupy rodzajowej, nie dotyczy natomiast grupy pojazdów powolnych. Jednak, ponieważ jednoznacznie odwzorowuje ona warunki ruchu, stąd za pomocą jej współczynników, tj. A1, A2 i A3, można również określić średnią prędkość pojazdów powolnych. Wykorzystując wyniki badań autora za-

warte w pracy [92], ustalono na podstawie regresji i korelacji, że prędkość tę można przedstawić następująco:

$$\bar{V}_W = 2 \cdot A_2 + 0,23 \cdot A_3 + 12,4, \quad [\text{km/h}]. \quad (4.9)$$

W obliczeniach tych średniokwadratowy błąd aproksymacji wyniósł 0,58 km/h, a współczynnik korelacji 0,94. Do analizy wzięto wyniki z 23 różnych odcinków dróg.

Ostatecznie więc, wykorzystując zależności (4.4), (4.9) oraz (4.2), średnią prędkość pojazdów potoku w ruchu swobodnym określono wzorem:

$$\begin{aligned} \bar{V} = A_1 \cdot \sum_{j=1}^5 p_j \cdot \bar{N}_j^2 + A_2 \cdot \left(2 \cdot p_W + \sum_{j=1}^5 p_j \cdot \bar{N}_j \right) + \\ + A_3 \cdot (1 - 0,77 \cdot p_W) + 12,4 \cdot p_W. \end{aligned} \quad (4.10)$$

gdzie:

A_3 - według wzoru (4.8),

p_W - prawdopodobieństwo wystąpienia pojazdów powolnych w potoku,

p_j - prawdopodobieństwo wystąpienia pojazdów samochodowych grupy rodzajowej j w potoku.

4.3. Metoda szacowania odchylenia standardowego prędkości

Zgodnie z wcześniejszym stwierdzeniem, charakter rozkładu prędkości w ruchu swobodnym pojazdów każdej przyjętej grupy rodzajowej można uznać za normalny. Do jednoznacznego więc opisanego każdego z tych rozkładów, obok znajomości ich charakteru i wartości oczekiwanej, istotna jest jeszcze znajomość rozproszenia - odchylenia standardowego.

Rozproszenie prędkości pojazdów w danej grupie rodzajowej na dowolnym odcinku drogi w ruchu swobodnym zależeć będzie głównie od dwóch czynników, tj. losowości zachowań kierowców oraz zróżnicowania klas pojazdów w ramach tej grupy. Aby uwzględnić wpływ pierwszego czynnika, najłatwiej jest przeanalizować rozkłady prędkości pojazdów o zbliżonym wskaźniku efektywnej mocy jednostkowej N , które można by nazwać umownie jednorodnymi. W ten sposób w pierwszej fazie analizy wyeliminuje się wpływ drugiego czynnika na wartość szukanego odchylenia standardowego prędkości.

Analizę taką przeprowadzono w 20 jednorodnych grupach rodzajowych pojazdów samochodowych (liczba badanych odcinków wynosiła 56, zaś minimalna liczebność próby 50). Przeprowadzono ją oddzielnie dla pojazdów osobowych i ciężarowych, co umożliwiło większą dokładność aproksymacji wyników badań. Analiza ta wykazała, że odchylenie standardowe prędkości pojazdów samochodowych jednorodnej grupy rodzajowej zależy przede wszystkim od ich prędkości średniej. W przypadku dwupasowych dróg dwukierunkowych można je, z wystarczająco dużą dokładnością, opisać następującymi funkcjami:

$$S_{ij} = \begin{cases} 0,0262 \cdot \bar{v}_{ij}^{1,4} & \text{- pojazdy osobowe ,} \\ 0,196 \cdot \bar{v}_{ij}^{0,9} & \text{- pojazdy ciężarowe ,} \end{cases} \quad (4.11)$$

gdzie:

S_{ij}, \bar{v}_{ij} - odchylenie standardowe prędkości oraz średnia prędkość 1-tej jednorodnej grupy pojazdów w j-tej grupie rodzajowej, [km/h].

Funkcje te zostały określone przy średniokwadratowym błędzie aproksymacji: 0,21 km/h - dla pojazdów osobowych i 0,16 km/h - dla pojazdów ciężarowych (współczynniki korelacji równe były około 0,99).

Jak wiadomo z wcześniejszych rozważań (patrz rys.3.1), przyjęte grupy rodzajowe pojazdów samochodowych nie są idealnie jednorodne, ponieważ każda z nich charakteryzuje się pewnym rozrzutem wartości wskaźnika N. Zgodnie więc ze wzorem (4.3) na spłot rozkładów, wartość wariancji prędkości j-tej grupy rodzajowej pojazdów samochodowych zapisano następująco:

$$S_j^2 = \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot (\bar{v}_{ij}^2 + S_{ij}^2) - \bar{v}_j^2, \quad (4.12)$$

gdzie:

p_{ij} - prawdopodobieństwo wystąpienia i-tej jednorodnej grupy pojazdów w j-tej grupie rodzajowej pojazdów,
 m - liczba grup pojazdów jednorodnych w j-tej grupie rodzajowej.

Zakładając wstępnie dla uproszczenia pierwszego etapu rozważań, że w zakresie danej każdej grupy rodzajowej pojazdów samochodowych funkcje $\bar{v}_{ij}(N_i)$ oraz $S_{ij}(N_i)$ są funkcjami ciągłymi o następującej postaci (patrz rys.4.2 oraz wzór (4.11)):

$$\bar{v}_{ij} \approx a_j + b_j \cdot N_i, \quad (4.13)$$

$$S_{ij} \approx c_j \cdot \bar{v}_{ij} \approx c_j \cdot (a_j + b_j \cdot N_i), \quad (4.14)$$

gdzie:

a_j, b_j, c_j - współczynniki równania,
 N_i - wskaźnik efektywnej mocy jednostkowej i-tej jednorodnej grupy pojazdów, [W/kg],

można napisać:

$$\begin{aligned} S_j^2 &= \int_{-\infty}^{+\infty} f_j(N_i) \cdot (\bar{v}_{ij}^2 + S_{ij}^2) \cdot dN_i - \bar{v}_j^2 = \\ &= (1 + c_j^2) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f_j(N_i) \cdot (a_j + b_j \cdot N_i)^2 \cdot dN_i - \bar{v}_j^2, \end{aligned} \quad (4.15)$$

gdzie:

$f_j(N_1)$ - funkcją prawdopodobieństwa wystąpienia pojazdów o wskaźniku efektywnej mocy jednostkowej N_1 w grupie rodzajowej j (patrz rys.3.1 i tablica 3.1).

Obliczenie całki w powyższym wyrażeniu przeprowadzono następująco:

$$\begin{aligned}
 & \int_{-\infty}^{+\infty} f_j(N_1) \cdot (a_j + b_j \cdot N_1)^2 \cdot dN_1 = a_j^2 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f_j(N_1) \cdot dN_1 + \\
 & + b_j^2 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f_j(N_1) \cdot N_1^2 \cdot dN_1 + 2 \cdot a_j \cdot b_j \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f_j(N_1) \cdot N_1 \cdot dN_1 = \\
 & = a_j^2 + 2 \cdot a_j \cdot b_j \cdot \bar{N}_j + b_j^2 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f_j(N_1) \cdot N_1^2 \cdot dN_1 = \\
 & = a_j^2 + 2 \cdot a_j \cdot b_j \cdot \bar{N}_j + b_j^2 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f_j(N_1) \cdot [(N_1 - \bar{N}_j)^2 - \bar{N}_j^2 + \\
 & + 2 \cdot N_1 \cdot \bar{N}_j] \cdot dN_1 = a_j^2 + 2 \cdot a_j \cdot b_j \cdot \bar{N}_j + \\
 & + b_j^2 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f_j(N_1) \cdot (N_1 - \bar{N}_j)^2 \cdot dN_1 - b_j^2 \cdot \bar{N}_j^2 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f_j(N_1) \cdot dN_1 + \\
 & + 2 \cdot b_j^2 \cdot \bar{N}_j \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f_j(N_1) \cdot N_1 \cdot dN_1 = a_j^2 + 2 \cdot a_j \cdot b_j \cdot \bar{N}_j + \\
 & + b_j^2 \cdot SN_j^2 - b_j^2 \cdot \bar{N}_j^2 + 2 \cdot b_j^2 \cdot \bar{N}_j^2 = (a_j + b_j \cdot \bar{N}_j)^2 + b_j^2 \cdot SN_j^2 = \\
 & = \bar{V}_j^2 + b_j^2 \cdot SN_j^2
 \end{aligned}$$

Podstawiając tak określoną wartość całki do wzoru (4.15) otrzymano:

$$S_j^2 = (1 + c_j^2) \cdot (\bar{V}_j^2 + b_j^2 \cdot SN_j^2) - \bar{V}_j^2,$$

gdzie:

SN_j - odchylenie standardowe wskaźnika N w j -tej grupie rodzajowej pojazdów (patrz tablica 3.1), [W/kg].

Stąd:

$$S_j^2 = (c_j \cdot \bar{V}_j)^2 + (1 + c_j^2) \cdot b_j^2 \cdot SN_j^2, \quad (4.16)$$

Ze względu na dokonane założenia (4.13) i (4.14) równanie (4.16) zostało określone z pewnym przybliżeniem. Uproszczone tok postępowania dał jednak możliwość sformułowania ogólnego charakteru funkcji S_j , a tym samym ułatwienie poszukiwań jej ostatecznej postaci. Można zauważyć, że wielkość c_j jest pochodną funkcji $S_{1j}(\bar{v}_{1j})$, natomiast b_j - pochodną funkcji $\bar{v}_{1j}(N_1)$. Pierwsza z tych wielkości równa jest także współczynnikowi zmienności $c_j = S_{1j}/\bar{v}_{1j}$. Przyjmując więc na podstawie wzoru (4.5):

$$b_j = 2 \cdot A_1 \cdot \bar{N}_j + A_2$$

oraz na podstawie pracy [85]:

$$c_j = \text{const},$$

wzór na wartość wariancji prędkości pojazdów samochodowych przedstawiono następująco:

$$S_j^2 = [S_{1j}(\bar{v}_{1j} = \bar{v}_j)]^2 + A \cdot [(2 \cdot A_1 \cdot \bar{N}_j + A_2) \cdot SN_j]^2, \quad (4.17)$$

gdzie:

A - współczynnik równania.

Ostatni etap poszukiwań postaci funkcji odchylenia standardowego polegał na oszacowaniu współczynnika A równania (4.17) na podstawie wyników badań ruchu, przy minimalizacji błędów aproksymacji wielkości S_j . Analizę regresji wykonano metodą kompromisu Marquardta. W przypadku dwupasowych dróg dwukierunkowych, po uprzednim wykorzystaniu zależności (4.11), uzyskano ostatecznie następującą postać funkcji wyrażającej wartość odchylenia standardowego prędkości pojazdów samochodowych grupy rodzajowej j:

$$S_j = \begin{cases} \left\{ 0,000686 \cdot \bar{v}_j^{2,8} + 1,20 \cdot [(2 \cdot A_1 \cdot \bar{N}_j + A_2) \cdot SN_j]^2 \right\}^{0,5} & \text{- pojazdy osobowe,} \\ \left\{ 0,0384 \cdot \bar{v}_j^{1,8} + 1,20 \cdot [(2 \cdot A_1 \cdot \bar{N}_j + A_2) \cdot SN_j]^2 \right\}^{0,5} & \text{- pojazdy ciężarowe.} \end{cases} \quad (4.18)$$

Średniokwadratowy błąd aproksymacji wynosił odpowiednio: 0,32 km/h i 0,21 km/h, zaś współczynnik korelacji powyżej 0,98 (liczba analizowanych prób wynosiła: 42 - dla pojazdów osobowych i 47 - dla pojazdów ciężarowych).

W przypadku pojazdów powolnych, zgodnie z wynikami badań autora przedstawionymi w pracy [92], odchylenie standardowe można uznać w przybliżeniu jako stałe, niezależnie od cech drogi, o wartości:

$$S_w = 4,0 \text{ km/h} = \text{const}. \quad (4.19)$$

Wykorzystując więc równania (4.3) oraz (4.18) i (4.19) odchylenie standardowe prędkości pojazdów potoku w ruchu swobodnym na dwupasowej drodze dwukierunkowej wyrażono wzorem:

$$\begin{aligned}
 S = & \left\{ 0,000686 \cdot (P_{01} \cdot \bar{v}_{01}^{2,8} + P_{02} \cdot \bar{v}_{02}^{2,8}) + 0,0384 \cdot (P_{C1} \cdot \bar{v}_{C1}^{1,8} + \right. \\
 & + P_{C2} \cdot \bar{v}_{C2}^{1,8} + P_{C3} \cdot \bar{v}_{C3}^{1,8}) + P_w \cdot (\bar{v}_w^2 + 16) + \\
 & \left. + \sum_{j=1}^5 P_j \cdot [\bar{v}_j^2 + 1,20 \cdot SN_j^2 \cdot (2 \cdot A_1 \cdot \bar{N}_j + A_2)^2] - \bar{v}^2 \right\}^{0,5},
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

gdzie:

$P_{01}, P_{02}, P_{C1}, P_{C2}, \dots$ - prawdopodobieństwo wystąpienia w potoku pojazdów odpowiednich grup rodzajowych: 01,02,C1, C2, ... - oznaczenia jak w tabelicy 3.1,

$\bar{v}_{01}, \bar{v}_{02}, \bar{v}_{C1}, \bar{v}_{C2}, \dots$ - średnia prędkość w ruchu swobodnym na danym odcinku drogi pojazdów odpowiednich grup rodzajowych: 01,02,C1,C2, ... - wg wzoru (4.4).

4.4. Ocena dokładności szacowania parametrów rozkładów prędkości

Ocenę poprawności przedstawionego w pracy modelu ruchu swobodnego przeprowadzono dwoma sposobami, poprzez:

- określenie przeciętnych błędów szacowania wybranych parametrów rozkładu prędkości,
- sprawdzenie zgodności modelowego rozkładu prędkości z empirycznym.

W przypadku pierwszego sposobu wybrano do testowania następujące parametry rozkładu: wartość oczekiwaną, odchylenie standardowe oraz kwantyle: 85% (15%), 95% (5%) i 98% (2%). Testowaniu poddano zarówno pojedyncze rozkłady, odnoszące się do poszczególnych grup rodzajowych, jak i rozkłady prędkości potoków. W analizie wykorzystano wyniki badań z 50 odcinków dróg o różnej charakterystyce cech drogowych i ruchowych. Ponadto wykorzystano specjalnie opracowany program obliczeń komputerowych, ustalający współczynniki regresji funkcji (4.4) metodą najmniejszych kwadratów przy zadanym warunku (4.8) [50]. Błędy szacowania wybranych parametrów wyznaczono na podstawie uzyskanych funkcji prawdopodobieństwa wartości reszt, tj. różnic wartości empirycznych i teoretycznych. Za błąd przeciętny uznano odchylenie standardowe tej funkcji, czyli tzw. średniokwadratowy błąd aproksymacji. Natomiast za błąd maksymalny uznano jej 97,5 %-owy kwantyl, który równy jest w przybliżeniu dwukrotnej wartości błędu przeciętnego. Założenie to odpowiada przyjęciu poziomu istotności 0,05, tzn. dopuszczeniu w 5 % przypadków wystąpienia błędów większych od wartości maksymalnych.

Wyniki powyższej analizy ilustruje tablica 4.2. Jak widać wszystkie wartości przeciętnych błędów zamieszczone w tabelicy można uznać za małe, mieszczące się w zakresie dokładności obecnie stosowanych metod pomiarowych. Błędy maksymalne przyjmują także wartości dopuszczalne.

Tablica 4.2

ŚREDNIE BŁĘDY SZACOWANIA PARAMETRÓW ROZKŁADÓW PRĘDKOŚCI POJAZDÓW W RUCHU SWOBODNYM [km/h]					
Grupa rodzajowa	Parametry rozkładu prędkości				
	wartość oczekiwana	odchylenie standardowe	kwantyl 85% (15%)	kwantyl 95% (5%)	kwantyl 98% (2%)
O 1	0,46	0,54	0,72	1,00	1,20
O 2	0,70	0,50	0,87	1,08	1,24
C 1	1,28	0,48	1,37	1,50	1,62
C 2	0,66	0,45	0,81	0,99	1,14
C 3	0,66	0,41	0,78	0,94	1,07
W	0,58	0,36	0,69	0,83	0,94
POTOK	0,31	0,41	0,53	0,74	0,90

Zgodność rozkładów empirycznych i teoretycznych analizowano stosując testy istotności χ^2 i λ -Kolmogorowa. Dla zbadanych 91 zbiorów danych, obejmujących różne potoki ruchu, uzyskano w obu testach na poziomie istotności 0,05 wyniki pozytywne (wartości badanych statystyk były znacznie mniejsze od statystyk krytycznych). Nie ma zatem podstaw do odrzucenia hipotezy o przynależności porównywanych rozkładów prędkości do jednej populacji generalnej.

Zważywszy na uzyskane wyniki analizy można uznać zaproponowany w pracy model ruchu swobodnego za poprawny pod względem dokładności. Należy przy tym podkreślić zalety formy tego modelu z punktu widzenia zastosowań w praktyce. Znajomość dwóch zmiennych niezależnych, tj. współczynników A_1 i A_2 , reprezentujących w modelu konkretne warunki drogowe, umożliwia szacowanie dowolnych parametrów rozkładu prędkości pojazdów, i to zarówno poszczególnych grup rodzajowych jak i całego potoku. Liczba tych grup może być praktycznie dowolna. Fakt ten umożliwia więc uwzględnienie w modelu klasyfikacji rodzajowej pojazdów nawet bardziej szczegółowej niż to uczyniono w niniejszej pracy.

5. OPIS STANU ZATORU

Problem maksymalnej gęstości ruchu na drogach zamiejskich został przedstawiony przez autora w pracy [86]. Na podstawie badań ruchu oraz analizy ich wyników ustalono następującą, ogólną postać funkcji gęstości maksymalnej na dwupasowej drodze dwukierunkowej:

$$k_{\max} = 10^3 \cdot \left[\sum_{i=1}^n p_i \cdot (\bar{x}_i + \Delta \bar{x}_i) \right]^{-1} \quad (5.1)$$

oraz postać szczegółową dla przypadku potoku składającego się z pojazdów samochodowych:

$$k_{\max} = 10^3 \cdot \left[7,2 \cdot p_{O1} + 6,2 \cdot p_{O2} + 8,2 \cdot p_{C1} + 11,6 \cdot p_{C2} + \right. \\ \left. + 18,6 \cdot p_{C3} + \gamma \cdot I^2 \cdot (0,66 \cdot p_{O1} + 0,66 \cdot p_{O2} + 0,79 \cdot p_{C1} + \right. \\ \left. + 0,95 \cdot p_{C2} + 0,99 \cdot p_{C3}) \right]^{-1}, \quad (5.2)$$

gdzie:

- k_{\max} - maksymalna gęstość ruchu (średnia gęstość ruchu przy zatorze) na jednym pasie ruchu, [P/km],
- \bar{x}_i - średni odstęp między pojazdami i-tej grupy rodzajowej, [m],
- $\Delta \bar{x}_i$ - przyrost odstępów \bar{x}_i w stosunku do odcinka poziomego, spowodowany pochyleniem podłużnym drogi, [m],
- n - liczba grup rodzajowych pojazdów,
- p_i - prawdopodobieństwo wystąpienia pojazdów i-tej grupy rodzajowej w potoku,
- I - pochylenie podłużne drogi, [%],
- γ - współczynnik zależny od kierunku pochylenia drogi: na wzniesieniu $\gamma = 0,05$, a na spadku $\gamma = 0,02$.

Po uzupełnieniu wyników badań przedstawionych w pracy [86] o wyniki obejmujące grupę rodzajową pojazdów powolnych, wzór na maksymalną gęstość ruchu na dowolnym odcinku dwupasowej drogi dwukierunkowej przybrał następującą, ostateczną postać:

$$k_{\max} = 10^3 \cdot \left[7,2 \cdot p_{O1} + 6,2 \cdot p_{O2} + 8,2 \cdot p_{C1} + 11,6 \cdot p_{C2} + \right. \\ \left. + 18,6 \cdot p_{C3} + 14,3 \cdot p_W + \gamma \cdot I^2 \cdot (0,66 \cdot p_{O1} + 0,66 \cdot p_{O2} + \right. \\ \left. + 0,79 \cdot p_{C1} + 0,95 \cdot p_{C2} + 0,99 \cdot p_{C3} + 0,98 \cdot p_W) \right]^{-1}. \quad (5.3)$$

Przy określaniu ostatecznej postaci funkcji k_{max} wykorzystano wyniki pomiarów ruchu na tych samych odcinkach dróg, na których były prowadzone pomiary pojazdów samochodowych. W analizie wykorzystano także wzór (5.1), który umożliwił wyznaczenie funkcji (5.3) poprzez uzupełnienie funkcji (5.2) tylko o wyniki badań średnich odstępów między pojazdami powolnymi w stojącej kolumnie przy różnym pochyleniu podłużnym drogi.

Jak wynika z powyższych wzorów, na gęstość ruchu w warunkach zatoru ma wpływ długość pojazdów oraz - spośród czynników drogowych - pochylenie podłużne drogi. Nie stwierdzono natomiast wpływu na wartość luk między pojazdami innych czynników drogowych, takich jak: plan, przekrój poprzeczny czy otoczenie. Zarówno na wzniesieniu, jak i na spadku zaobserwowano w trakcie badań wzrost luk między pojazdami w stosunku do odcinka poziomego. Zachowywanie większej luki na wzniesieniu wynika przypuszczalnie przede wszystkim z obawy kierowcy przed możliwością cofnięcia się pojazdu poprzedzającego w kolumnie (w przypadku ruszania). Na spadku zaś jest spowodowane głównie świadomością kierowcy o zwiększonej drodze hamowania. Wpływ struktury rodzajowej pojazdów na gęstość maksymalną (wielkość luk) można wyjaśnić z kolei następującymi przyczynami. Duży samochód, w porównaniu z mniejszym np. osobowym, bardziej ogranicza pole widoczności kierowcy następnego pojazdu w kolumnie, posiada też mniej sprawny pod względem czasu uruchomienia układ hamulcowy i większą bezwładność przy ruszaniu. Wszystkie te czynniki potencjalnie zwiększają możliwość zderzenia się z takim pojazdem, przez co mogą wpływać na zachowanie w stosunku do niego większych luk. Przypuszczalnie wielkość luk jest uzależniona także od oddziaływania na psychikę kierowcy samych rozmiarów poprzedzającego pojazdu.

6. OPIS RUCHU NIESWOBODNEGO

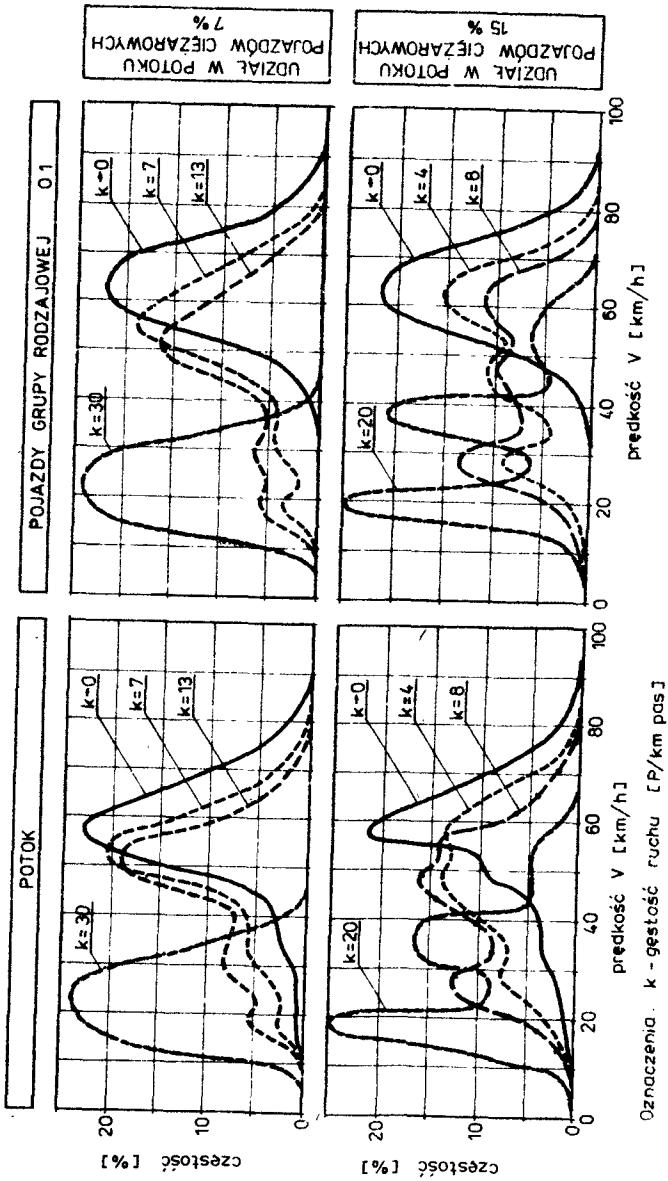
6.1. Charakter rozkładu prędkości pojazdów w potoku

Każdy z kierowców uczestniczący w ruchu na danym odcinku drogi dąży do utrzymania prędkości wybranej przez siebie w warunkach jazdy niezależnej od innych użytkowników drogi. Jak wynika z badań autora [90], prędkość tę zachowują kierowcy jednak najczęściej wtedy, gdy odległość do poruszającego się przed nimi pojazdu jest większa od około 160 m. Zbliżenie się bowiem do niego na mniejszą odległość powoduje z reguły spadek prędkości, którego wielkość zależy przede wszystkim od prędkości pojazdu poprzedzającego i możliwości jego wyprzedzenia.

W przypadku małej gęstości ruchu praktycznie wszystkie pojazdy potoku mogą zachować prędkość, jaką posiadały w ruchu swobodnym. Wzrost tej gęstości spowoduje jednak zwiększenie liczby spotkań pojazdów wolniej poruszających się z szybszymi i tym samym zwiększenie liczby pojazdów, które znajdują się w warunkach ruchu nieswobodnego [13, 91]. W konsekwencji tego będzie następował oczywiście spadek prędkości coraz większej liczby pojazdów. Wobec tego przejście potoku ze stanu ruchu swobodnego do nieswobodnego doprowadzi do zniekształcenia rozkładu prędkości.

Na rysunku 6.1 przedstawiono rozkłady prędkości pojazdów potoku oraz pojazdów osobowych grupy rodzajowej O1, zaobserwowane na jednym z odcinków pomiarowych. Świadomie wybrano do ilustracji problemu odcinek z zakazem wyprzedzania, ponieważ wzajemne oddziaływanie pojazdów w procesie ruchu jest na nim bardziej wyraźne niż na odcinku o dobrych warunkach wyprzedzania.

Zniekształcenie rozkładów w ruchu nieswobodnym, w stosunku do swobodnego, jest uzależnione od wielu czynników, w tym np. cech drogi, gęstości, struktury rodzajowej i kierunkowej ruchu. Jak stwierdził autor na podstawie analizy wyników badań, rozkłady zarówno poszczególnych grup rodzajowych, jak i potoku, w pierwszej fazie wzrostu gęstości ruchu k uzyskują najczęściej kształt wielomodalny lub jednomodalny o wyraźnie zwiększonym rozproszeniu. Wynika to ze wspomnianych wcześniej wzajemnych zależności pojazdów. Jak widać na przykładzie pojazdów grupy rodzajowej O1, część z nich porusza się z prędkością należącą do rozkładu ruchu swobodnego, prędkość pozostałych zaś odpowiada przesuniętym rozkładom ruchu swobodnego pojazdów innych, wolniejszych grup rodzajowych. Proces ten jest tym bardziej widoczny, im gorsze są warunki na wyprzedzanie oraz większe jest zróżnicowanie prędkości i procentowego udziału pojazdów poszczególnych grup rodzajowych w potoku. Wzrost gęstości ruchu k także początkowo nasila ów pro-



Rys. 6.1. Wybrane rozkłady prędkości pojazdów uzyskane na odcinku wzniesienia 6 % z zakazem wyprzedzania

oes, ale tylko do momentu, gdy większość pojazdów nie znajdzie się w warunkach ruchu nieswobodnego. Wówczas bowiem rozkład staje się jednomodalny, o kształcie coraz bardziej zbliżonym do rozkładu normalnego.

Rozkład prędkości pojazdów w ruchu nieswobodnym jest więc bardzo trudny do opisu matematycznego [14]. Złożoność problemu wynika przede wszystkim z niestandardowego kształtu rozkładu i wpływu na jego zmiany dużej liczby czynników. Jak widać na rysunku 6.1, nie można tego rozkładu, przynajmniej w przypadku dwupasowych dróg dwukierunkowych, scharakteryzować poprzez jeden typowy rozkład, w tym także normalny, pomimo, że postępuje się tak w wielu pracach [1, 7, 43, 65, 74]. Na drodze wielopasowej swoboda wyboru prędkości przez kierowców jest znacznie większa niż na drodze dwupasowej, przez co kształt analizowanego rozkładu może zachowywać w przybliżeniu cechy rozkładu normalnego.

Powyższe argumenty skłoniły autora do zrezygnowania z poszukiwania modelu matematycznego, opisującego funkcję prawdopodobieństwa prędkości pojazdów w ruchu nieswobodnym. Postanowiono scharakteryzować rozkład prędkości poprzez wartość oczekiwaną i miary pozycyjne, tj. wartości wybranych kwantyli.

Należy jeszcze podkreślić, co wynika z przedstawionych wyżej rozważań, że spadek prędkości pojazdów w potoku, po jego przejściu ze stanu ruchu swobodnego do nieswobodnego, determinowany jest głównie dwiema ogólnymi przyczynami, tj.:

- powstałym stopniem zapotrzebowania na wyprzedzanie,
- panującymi na odcinku drogi warunkami możliwości wyprzedzania.

Przed przystąpieniem do definiowania modelu ruchu nieswobodnego, warto zinterpretować wymienione wyżej przyczyny spadku prędkości pojazdów w potoku. W przypadku bowiem syntetycznego ujęcia każdej z nich w formie jednej lub dwóch zmiennych, można by w bardzo znacznym stopniu uprościć dalszy tok analiz.

6.2. Zapotrzebowanie na wyprzedzanie

W danych warunkach możliwości wyprzedzania miarą zapotrzebowania na wyprzedzanie w potoku może być liczba spotkań szybszych pojazdów z wolniejszymi występująca w określonej jednostce czasu i drogi. Zapotrzebowanie na wyprzedzanie w stałych warunkach możliwości wyprzedzania zależy więc przede wszystkim od dwóch czynników, tj. rozkładu prędkości pojazdów potoku oraz natężenia ruchu (lub gęstości ruchu).

Teoretyczna liczba spotkań w potoku pojazdów szybszych - jadących np. z prędkością V_1 , z wolniejszymi - poruszającymi się z prędkością V_t , wynosi na danym odcinku drogi długości 1 km w czasie jednej godziny [7]:

$$C_{it} = \left(\frac{1}{V_t} - \frac{1}{V_1} \right) \cdot pV_1 \cdot pV_t \cdot Q^2 \quad \text{przy } V_1 \geq V_t, \quad (6.1)$$

gdzie:

- pV_1, pV_t - prawdopodobieństwo wystąpienia pojazdów poruszających się z prędkością odpowiednio V_1 oraz V_t w potoku,
 Q - natężenie ruchu na analizowanym pasie ruchu, $[P/h]$.

Stąd ogólna liczba teoretycznych spotkań w potoku, wynikająca z pełnej funkcji prawdopodobieństwa prędkości pojazdów, będzie równa:

$$C = Q^2 \cdot \int_{V_1=0}^{\infty} \int_{V_t=0}^{V_1} \left(\frac{1}{V_t} - \frac{1}{V_1} \right) \cdot pV_1 \cdot pV_t \cdot d^2V . \quad (6.2)$$

We wzorze (6.2) można wydzielić dwa czynniki, określające wpływ obu wymienionych wcześniej czynników na stopień zapotrzebowania na wyprzedzanie w potoku. Pierwszy z nich to natężenie Q . Drugi natomiast, to czynnik charakteryzujący rozkład prędkości pojazdów w potoku (różnice prędkości):

$$WZ' = \int_{V_1=0}^{\infty} \int_{V_t=0}^{V_1} \left(\frac{1}{V_t} - \frac{1}{V_1} \right) \cdot pV_1 \cdot pV_t \cdot d^2V . \quad (6.3)$$

Funkcja (6.2) wyraża teoretyczną liczbę spotkań pojazdów w potoku, a ściślej maksymalną możliwą ich liczbę, która mogłaby zaistnieć w przypadku pełnej swobody wyprzedzania. W rzeczywistości, na dwupasowych drogach dwukierunkowych takiej swobody nie ma, co wynika w dużym stopniu z faktu konieczności dokonywania manewrów wyprzedzania na przeciwbieżnym pasie ruchu. Można jednak przypuszczać, że w danych warunkach możliwości wyprzedzania faktyczna liczba spotkań jest także funkcją tych samych zmiennych, co funkcja (6.2), tzn. Q oraz WZ' , ale o innej postaci.

W przypadku przejścia potoku z warunków ruchu swobodnego do nieswobodnego, wartość zmiennej WZ' jest uzależniona od rozkładu prędkości pojazdów w warunkach wyjściowych, tzn. swobodnych. W celu uściślenia tej zależności przeprowadzono analizę 91 rozkładów prędkości ruchu swobodnego obserwowanych w różnych warunkach drogowo-ruchowych. Wartość zmiennej WZ' obliczono poprzez przybliżone całkowanie:

$$WZ' \approx \sum_{i=1}^r \sum_{t=1}^i \left(\frac{1}{V_t} - \frac{1}{V_i} \right) \cdot pV_1 \cdot pV_t ,$$

gdzie:

- r - liczba przyjętych przedziałów klasowych rozkładu prędkości (szerokość przedziału przyjęto 2,5 km/h).

W wyniku tej analizy uzyskano następujący związek:

$$WZ' = 1,40 \cdot \frac{Z^{1,50}}{\bar{V}} , \quad (6.4)$$

gdzie:

- Z - współczynnik zmienności prędkości pojazdów potoku w warunkach swobodnych,

przy współczynniku korelacji równym 0,99 i średniokwadratowym błędzie aproksymacji wynoszącym $0,35 \cdot 10^{-5}$.

Na podstawie powyższych rozważań przyjęto, że rzeczywiste zapotrzebowanie na wyprzedzanie w potoku jest uzależnione od gęstości ruchu k oraz od wskaźnika WZ, nazwanego przez autora wskaźnikiem zapotrzebowania na wyprzedzanie:

$$WZ = \left(1000 \cdot \frac{z^{1,5}}{V} \right)^{0,45} \quad (6.5)$$

Przyjęcie jako zmiennej gęstości ruchu k zamiast natężenia Q podyktowane było względami praktycznymi. Bowiem w danych warunkach drogowych oraz przy określonej strukturze rodzajowej i kierunkowej natężenie Q nie jest jednoznaczną miarą warunków ruchu, w przeciwieństwie do gęstości k . Obie zmienne są jednak ze sobą ściśle skorelowane [5, 20, 25].

Wskaźnik WZ zdefiniowano na podstawie wzoru (6.4). Na definicję tę wpływ miały również względy praktyczne, obejmujące przede wszystkim uproszczenie toku dalszych analiz funkcyjnych (uniknięto w wyrażeniach funkcyjnych podwójnych potęg - patrz podrozdział 6.4) oraz nadanie wskaźnikowi większych wartości liczbowych (przyjęto przedział wartości 0+2). Należy podkreślić, że wartości wskaźnika WZ zależą od parametrów rozkładu prędkości pojazdów potoku w ruchu swobodnym, a więc można je stosunkowo łatwo określić wykorzystując wzory przedstawione w rozdziale 4 (wzór (4.10) i (4.20)).

6.3. Możliwość wyprzedzania

Możliwość wyprzedzania w potoku na odcinku dwupasowej drogi dwukierunkowej w największym stopniu zależy od takich czynników jak [84, 98]:

- gęstości ruchu w kierunku analizowanym k ,
- gęstości ruchu potoku przeciwbieżnego kP ,
- odległości widoczności na wyprzedzanie LW ,
- długości odcinka z zakazem wyprzedzania LZ (określonej odpowiednim oznakowaniem poziomym lub pionowym drogi),
- typu przekroju poprzecznego jezdni SJ ,
- struktury rodzajowej ruchu.

Wpływ struktury rodzajowej ruchu na warunki wyprzedzania w potoku wynika przede wszystkim z faktu zróżnicowania wymiarów pojazdów. Jest bowiem sprawą oczywistą, że przy danej różnicy prędkości w stosunku do lidera, trudniej jest wyprzedzić pojazd dłuższy (ciężarowy), niż krótszy (osobowy). Pojazd większy bardziej też ogranicza widoczność powierzchni jezdni, przez co dodatkowo utrudnia wykonanie manewru wyprzedzania. W dalszych rozważaniach można więc przyjąć, że zmienną charakteryzującą w modelu potoku wpływ struktury rodzajowej pojazdów na możliwość wyprzedzania będzie maksymalna gęstość ruchu, która jest - jak wiadomo - funkcyjnie związana z rozkładem wymiarów pojazdów w potoku [86, 87].



Struktura rodzajowa pojazdów na przeciwbieżnym pasie ruchu nie ma istotnego wpływu na średnią prędkość potoku, co autor stwierdził na podstawie własnych wyników badań [84]. Badania te były przeprowadzone na prostych, poziomych odcinkach dróg długości około 1 km, a więc w warunkach geometrycznych najbardziej korzystnych do wyprzedzania w przypadku dwupasmowych dróg dwukierunkowych.

Pozostałe wymienione czynniki mające wpływ na warunki wyprzedzania można przypuszczalnie uwzględnić w opracowywanym modelu ruchu potoku tylko poprzez dwie zmienne niezależne. Jedną z nich byłaby, podobnie jak w przypadku zapotrzebowania na wyprzedzanie, gęstość ruchu k , a drugą wskaźnik, który można by nazwać wskaźnikiem możliwości wyprzedzania WM . W tym przypadku wskaźnik WM , w sensie fizycznym, wyrażałby pewną wielkość wagowo odpowiadającą umownej gęstości ruchu przeciwbieżnego. Ta umowna gęstość równałaby się sumie faktycznej wartości gęstości ruchu przeciwbieżnego kP i ekwiwalentu dodatkowego wpływu pozostałych czynników na możliwość wyprzedzania w potoku, tj. odległości widoczności na wyprzedzanie, długości odcinka z zakazem wyprzedzania i szerokości jezdni:

$$WM = f(kP, LW, LZ, SJ) . \quad (6.6)$$

Wykorzystując powyższe rozumowanie postawiono hipotezę, że warunki na wyprzedzanie w modelu ruchu nieswobodnego można wyrazić zmiennymi: gęstością maksymalną k_{max} , gęstością ruchu k i wskaźnikiem WM .

6.4. Metoda szacowania średniej prędkości pojazdów potoku

Zgodnie z dotychczasowymi rozważaniami, spadek średniej prędkości pojazdów, jaki nastąpi na danym odcinku drogi po przejściu potoku ze stanu ruchu swobodnego do nieswobodnego $\Delta \bar{V}$:

$$\Delta \bar{V} = \bar{V} - \bar{V}_k , \quad [\text{km/h}] ,$$

gdzie:

\bar{V}_k - średnia prędkość potoku przy gęstości ruchu k , [km/h],

\bar{V} - średnia prędkość potoku w warunkach ruchu swobodnego, [km/h],

będzie uzależniony od istniejącego zapotrzebowania na wyprzedzanie oraz warunków możliwości wyprzedzania. Spadek ten będzie funkcją następujących zmiennych:

- gęstości ruchu k ,
- maksymalnej gęstości ruchu k_{max} ,
- wskaźnika zapotrzebowania na wyprzedzanie WZ ,
- wskaźnika możliwości wyprzedzania WM .

Przy stałej wartości wskaźnika możliwości wyprzedzania WM funkcję tę można więc zapisać:

$$\Delta \bar{V} = f(k, k_{max}, WZ) .$$

Wobec powyższego, dokonując odpowiedniego pogrupowania zmiennych, sformułowano tezę, że szukany spadek prędkości można wyrazić następująco:

$$\frac{\Delta \bar{v}}{\bar{v}} = f\left(\frac{k}{k_{\max}}, WZ\right). \quad (6.7)$$

W celu udowodnienia powyższej tezy przeprowadzono analizę wyników badań obejmującą 6 grup odcinków dwupasowych dróg dwukierunkowych różniących się wskaźnikiem WM. Dla każdej z tych grup ustalono metodą kompromisu Marquardta funkcję regresji reprezentującą zależność (6.7) w zakresie uzyskanych z badań wartości zmiennych niezależnych. Przyjęto przy tym następującą, ogólną postać funkcji regresji:

$$\frac{\Delta \bar{v}}{\bar{v}} = \left(\alpha_1\right)^{\alpha_2} \cdot \left(\frac{k}{k_{\max}}\right)^{\frac{\alpha_3}{WZ}} \quad \text{przy } k \leq k_{\text{opt}}, \quad (6.8)$$

gdzie:

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - współczynniki równania,

k_{opt} - gęstość ruchu na danym pasie ruchu w warunkach przepustowości, [P/km].

Następnie wyznaczono dla tych funkcji parametry określające zarówno siłę korelacji, jak i błędy szacowania zmiennej zależnej. Za parametry oceny dokładności funkcji przyjęto: współczynnik korelacji i determinacji oraz średniokwadratowy błąd aproksymacji. Wyniki tej analizy przedstawiono w tabelicy 6.1. Do obliczeń wartości zmiennych wykorzystano wzory: (4.10), (4.20) i (5.3).

Na podstawie powyższych wyników uznano postawioną wcześniej tezę (6.7) za udowodnioną. Do takiego stwierdzenia upoważniały przede wszystkim wartości uzyskanych współczynników determinacji, które świadczą o wysokim stopniu wyjaśnionej zmienności względnego spadku prędkości $\Delta \bar{v}/\bar{v}$ poprzez zmienne: k/k_{\max} i WZ (powyżej 95%).

Przedstawiona funkcja (6.8) nie obejmuje całego możliwego zakresu gęstości ruchu, a mianowicie gęstości większych od k_{opt} . Przedział ten uznano wcześniej za mało istotny z punktu widzenia celu niniejszej pracy (patrz podrozdział 2.1). Ze względu jednak na dokładność ustalanych szczegółowych postaci tej funkcji (tablica 6.1) przy ich opracowywaniu wykorzystano także wyniki badań ruchu o gęstości większej od k_{opt} .

Dalsze wnioski, istotne dla opracowania modelu ruchu potoku, sformułowano na podstawie porównania współczynników regresji funkcji (6.8), uzyskanych w poszczególnych grupach wskaźnika WM (patrz tablica 6.1). W wyniku tego porównania stwierdzono mianowicie, że między wspomnianymi współczynnikami występują następujące zależności:

$$\alpha_2 = 0,236 + 0,426 \cdot \alpha_3, \quad (6.9)$$

$$\alpha_1 = \alpha_3 \cdot 1,8 \frac{1}{\alpha_2} = \alpha_3 \cdot 1,8 \frac{1}{(0,236 + 0,426 \cdot \alpha_3)} \quad (6.10)$$

Tablica 6.1

WYNIKI ANALIZY FUNKCJI $\Delta\bar{V}/\bar{V} = f(k/k_{\max}, WZ)$										
Lp.	Charakterystyka dróg	Liczba analizowanych prób	Zakres wartości zmiennych niezależnych		Współczynniki równania regresji (6.8)			Współczynnik korelacji	Współczynnik deteminacji	Średniowa kwadratowa błęd apraksymacji
			k/k _{max}	WZ	α1	α2	α3			
1	jezdnia szerokości 70m, pobocze grunto-we szerokości 1,5÷2,0m	65	0÷0,30	0,84÷1,76	2,331	0,622	0,906	0,992	0,984	0,006 (0,35km/h)
2	j.w.	89	0÷0,45	0,88÷1,83	2,653	0,756	1,218	0,994	0,988	0,003 (0,19km/h)
3	j.w.	49	0÷0,30	0,84÷1,76	2,540	0,706	1,107	0,976	0,953	0,009 (0,53 km/h)
4	jezdnia szerokości 70 m, pobocze grunto-we szerokości 1,0÷1,5 m	39	0÷0,36	0,89÷1,75	2,333	0,623	0,906	0,979	0,958	0,008 (0,46 km/h)
5	j.w.	46	0÷0,36	0,86÷1,81	2,544	0,709	1,111	0,980	0,960	0,007 (0,45km/h)
6	jezdnia szerokości 70 m, pobocze utwar-dzone szerokości ≈ 2,0 m	21	0÷0,22	0,90÷1,54	2,660	0,760	1,230	0,988	0,976	0,011 (0,77 km/h)

Średniokwadratowe błędy aproksymacji wynosiły poniżej 0,2 %. Ponadto, co ma tutaj duże znaczenie, dobór prób statystycznych zapewniał uzyskanie w analizie praktycznie pełnego zakresu zmienności wskaźnika WM. Próby obejmowały bowiem warunki możliwości wyprzedzania od najlepszych do najgorszych (patrz tablica 6.1). Na podstawie więc zależności (6.9) i (6.10) można było uznać, że funkcje reprezentujące odmienne warunki na wyprzedzanie (funkcje o odmiennej wartości wskaźnika WM) różnią się między sobą tylko wielkością $\alpha/3$. Stąd po przyjęciu, że:

$$WM = \alpha/3, \quad (6.11)$$

omawianą funkcję spadku średniej prędkości potoku wyrażono ostatecznie w sposób następujący:

$$\frac{\Delta \bar{V}}{\bar{V}} = 1,8 \cdot \left(\frac{k}{k_{\max}} \right) \left(\frac{WM}{WZ} \right) \cdot \left(\frac{WM}{WZ} \right)^{(0,236 + 0,426 \cdot WM)} \quad (6.12)$$

przy $k \leq k_{\text{opt}}$.

Powyżej przedstawione równanie stanowi zasadniczą funkcję modelu ruchu potoku, ujmuje bowiem związek między podstawowym miernikiem warunków ruchu a cechami drogi i ruchu. Na podkreślenie zasługuje fakt, że do jej opisanie wykorzystano zaledwie trzy zmienne niezależne. Ma to duże znaczenie praktyczne zarówno dla samego modelowania jak i opracowania w przyszłości metody oceny warunków ruchu.

Konieczne jest jeszcze ustalenie wartości wskaźnika możliwości wyprzedzania WM dla innych, nie rozpatrywanych w pracy przypadków. Można je ustalić następująco:

- tak jak to wykonano w pracy, tj. na podstawie analizy regresji (ustalając współczynniki $\alpha/3$ równania (6.8));
- poprzez porównanie z innymi, znanymi przypadkami, np. przypadek zakazu wyprzedzania na dłuższym odcinku jest pod względem możliwości wyprzedzania tożsamy z przypadkiem bardzo dużej gęstości ruchu przeciwbieżnego (patrz tablica 6.1);
- poprzez interpolację dotychczasowych wyników wartości wskaźnika WM;
- wykorzystując jeden z dostępnych w kraju modeli symulacyjnych ruchu na dwupasowej drodze dwukierunkowej.

W celu ułatwienia fizycznej interpretacji liczbowych wartości wskaźnika WM można wykorzystać wyniki analizy przedstawione w tablicy 6.1. Jeżeli za warunki porównawcze możliwości wyprzedzania przyjmie się np.:

- najlepsze - ruch pojazdów na odcinku drogi o dobrej widoczności przy wyprzedzaniu ($LW > 450$ m) i przy minimalnym ruchu przeciwbieżnym ($kP < 4$ P/km),
- najgorsze - ruch pojazdów przy zakazie wyprzedzania na długości minimum 1 km lub przy bardzo dużej gęstości ruchu przeciwbieżnego ($kP > 18$ P/km),

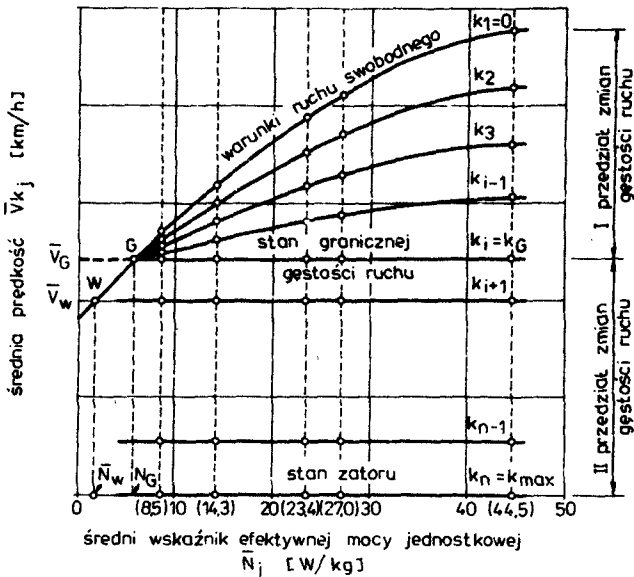
to wyrażenie:

będzie określać poziom możliwości wyprzedzania w procentach w zakresie przyjętych, skrajnych warunków ruchu.

6.5. Metoda szacowania średnich prędkości pojazdów poszczególnych grup rodzajowych

Do wyznaczenia średnich prędkości pojazdów poszczególnych grup rodzajowych w ruchu nieswobodnym wykorzystano, podobnie jak w ruchu swobodnym, zależność średniej prędkości od średniego wskaźnika efektywnej mocy jednostkowej. W trakcie analizy wyników badań zauważono, że w miarę zwiększania się gęstości ruchu, wykres tej funkcji ulega w stosunku do ruchu swobodnego odpowiedniemu przekształceniu. Najogólniej ujmując, charakter tego przekształcenia polega na obniżeniu się i spłaszczeniu się krzywej. Stopień tych zmian jest uzależniony od zapotrzebowania oraz możliwości wyprzedzania w potoku.

W przypadku każdego konkretnego odcinka drogi oraz danej struktury rodzajowej i kierunkowej ruchu rozpatrywaną zmianę przebiegu funkcji $\bar{V}_{k_j} = f(\bar{N}_j)$ można scharakteryzować poprzez dwa następujące przedziały gęstości ruchu (patrz rysunek 6.2).



Rys.6.2. Schemat zmian przebiegu funkcji $\bar{V}_{k_j} = f(\bar{N}_j)$ spowodowanych wzrostem gęstości ruchu na danym odcinku drogi

A. Pierwszy przedział.

Poczynając od warunków ruchu swobodnego, krzywa ulega stopniowemu spłaszczeniu i obrotowi względem punktu $G[\bar{V}_G, \bar{N}_G]$, którego położenie wyznaczają najwolniejsze pojazdy w potoku. Proces ten trwa aż do momentu osiągnięcia przez potok gęstości k_G , nazwanej przez autora graniczną, przy której zrównują się średnie prędkości pojazdów wszystkich grup rodzajowych uczestniczących w ruchu ($\bar{V}_{k_j} = \bar{V}_G$).

B. Drugi przedział

Rozpoczyna się on od gęstości granicznej i trwa aż do osiągnięcia przez potok gęstości maksymalnej. Krzywa $\bar{V}_{k_j} = f(\bar{N}_j)$ jest równoległa do osi \bar{N}_j , a więc pojazdy wszystkich grup rodzajowych poruszają się z jedną prędkością średnią. W tym przedziale zmiana przebiegu rozważanej funkcji polega tylko na obniżeniu się jej aż do położenia $\bar{V}_{k_j} = 0$.

W celu uściślenia granicy między tymi dwoma przedziałami gęstości przeprowadzono następującą analizę. Na podstawie poszczególnych prób prędkości potoków pojazdów, uzyskanych z badań ruchu nieswobodnego, określono funkcje regresji $\bar{V}_{k_j} = f(\bar{N}_j)$, przyjmując ich ogólny charakter analogicznie jak w ruchu swobodnym, t.j.:

$$\bar{V}_{k_j} = B_1 \cdot \bar{N}_j^2 + B_2 \cdot \bar{N}_j + B_3, \quad (6.13)$$

gdzie:

\bar{V}_{k_j} - średnia prędkość pojazdów samochodowych j-tej grupy rodzajowej przy gęstości ruchu k , [km/h],

B_1, B_2, B_3 - współczynniki równania.

Następnie każdą z uzyskanych funkcji regresji porównano z odpowiadającą jej funkcją prędkości ruchu swobodnego, poszukując punktu ich przecięcia:

$$\begin{cases} \bar{V}_G = B_1 \cdot \bar{N}_G^2 + B_2 \cdot \bar{N}_G + B_3, \\ \bar{V}_G = A_1 \cdot \bar{N}_G^2 + A_2 \cdot \bar{N}_G + A_3. \end{cases}$$

Stąd otrzymano:

$$\bar{N}_G = - \frac{A_2 - B_2}{2 \cdot (A_1 - B_1)} - \sqrt{\left[\frac{A_2 - B_2}{2 \cdot (A_1 - B_1)} \right]^2 - \frac{A_3 - B_3}{A_1 - B_1}}. \quad (6.14)$$

Taką analizę przeprowadzono łącznie dla 99 potoków obejmujących 50 odcinków dwupasowych dróg dwukierunkowych o różnej charakterystyce geometrycznej.

Punkty przecięcia wyżej opisanych par funkcji prędkości poddano dalszej analizie, stanowiącej próbę interpretacji położenia tych punktów. Jak to już stwierdzono wcześniej - położenie tych punktów wyznaczają najwolniejsze pojazdy w potoku. Nasuwało się stąd przypuszczenie, że będą to pojazdy poruszające się z prędkością odpowiadającą określonemu, niskiemu

rzędowi kwantyla prędkości ruchu swobodnego. Korzystając ze wzoru (4.1), dla każdego punktu przecięcia wyznaczono rząd kwantyla prędkości. Po porównaniu wszystkich wyników okazało się, że rozrzut wartości otrzymanych rzędów kwantyli jest niestety dość duży (od 2 do 28 %). Znacznie lepsze wyniki uzyskano przy próbie interpretacji położenia tych punktów poprzez rząd kwantyla wskaźnika efektywnej mocy jednostkowej pojazdów potoku. Na podstawie przeprowadzonych rozważań przyjęto więc, że poszukiwanemu punktowi obrotu odpowiada prędkość pojazdów o wskaźniku efektywnej mocy jednostkowej równym kwantylowi 2,5 % w potoku.

W powyższej analizie wykorzystano następujące założenia:

- rozkład wskaźnika N w potoku można zapisać jako splot pojedynczych rozkładów normalnych, obejmujący poszczególne grupy rodzajowe pojazdów:

$$f(N) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \sum_{i=1}^6 \frac{P_i}{SN_i} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{N - \bar{N}_i}{SN_i} \right)^2 \right], \quad (6.15)$$

- obliczeniowy wskaźnik efektywnej mocy jednostkowej pojazdów powolnych \bar{N}_W wyznacza punkt na krzywej $\bar{V}_j = f(\bar{N}_j)$ odpowiadający ich prędkości (funkcja $\bar{V}_j = f(\bar{N}_j)$ nie dotyczy pojazdów powolnych):

$$\bar{V}_W = A1 \cdot \bar{N}_W^2 + A2 \cdot \bar{N}_W + A3,$$

co po przekształceniu można zapisać:

$$\bar{N}_W = \frac{-A2}{2 \cdot A1} - \sqrt{\left(\frac{A2}{2 \cdot A1} \right)^2 - \frac{A3 - \bar{V}_W}{A1}}, \quad (6.16)$$

- rozproszenie (rozstęp) wskaźnika N w grupie pojazdów powolnych mieści się w jednym przedziale klasowym szeregu rozdzielczego (założenie to nie wpłynęło na obniżenie dokładności wyników analizy upraszczając znacznie tok obliczeń).

W trakcie porównywania opisanych wcześniej par funkcji regresji zauważono, że między ich współczynnikami zachodzi następująca proporcja:

$$\frac{B1}{A1} = \frac{B2}{A2}. \quad (6.17)$$

Współczynnik korelacji dla tego związku wyniósł 0,99, a średniokwadratowy błąd aproksymacji 0,019.

Przyjmując, że znana jest średnia prędkość pojazdów potoku \bar{V}_k w ruchu nieswobodnym (wzór (6.12)) oraz znany jest punkt obrotu funkcji prędkości $G[\bar{V}_G, \bar{N}_G]$ (jego położenie zależy od struktury rodzajowej ruchu oraz równania ruchu swobodnego $\bar{V}_j = f(\bar{N}_j)$), zaproponowano następujący tok dalszej analizy dotyczącej pierwszego przedziału gęstości ruchu (rys.6.2). Ponieważ na podstawie równania ruchu nieswobodnego można zapisać zależność:

$$\bar{V}_G = B1 \cdot \bar{N}_G^2 + B2 \cdot \bar{N}_G + B3, \quad (6.18)$$

to po wykorzystaniu związku (6.17) uzyskano:

$$\bar{V}_G = B2 \cdot \left(\frac{A1}{A2} \cdot \bar{N}_G^2 + \bar{N}_G \right) + B3 \quad .$$

Stąd:

$$B3 = \bar{V}_G - B2 \cdot \bar{N}_G \cdot \left(\frac{A1}{A2} \cdot \bar{N}_G + 1 \right) \quad . \quad (6.19)$$

Podstawiając do wzoru (6.13) zależności (6.17) oraz (6.19) otrzymano:

$$\bar{V}k_j = B2 \cdot (\bar{N}_j - \bar{N}_G) \cdot \left[\frac{A1}{A2} \cdot (\bar{N}_j + \bar{N}_G) + 1 \right] + \bar{V}_G \quad . \quad (6.20)$$

Ponieważ średnią prędkość pojazdów potoku można wyrazić wzorem:

$$\bar{V}k = \sum_{j=1}^5 p_j \cdot (B1 \cdot \bar{N}_j^2 + B2 \cdot \bar{N}_j + B3) + p_W \cdot \bar{V}_W \quad ,$$

który po przekształceniach i odpowiednich podstawieniach przyjmie postać:

$$\begin{aligned} \bar{V}k = B2 \cdot \left[\frac{A1}{A2} \sum_{j=1}^5 p_j \cdot (\bar{N}_j^2 - \bar{N}_G^2) + \sum_{j=1}^5 p_j \cdot (\bar{N}_j - \bar{N}_G) \right] + \\ + \bar{V}_G \cdot (1 - p_W) + p_W \cdot \bar{V}_W \quad , \end{aligned}$$

stąd:

$$B2 = \frac{\bar{V}k - [\bar{V}_G \cdot (1 - p_W) + p_W \cdot \bar{V}_W]}{\frac{A1}{A2} \sum_{j=1}^5 p_j \cdot (\bar{N}_j^2 - \bar{N}_G^2) + \sum_{j=1}^5 p_j \cdot (\bar{N}_j - \bar{N}_G)} \quad . \quad (6.21)$$

Po wykorzystaniu powyższej zależności i wzoru (6.20) uzyskano ostateczne postacie funkcji średniej prędkości w ruchu nieswobodnym pojazdów samochodowych dowolnej grupy rodzajowej:

$$\bar{V}k_j = [\bar{V}k - \bar{V}_G \cdot (1 - p_W) - p_W \cdot \bar{V}_W] \cdot \frac{(\bar{N}_j - \bar{N}_G) \cdot \left[\frac{A1}{A2} \cdot (\bar{N}_j + \bar{N}_G) + 1 \right]}{\sum_{j=1}^5 p_j \cdot (\bar{N}_j - \bar{N}_G) \cdot \left[\frac{A1}{A2} \cdot (\bar{N}_j + \bar{N}_G) + 1 \right]} + \bar{V}_G \quad (6.22)$$

przy $\bar{V}k > \bar{V}_G$ oraz $\bar{V}_j > \bar{V}_G$.

$$\bar{V}k_j = \bar{V}_j \quad \text{przy} \quad \bar{V}k > \bar{V}_G \quad \text{oraz} \quad \bar{V}_j \leq \bar{V}_G \quad . \quad (6.23)$$

W przypadku pojazdów powolnych przyjęto, że ich prędkość w pierwszym przedziale gęstości ruchu nie ulega zmianie, czyli:

$$\overline{V_{k_w}} = \overline{V_w}, \quad (6.24)$$

gdzie:

$\overline{V_{k_w}}$ - średnia prędkość pojazdów powolnych przy gęstości ruchu k , [km/h].

Zgodnie z wcześniejszymi założeniami, w drugim przedziale gęstości ruchu funkcja prędkości przybierze postać:

$$\overline{V_{k_j}} = \overline{V_k} \quad \text{przy} \quad \overline{V_k} \leq \overline{V_G}. \quad (6.25)$$

Jeżeli $\overline{V_w} \geq \overline{V_k}$, wówczas równanie to będzie dotyczyło również pojazdów powolnych. W przeciwnym przypadku prędkość pojazdów powolnych będzie wyznaczać wzór (6.24).

Na podstawie przedstawionych równań (6.22) + (6.25) przeprowadzono test dokładności szacowania średnich prędkości pojazdów poszczególnych grup rodzajowych w ruchu nieswobodnym, wykorzystując do tego celu próby z badań o różnej gęstości ruchu, strukturze rodzajowej pojazdów i warunkach drogowych. Jak wynika z wartości uzyskanych błędów, przedstawionych w tabelicy 6.2, zaproponowany w pracy sposób szacowania wartości $\overline{V_{k_j}}$ można uznać za poprawny.

Tablica 6.2

PRZECIĘTNE BŁĘDY SZACOWANIA ŚREDNIEJ PRĘDKOŚCI POJAZDÓW POSZCZEGÓLNYCH GRUP RODZAJOWYCH W RUCHU NIESWOBODNYM [km/h]						
Grupa rodzajowa	Gęstość ruchu [P/kmpas]				Bez względu na gęstość	Liczba analizowanych prób
	< 5	5 + 10	10+20	> 20		
O 1	0,87	0,61	0,59	0,51	0,75	98
O 2	0,83	0,65	0,65	0,70	0,76	99
C 1	1,18	1,30	0,91	0,91	1,28	54
C 2	0,92	0,99	0,75	0,74	0,93	70
C 3	0,92	0,90	0,85	0,75	0,86	35
W	—	—	—	—	0,51	21

Uwaga: Za błąd maksymalny można uznać w przybliżeniu dwukrotną wartość błędu przeciętnego (patrz rozdział 4.4)

Punkty obrotu G funkcji prędkości były wyznaczone przy założeniu, że wartość $\overline{N_G}$ odpowiada kwantylowi 2,5 % rozkładu wskaźnika efektywnej mocy jednostkowej pojazdów potoku. Pojęcia błędu przeciętnego i maksymalnego zdefiniowano identycznie jak przy ocenie funkcji prędkości pojazdów w ruchu swobodnym (podrozdział 4.4).

6.6. Metoda szacowania pozostałych parametrów rozkładów prędkości

Metodę szacowania dowolnego kwantyla prędkości pojazdów potoku w ruchu nieswobodnym można ustalić w sposób analogiczny do metody szacowania wartości oczekiwanej. Zarówno bowiem wartość oczekiwana jak i wartość od-

powiadająca dowolnemu kwantylowi rozkładu prędkości pojazdów w potoku powinny być funkcją tych samych zmiennych. Stąd też przyjęto, że:

$$\frac{\Delta V_R}{V_R} = \frac{V_R - V_{kR}}{V_R} = f\left(\frac{k}{k_{\max}}, WZ, WM\right), \quad (6.26)$$

gdzie:

V_R - kwantyl R % prędkości pojazdów potoku w ruchu swobodnym, [km/h],
 V_{kR} - kwantyl R % prędkości pojazdów potoku przy gęstości ruchu k, [km/h].

W tabelicy 6.3 przedstawiono wyniki analizy funkcji (6.26). Wykonano ją tak samo i przy tych samych danych empirycznych, co ocenę funkcji (6.7) obejmującą względny spadek średniej prędkości pojazdów potoku w ruchu nieswobodnym (patrz podrozdział 6.4).

Tabela 6.3

WYNIKI ANALIZY FUNKCJI $\Delta V_R / V_R = f(k/k_{\max}, WZ, WM)$							
Rząd kwantyla R	Liczba analizowanych prób	Zakres wartości zmiennych niezależnych			Współczynnik korelacji	Współczynnik determinacji	Średniokwadratowy błąd aproksymacji zmiennej V_{kR}
		k/k_{\max}	WZ	WM			
[%]	[-]	[km/h]	[-]		[-]	[-]	[km/h]
5	309	0 ÷ 0,45	0,84 ÷ 1,83	0,906 ÷ 1,23	0,981	0,962	1,37
15					0,984	0,968	1,32
85					0,986	0,972	1,27
95					0,984	0,968	1,20
98					0,977	0,955	1,31

Na podstawie uzyskanych wartości współczynników korelacji, determinacji i średniokwadratowego błędu aproksymacji uznano funkcję (6.26) za poprawną.

Wyznaczenie dowolnego kwantyla prędkości pojazdów danej grupy rodzajowej w potoku można także przeprowadzić w sposób podobny, jak to uczyniono w przypadku wartości oczekiwanych (podrozdział 6.5), tzn. wykorzystując zależność:

$$V_{kRj} = B1_R \cdot \bar{N}_j^2 + B2_R \cdot \bar{N}_j + B3_R \quad (6.27)$$

gdzie:

V_{kRj} - kwantyl R % prędkości pojazdów grupy rodzajowej j przy gęstości ruchu k, [km/h],

$B1_R, B2_R, B3_R$ - współczynniki równania.

Na podstawie prób z badań empirycznych, które wykorzystano również przy ocenie dokładności szacowania wartości średnich, wykonano za pomocą funkcji (6.27) analizę regresji dla pięciu wybranych kwantyli. Wyniki uzyskanych przeciętnych błędów aproksymacji stanowiących odchylenie stan-

ardowe rozkładu reszt (różnic między wartością empiryczną i modelową) i-
lustruje tablica 6.4..

Tablica 6.4

PRZECIĘTNE BŁĘDY SZACOWANIA WYBRANYCH KWANTYLI PRĘD- KOŚCI POJAZDÓW POSZCZEGÓLNYCH GRUP RODZAJOWYCH W RUCHU NIESWOBODNYM [km/h]						
Grupa rodzajowa	Liczba analiza- wanych prób	Rząd kwantyla [%]				
		5	15	85	95	98
O 1	98	0,85	0,84	0,86	0,91	0,97
O 2	99	1,21	1,18	1,25	1,31	1,48
C 1	54	1,04	1,05	1,26	1,28	1,40
C 2	70	0,96	1,00	1,01	1,12	1,21
C 3	35	0,83	0,73	0,85	0,89	1,09
W	21	0,83	0,64	0,81	0,88	0,96

Uwaga. Za błąd maksymalny uznać można w przybliżeniu dwukrotną wartość błędu przeciętnego (patrz rozdział 4.4.)

Jak widać, wartości tych błędów są małe, mieszczące się w zakresie dokładności obecnie stosowanych metod pomiarów prędkości.

Uściślenie obu funkcji, tj. (6.26) i (6.27), wymaga jeszcze dalszych analiz podobnych do tych, jakie wykonano w odniesieniu do odpowiednich prędkości średnich (podrozdziały 6.4 oraz 6.5). Zdaniem autora, ich wykonanie nie było konieczne dla osiągnięcia celu pracy. Wystarczyło wykazać możliwość oraz przedstawić w formie ogólnej sposób wyznaczenia omawianych funkcji.

7. PRAKTYCZNE WYKORZYSTANIE MODELU

7.1. Fundamentalne zależności ruchu

Fundamentalnymi zależnościami, które stanowią podstawę metody oceny warunków ruchu, są związki między prędkością, gęstością i natężeniem ruchu. W przypadku zaproponowanego w pracy modelu ruchu potoku można je stosunkowo łatwo ustalić na podstawie wzoru (6.12). Przyjmując, że:

$$\beta = \frac{WM}{WZ}, \quad (7.1)$$

oraz, że [25, 75, 86]:

$$Q = \varphi \cdot \bar{v}_k \cdot k, \quad (7.2)$$

gdzie:

$$\varphi = \frac{\bar{v}_k'}{\bar{v}_k},$$

\bar{v}_k' - średnia prędkość pojazdów potoku przy gęstości ruchu k , określona na podstawie średniego czasu podróży, [km/h],

zależności te przybiorą następującą postać:

$$\bar{v}_k = \left[1 - 1,8 \cdot \beta^{\alpha 2} \cdot \left(\frac{k}{k_{\max}} \right)^\beta \right] \cdot \bar{v}, \quad (7.3)$$

$$Q = \varphi \cdot \left[1 - 1,8 \cdot \beta^{\alpha 2} \cdot \left(\frac{k}{k_{\max}} \right)^\beta \right] \cdot k \cdot \bar{v}, \quad (7.4)$$

$$Q = \varphi \cdot \left[\left(1,8 \cdot \beta^{\alpha 2} \right)^{-1} \cdot \left(1 - \frac{\bar{v}_k}{\bar{v}} \right) \right]^\frac{1}{\beta} \cdot \bar{v}_k \cdot k_{\max}, \quad (7.5)$$

gdzie:

$$k \leq k_{\text{opt}}, \quad \bar{v}_k \geq \bar{v}_{k_{\text{opt}}},$$

$$\alpha 2 = 0,236 + 0,426 \cdot WM.$$

Poszukując natomiast maksimum funkcji (7.4), otrzymać można zależności opisujące ruch w warunkach przepustowości [5, 32]:

$$k_{\text{opt}} = \left[1,8 \cdot \beta^{\alpha 2} \cdot (\beta + 1) \right]^{-\frac{1}{\beta}} \cdot k_{\max}, \quad (7.6)$$

$$Q_{\text{opt}} = \varphi \cdot \beta \cdot \left[1,8 \cdot \beta^{\alpha 2} \cdot (\beta + 1)^{(\beta + 1)} \right]^{-\frac{1}{\beta}} \cdot \bar{v} \cdot k_{\max}, \quad (7.7)$$

$$\bar{v}_k_{opt} = \beta \cdot (\beta + 1)^{-1} \cdot \bar{v} \quad (7.8)$$

gdzie:

k_{opt} , Q_{opt} , \bar{v}_k_{opt} - parametry ruchu pojazdów potoku na analizowanym pasie ruchu w warunkach przepustowości, odpowiednio: gęstość [P/km], natężenie [P/h] i średnia prędkość [km/h].

7.2. Przykład wyznaczania podstawowych charakterystyk ruchu

W celu zilustrowania praktycznego wykorzystania zaproponowanego przez autora modelu, przedstawiono w pracy przykład wyznaczania podstawowych charakterystyk ruchu. Dotyczy on ruchu na jednym z kierunków prostego, poziomego odcinka dwupasowej drogi dwukierunkowej o szerokości jezdni 7,0 m i o gruntowych poboczach szerokości 2,0 m. Gęstość ruchu przeciwbieżnego przyjęto $kP = 3$ P/km.

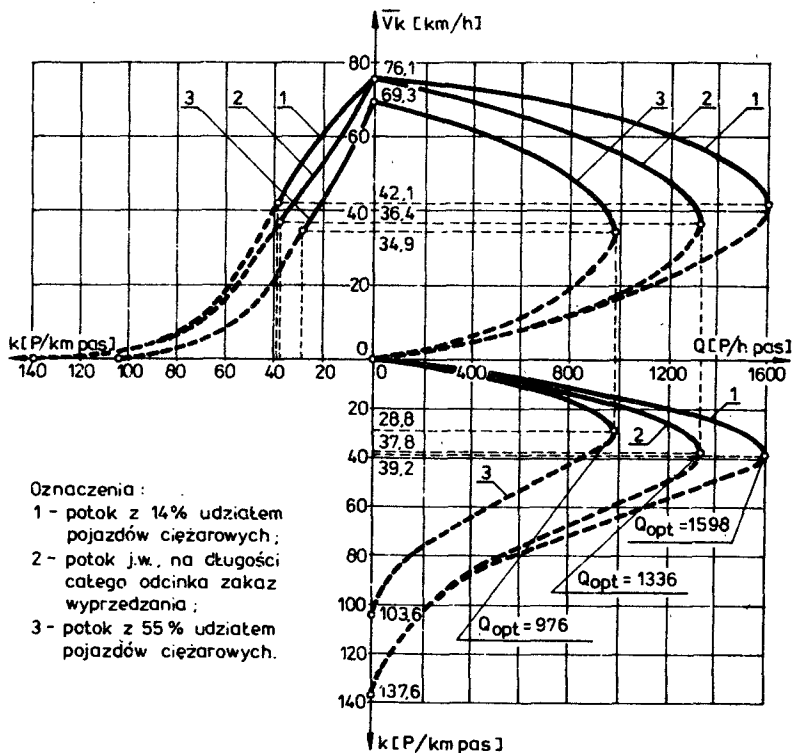
Obliczenia wykonano przy dwóch wariantach struktury rodzajowej oraz dwóch wariantach możliwości wyprzedzania (brak i istnienie zakazu wyprzedzania). Wartość współczynnika φ przyjęto przy tym równą 0,97 [85]. Wyniki obliczeń przedstawiono w tablicy 7.1 oraz na rysunkach 7.1 i 7.2.

Tablica 7.1

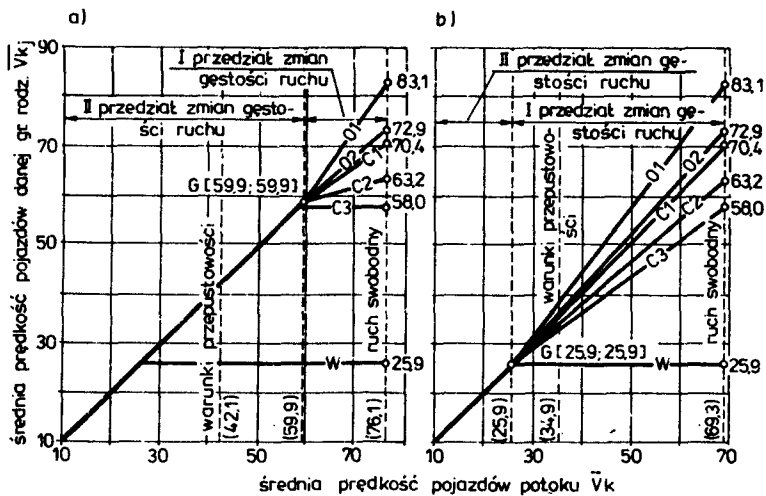
PRZYKŁAD WYZNACZANIA PODSTAWOWYCH CHARAKTERYSTYK RUCHU (DOTYCZY JEDNEGO PASA RUCHU)				
Lp	Opis czynności	Podstawa obliczeń lub ustaleń	Wynik obliczeń lub ustaleń	Uwagi
1	2	3	4	5
Etap I : ZAŁOŻENIA OGÓLNE				
1.	ustalenie geometrycznej charakterystyki odcinka drogi	dane wejściowe	odcinek prosty, poziomy o długości 1 km dwupasowej drogi dwukierunkowej; szer. jezdni 7,0 m; pobocze gruntowe szer. 2,0 m	
2.	ustalenie struktury rodzajowej ruchu	j.w.	$P_{01}=0,41$; $P_{02}=0,45$; $P_{C1}=0,07$; $P_{C2}=0,05$; $P_{C3}=0,02$; $P_W=0$	
3.	ustalenie struktury kierunkowej ruchu	j.w.	gęstość ruchu przeciwbieżnego $kP = 3$ P/km	
4.	opis charakterystyki dynamicznej pojazdów	tablica 3.1	$\bar{N}_{01}=44,5$; $\bar{N}_{02}=27,0$; $\bar{N}_{C1}=23,4$; $\bar{N}_{C2}=14,3$; $\bar{N}_{C3}=8,5$; $S\bar{N}_{01}=5,4$; $S\bar{N}_{02}=4,0$; $S\bar{N}_{C1}=5,1$; $S\bar{N}_{C2}=4,6$; $S\bar{N}_{C3}=3,9$	[W/kg]
Etap II : RUCH SWOBODNY				
1.	dobór współczynników	tabl. 4.1	$A1=-0,00622$; $A2=1,026$	
2.	równania $V_j = f(N_j)$	wzór (4.8)	$A3=49,77$	
3.	obliczenie średnich prędkości pojazdów samochodowych poszczególnych grup rodzajowych	wzór (4.4)	$\bar{V}_{01}=83,11$; $\bar{V}_{02}=72,94$; $\bar{V}_{C1}=70,37$; $\bar{V}_{C2}=63,17$; $\bar{V}_{C3}=58,04$	[km/h]
4.	j.w. lecz pojazdów powolnych	wzór (4.9)	$\bar{V}_W=25,90$	[km/h]

od. tablicy 7.1

1	2	3	4	5
5.	obliczenie odchylen standardowych rozkładów prędkości pojazdów samochodowych poszczególnych grup rodzajowych	wzór (4.18)	$S_{01} = 13,06$; $S_{02} = 11,05$; $S_{C1} = 9,90$; $S_{C2} = 9,23$; $S_{C3} = 8,54$	[km/h]
6.	j.w. lecz pojazdów powolnych	wzór (4.19)	$S_W = 4,00$	[km/h]
7.	obliczenie średniej prędkości poj. potoku	wzór (4.10) lub (4.2)	$\bar{V} = 76,14$	[km/h]
8.	obliczenie odchylenia standardowego rozkładu prędkości poj. potok.	wzór (4.20) lub (4.3)	$S = 13,41$	[km/h]
9.	ustalenie rozkładów prędkości pojazdów poszczególnych grup rodzajowych	tabl. statystyczne rozkładu normalnego	odpowiednie funkcje prawdopodobieństwa zmiennej losowej V	
10.	ustalenie rozkładu prędkości pojazdów potoku	wzór (4.1)	odpowiednia funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej V	
Etap III : STAN ZATORU				
1.	obliczenie maksymalnej gęstości ruchu	wzór (5.3)	$k_{max} = 137,59$	[P/km]
Etap IV : RUCH NIESWOBODNY				
1.	określenie wskaźnika zapotrzebowania na wyprzedzanie	wzór (6.5)	$WZ = 0,987$	
2.	określenie wskaźnika możliwości wyprzedzania	tabl. 6.1 oraz wzór (6.11)	$WM = 1,218$	
3.	ustalenie zależności między średnią prędkością a gęstością ruchu	wzór (7.3)	$\bar{V}_k = 76,14 - 0,369 \cdot k \cdot 1,234$	[km/h] $k \leq k_{opt}$
4.	ustalenie zależności między natężeniem ruchu a średnią prędkością poj. potoku	wzór (7.5)	$Q = 2,18 \cdot (76,14 - \bar{V}_k) \cdot 0,810 \cdot \bar{V}_k$	[P/h] $\bar{V}_k \approx \bar{V}_{opt}$
5.	ustalenie zależności między natężeniem a gęstością ruchu	wzór (7.4)	$Q = (73,86 - 0,358 \cdot k \cdot 1,234) \cdot k$	[P/h] $k \leq k_{opt}$
6.	scharakteryzowanie najmniejszych pojazdów w potoku	wzór (6.15)	$\bar{N}_G = 10,59$	[W/kg]
7.		wzór (4.4)	$\bar{V}_G = 59,94$	[km/h]
8.	ustalenie średnich prędkości pojazdów danych grup rodzajowych	wzór (6.22)	$\bar{V}_{k01} = 1,430 \cdot \bar{V}_k - 25,77$ $\bar{V}_{k02} = 0,802 \cdot \bar{V}_k + 11,85$ $\bar{V}_{kC1} = 0,644 \cdot \bar{V}_k + 21,34$ $\bar{V}_{kC2} = 0,199 \cdot \bar{V}_k + 4,798$	[km/h] $\bar{V}_k \approx \bar{V}_G$ $\bar{V}_k \approx \bar{V}_{opt}$
9.		wzór (6.23)	$\bar{V}_{kC3} = \bar{V}_{C3} = 58,04$	j.w.
10.		wzór (6.24)	$\bar{V}_{kW} = \bar{V}_W = 25,90$	j.w.
11.		wzór (6.25)	$\bar{V}_{kj} = \bar{V}_k$	$\bar{V}_k \approx \bar{V}_{opt}$ $\bar{V}_k \approx \bar{V}_G$
Etap V : PRZEPUSTOWOŚĆ				
1.	obliczenie gęstości ruchu	wzór (7.6)	$k_{opt} = 39,17$	[P/km]
2.	obliczenie natężenia ruchu	wzór (7.7)	$Q_{opt} = 1598$	[P/h]
3.	obliczenie średniej prędkości poj. potoku	wzór (7.8)	$\bar{V}_{k_{opt}} = 42,06$	[km/h]



Rys. 7.1. Fundamentalne zależności ruchu potoku pojazdów na prostym poziomym odcinku dwupasowej drogi dwukierunkowej przy gęstości ruchu przeciwbieżnego $kP = 3 P/km$



O1, O2, C1, C2, C3 - oznaczenia grup rodzajowych (patrz tabela 3.1)

Rys. 7.2. Zależności między średnią prędkością pojazdów danej grupy rodzajowej a średnią prędkością potoku pojazdów: a) dla przypadku 1, b) dla przypadku 3 (założenia jak na rys. 7.1)

W tabelicy 7.1 zamieszczono również przebieg obliczeń dla jednego z rozważanych przypadków przykładu.

Należy zwrócić uwagę, że do określenia wszystkich charakterystyk ruchu za pomocą przedstawionych w pracy wzorów potrzebne były, poza danymi wejściowymi, tylko trzy wielkości, tj. współczynniki A_1 i A_2 równania ruchu swobodnego $\bar{V}_j = f(\bar{N}_j)$ oraz wskaźnik WM. Fakt ten świadczy o prostej i zarazem praktycznej konstrukcji modelu.

7.3. Model ruchu potoku a metoda oceny warunków ruchu

Zaproponowany w niniejszej pracy model ruchu potoku umożliwi opracowanie metody oceny warunków ruchu na dwupasowych drogach dwukierunkowych ze stosunkowo dużą dokładnością. Wynika to przede wszystkim z następujących faktów:

1. Model ruchu potoku został opracowany dla jednorodnych geometrycznie elementów pasa ruchu dwupasowej drogi dwukierunkowej.
2. Stwierdzone błędy szacowania parametrów rozkładów prędkości za pomocą modelu były bardzo małe i nie przekraczały w wartościach procentowych 1,7 km/h oraz maksymalnych 3,4 km/h.
3. Konstrukcja modelu umożliwia uwzględnienie w metodzie praktycznie wszystkich, ważnych z punktu widzenia warunków ruchu, zmiennych niezależnych. Wszystkie cechy drogi, z wyjątkiem tych które wpływają na możliwość wyprzedzania w potoku, są w modelu uwzględniane poprzez równanie ruchu swobodnego $\bar{V}_j = f(\bar{N}_j)$, stanowiące podstawę opisu zasadniczych charakterystyk ruchu. Wprowadzenie do analizy dowolnej cechy wymaga więc z reguły ustalenia wartości tylko dwóch współczynników tego równania, tj. A_1 i A_2 .
4. Struktura rodzajowa ruchu została w modelu uwzględniona w sposób bezpośredni, co umożliwia uniknięcie w metodzie wykorzystywania tzw. współczynników przeliczeniowych, będących powodem dużych błędów szacowania warunków ruchu.
5. Model ruchu potoku uwzględni szczegółową klasyfikację rodzajową pojazdów.

Zaletą zaproponowanego w pracy modelu ruchu potoku jest także łatwość opracowania metody oceny warunków ruchu, wynikająca z etapowego wyznaczania modelu. Zmienne niezależne, obejmujące poszczególne cechy drogi i ruchu, były kumulowane w procesie analizy, co znacznie ułatwia to opracowanie, nawet przy dużej liczbie zmiennych niezależnych. Wymieniona zaleta zapewnia także w przyszłości względnie proste korygowanie metody, spowodowane np. zmianą charakterystyk ruchu lub parku samochodowego.

Opracowanie metody oceny warunków ruchu wymaga jeszcze dalszych, uzupełniających badań i analiz. Przede wszystkim dotyczyć one powinny nieanalizowanego dotąd zakresu wartości zmiennych trzech wielkości. Pierwsze dwie z nich to współczynniki A_1 i A_2 równania ruchu swobodnego. Trzecią

wielkością jest wskaźnik możliwości wyprzedzania WM.

Prace zmierzające do wyznaczenia wzorów na obliczanie wartości współczynników A1 i A2 są aktualnie realizowane przy współpracy autora w ramach badań nad szczegółową metodą oceny warunków ruchu na dwupasowych drogach dwukierunkowych [50]. Dotychczas opracowane wzory uwzględniają następujące cechy:

- a) drogowe - długość odcinka, promień i kąt zwrotu krzywizny poziomej, pochylenie podłużne, odległość widoczności na wyprzedzanie, odległość przeszkód bocznych od krawędzi jezdni, rodzaj pobocza, występowanie przejazdu kolejowego i stan jego nawierzchni drogowej, odległość odcinka od granicy miasta i wielkość tego miasta, parametry geometryczne sąsiednich odcinków drogi;
- b) ruchowe - gęstość ruchu przeciwbieżnego, ograniczenie prędkości (wynikające z odpowiedniego oznakowania pionowego), długość odcinka z zakazem wyprzedzania, warunki ruchu na odcinkach sąsiednich.

Celem najbliższych badań jest większe uszczegółowienie tych wzorów oraz uwzględnienie dalszych cech drogowych, takich jak np. szerokość jezdni i występowanie dodatkowych pasów ruchu. Badania te dotyczą średnich prędkości podróży w ruchu swobodnym pojazdów samochodowych poszczególnych grup rodzajowych, są więc stosunkowo proste do przeprowadzenia.

Uzupełniające badania i analizy w celu opracowania metody muszą obejmować także klasyfikację warunków ruchu. Podstawowym miernikiem tej klasyfikacji powinna być, zdaniem autora, średnia prędkość potoku. Oprócz niej powinny być zastosowane także inne mierniki warunków ruchu, takie jak np. gęstość ruchu k , czy współczynnik β , który równy jest ilorazowi wskaźników możliwości wyprzedzania WM i zapotrzebowania na wyprzedzanie WZ.

Ponadto, w przypadku opracowywania metody o bardzo szczegółowej i kompleksowej ocenie warunków ruchu, uściślenia wymagają funkcje wybranych kwantyli prędkości ruchu nieswobodnego pojazdów potoku oraz poszczególnych grup rodzajowych. Uściślenie to polegałoby na ustaleniu szczegółowych postaci wymienionych funkcji przy określonym już układzie zmiennych i wykorzystaniu dotychczasowych wyników badań empirycznych.

Metoda oceny warunków ruchu, określona na podstawie modelu przedstawionego w pracy, może być zastosowana w praktyce między innymi do:

- a) bieżącej oceny warunków ruchu na poszczególnych odcinkach drogi, zwłaszcza wyszukania odcinków krytycznych,
- b) dobierania parametrów geometrycznych drogi, w tym także przekroju poprzecznego (szczególnie do podejmowania decyzji o zastosowaniu przekroju dwujezdniowego),
- c) porównywania wariantów tras drogowych,
- d) stwierdzenia ewentualnej konieczności i zakresu modernizacji drogi,
- e) innych celów, jak np. ustalenie prędkości projektowej drogi.

8. WNIOSKI

Najtrudniejszym zadaniem przy opracowywaniu metody oceny warunków ruchu na międzywęzłowych odcinkach dróg jest bez wątpienia wyznaczenie modelu ruchu potoku. Wynika to przede wszystkim ze złożoności procesu ruchu drogowego, na którego przebieg ma wpływ bardzo dużo czynników. Stąd też dotychczas wyznaczenie modelu ruchu przeprowadzało się stosując wiele uproszczeń. Najczęściej polegały one na ograniczaniu w analizie liczby zmiennych niezależnych lub na nadaniu niektórym zmiennym charakteru ogólnego (np. krętość, falistość, prędkość projektowa, udział w potoku pojazdów innych niż osobowe, odniesienie miar i cech ruchu do obu pasów drogi łącznie). W wielu przypadkach uproszczenia te polegały również na wykorzystaniu - przynajmniej w pewnym zakresie zmiennych - teoretycznych zależności, nie potwierdzonych badaniami empirycznymi. Dotyczyło to szczególnie opisu wzajemnego oddziaływania poszczególnych czynników drogowo-ruchowych na warunki ruchu. Konsekwencją tych uproszczeń była stosunkowo mała dokładność modeli, utrudniająca opracowanie poprawnej metody oceny warunków ruchu na krótkich, jednorodnych geometrycznie odcinkach drogi, zwłaszcza drogi dwupasowej, dwukierunkowej. Większość dotychczas opracowanych metod ma charakter ogólny i służy do przybliżonego szacowania warunków ruchu na dłuższych odcinkach.

Przedstawiony przez autora w niniejszej pracy model ruchu potoku pojazdów, wyznaczony w sposób odmienny od dotychczas stosowanych, daje podstawę do dalszego rozwoju metod oceny warunków ruchu na międzywęzłowych odcinkach dróg. Istotą modelu jest przyjęcie:

- szczegółowej struktury rodzajowej pojazdów potoku z pominięciem stosowania współczynników przeliczeniowych dla pojazdów różnych typów;
- rozkładu prędkości pojazdów potoku w ruchu swobodnym jako splotu rozkładów normalnych;
- równania ruchu swobodnego $\bar{V}_j = f(\bar{N}_j)$ (zdefiniowanej przez autora zależności między średnią prędkością i średnim wskaźnikiem efektywnej mocy jednostkowej pojazdów samochodowych) za podstawę wyznaczania charakterystyk ruchu swobodnego i niektórych elementów charakterystyk ruchu nieswobodnego;
- wskaźników zapotrzebowania na wyprzedzanie i możliwości wyprzedzania, opracowanych przez autora, za podstawę wyznaczania charakterystyk ruchu nieswobodnego.

Przeprowadzone przez autora badania i analizy upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

1. W celu poprawnego szacowania warunków ruchu na polskich drogach zamiej-
skich niezbędne jest sklasyfikowanie pojazdów w co najmniej sześć grup
rodzajowych, w tym dwóch grup pojazdów osobowych, trzech ciężarowych i
jednej grupy pojazdów powolnych (szczegółowy wykaz tych grup przedsta-
wia tablica 3.1).
2. Stosowanie w metodzie oceny warunków ruchu współczynników przeliczenio-
wych, w celu uwzględnienia wpływu na warunki ruchu pojazdów różnych
grup rodzajowych, jest podejściem nieprawidłowym, powodującym znaczne
błędy. Struktura rodzajowa pojazdów powinna być uwzględniana bezpośred-
nio w modelu ruchu potoku poprzez odpowiednie zmienne niezależne.
3. Zaproponowany w niniejszej pracy model ruchu potoku pojazdów charakte-
ryzuje się następującymi zaletami:
 - dużą dokładnością szacowania parametrów rozkładu prędkości pojazdów,
 - uwzględnieniem wielu, ważnych z punktu widzenia warunków ruchu, cech
drogi i ruchu,
 - możliwością łatwego uszczegółowienia modelu, poprzez uwzględnienie
dalszych cech drogi i ruchu oraz niektórych nowych mierników warunków
ruchu,
 - możliwością łatwego korygowania modelu ze względu na zmianę charakte-
rystyk ruchu,
 - prostą postacią poszczególnych funkcji.
4. Opracowany model ruchu potoku umożliwia wyznaczenie w zakresie objętych
badaniami wartości cech drogi i ruchu:
 - pełnej charakterystyki prędkości pojazdów potoku i poszczególnych
grup rodzajowych w ruchu swobodnym,
 - średnich prędkości pojazdów potoku oraz poszczególnych grup rodzajo-
wych w ruchu nieswobodnym,
 - fundamentalnych zależności, tj. między średnią prędkością, gęstością
i natężeniem ruchu,
 - podstawowych parametrów ruchu w warunkach przepustowości.
5. Przedstawiony przez autora model ruchu potoku daje możliwość opracowa-
nia szczegółowej metody oceny warunków ruchu na krótkich jednorodnych
geometrycznie odcinkach dwupasowej drogi dwukierunkowej przy stosunkowo
małym zakresie uzupełniających prac analitycznych i badań empirycznych.
Posiadanie takiej metody miałoby duże znaczenie praktyczne, ponieważ
umożliwiłoby dokonanie dokładniejszej oceny warunków ruchu na poszcze-
gólnych odcinkach drogi, np. wyszukanie odcinków krytycznych.
6. Uzupełniające badania i analizy, w celu opracowania szczegółowej metody
oceny warunków ruchu na drogach zamiejskich, powinny dotyczyć przede
wszystkim wyznaczenia, w nierozważanym dotąd zakresie wartości zmienn-
nych niezależnych, współczynników równania ruchu swobodnego $\bar{V}_j = f(\bar{N}_j)$,
wskaznika możliwości wyprzedzania i klasyfikacji warunków ruchu (w tym
także na drogach wielopasowych).
7. Dalsze badania nad udoskonaleniem dotychczasowych sposobów modelowania
ruchu powinny obejmować głównie uściślenie wskazanych w pracy funkcji
dowolnych kwantyli prędkości ruchu nieswobodnego pojazdów potoku i po-

szczególnych grup rodzajowych. Uzupełnienie tych analiz rozszerzyłoby możliwości stosowania modelu o wyznaczenie pełnych charakterystyk prędkości pojazdów w dowolnych warunkach ruchu nieswobodnego oraz wyznaczanie wartości innych mierników oceny warunków ruchu, takich jak: koszty ruchu, straty czasu, praca przewozowa itp.



LITERATURA

- [1] Aerde van M., Yagar S.: Volume Effects on Speeds of 2-lane Highways in Ontario. *Transportation Research* 4/1983
- [2] Anochin B.B.: Issledowanije wlijanija sozretanija osnovnykh geometricheskikh elementow dwuchpołosnykh dorog na propusknuju sposobnost. Trudy MADI, Moskwa 1980
- [3] Anochin B.B.: Propusknaja sposobnost siožnykh uczastkow dwuchpołosnykh, awtomobilnykh dorog. Disertacija na k.t.n. MADI, Moskwa 1982
- [4] Brannolte V.: Verkehrsablauf an Steigungsstrecken von Richtungsfahrbahnen. *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*. Heft 318, Bonn 1980
- [5] Breton Le P.: Saturation et variation du débit - incidence sur le temps de parcours des véhicules. *Transport - Environnement - Circulation* 49/1981
- [6] Brühl F.: Spezielle Untersuchungen des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstrassen mit Hilfe der Simulation. *Strassenverkehrstechnik* 4/1984
- [7] Craus J., Polus A., Grinberg J.: A Revised Method for the Determination of Passenger Car Equivalencies. *Transportation Research A*. 14 A, 4/1980
- [8] Cron F.W.: Highway Design for Motor Vehicles. A Historical Review. Part 4: The Vehicle - Carrying Capacity of the Highway. *Public Roads* 42/1975
- [9] Dębicki M.: Teoria samochodu, teoria napędu. WNT, Warszawa 1971
- [10] Diewald W.J., Asce A.M.: Incorporating Highway Safety Into Level of Service. *Transportation Engineering Journal* 5/1974
- [11] Duncan N.C.: A Note on Speed /Flow/ Concentration. *Traffic Engineering and Control* 1/1976
- [12] Duncan N.C.: Rural Speed/Flow Relations. PTRC Proceedings of Seminar X Summer Annual Meeting, University of Warwick, England 1974
- [13] Freso P.: Charakteristiky dopravného pruhu. *Silniční Obzor* 2/1987
- [14] Fricker J.D., Tsay Hull-Sheng: Estimating Highway Speed Distributions from a Moving Vehicle. *Transportation Research Record* 1047/1985

- [15] Galin D.: Application of the Citizen Participation Approach to the Quality of Service - Empirical Findings. Traffic Engineering and Control 2/1983
- [16] Galin D.: Speeds on Two-lane Rural Roads - A Multiple Regression Analysis. Traffic Engineering and Control 8/1981
- [17] Galin D.: The Citizen Participation Approach - A New Approach to Quality of Service. Traffic Engineering and Control 7-8/1982
- [18] Gerz U., Meewes V.: Verkehrsablauf auf Strassen mit und ohne Richtungstrennung - ein methodischer Ansatz zur Ermittlung der Betriebs- und Zeitkosten der Strassenbenutzung und zur Bewertung von Strassen, Strassenverkehrstechnik 1/1977
- [19] Guinn D.W., Reilly E.F., Seifert J.: Truck Equivalency, Final Report, Bureau of Safety and Traffic, New Jersey Department of Transportation, New Jersey 1970
- [20] Hall F., Gunter M.A.: Further Analysis of the Flow-Concentration Relationship. Transportation Research Record 1091/1986
- [21] Heathington K.W., Jones A.D.: An Analysis of Peak Period Freeway Volume Characteristics. Traffic Engineering 5/1966
- [22] Heidemann D.: Eine analytische Berechnungsmethode für Geschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte. Zeitschrift Verkehrssicherheit 1/1986
- [23] Heidemann D., Hotop R.: Auswertung von Fundamentaldiagrammen an Bundesautobahnen. Strassenverkehrstechnik 1/1979
- [24] Heidemann D., Hotop R.: Verteilung der PkV - Geschwindigkeiten im Netz der Bundesautobahnen. Strasse und Autobahn 5/1984
- [25] Heidemann D.: Über die Konstruktion von Stärke - Dichte - Beziehungen des Verkehrsablaufs auf mathematisch-stochastischer Grundlage. Strassenverkehrstechnik 2/1979
- [26] Highway Capacity Manual. Practical Applications of Research U.S. Government Printing Office. Washington, D.C. 1950
- [27] Highway Capacity Manual 1965. Transportation Research Board, Special Report 87, Washington, D.C. 1965
- [28] Highway Capacity Manual 1985. Transportation Research Board, Special Report 209, Washington, D.C. 1985
- [29] Hoppe L.M., Sosin J., Szczuraszek T., Kempa J.: Charakterystyka ruchu pojazdów na wzniesieniach dróg. Materiały Konferencji Naukowej nt. „Identyfikacja i sterowanie ruchem drogowym”, Kraków 1979
- [30] Hotop R.: Untersuchung der Verkehrsqualität auf zwei- und dreispurigen BAB - Richtungsfahrbahnen. Strassenverkehrstechnik 6/1975
- [31] Huber M.J.: Estimation of Passenger - Car Equivalents of Trucks in Traffic Stream. Transportation Research Record 869/1982

- [32] Hyde T., Wright C.C.: Extreme Value Methods for Estimating Road Traffic Capacity. *Transportation Research* 2/1986
- [33] Jamroz K., Michalski L., Szczuraszek T.: Próba tymczasowego uzupełnienia wytycznych obliczenia przepustowości dwupasowych dróg dwukierunkowych. *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Metody oceny warunków ruchu na dwupasowych drogach dwukierunkowych”*, Warszawa 1984
- [34] Jamroz K., Szczuraszek T. i inni: Propozycja metody PWR-87 obliczania przepustowości i oceny warunków ruchu na drogach zamiejskich. *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Inżynieria ruchu - teoria i praktyka”*, Wrocław 1987
- [35] John A.D.St.: Nonlinear Truck Factor for Two-lane Highways TRB.
Transportation Research Record 615/1976
- [36] Kato Akira: A synthesis and Perspective of Traffic Assignment Models. *Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan* 389/1988
- [37] Keller H., Hampe H.: Verkehrsablauf bei Richtgeschwindigkeit 130 km/h auf neuen Bundesautobahnabschnitten. *Strasse und Autobahn* 4-5/1981
- [38] Kimber R.M., Mc Donald M., Housell N.: Passenger Car Units in Saturation Flows, Concept, Definition, Derivation. *Transportation Research Board* 1/1985
- [39] Kisliakow W.M., Filipow W.W., Szkoliarenko J.A.: Matematyczskoje modelirovanije i ocenka usłowij dwizenija awtomobilej i pieszochodow. *Transport*, Moskwa 1979
- [40] Kleinschmidt P.: Bewertung des Verkehrsablaufes und Bemessung zweispuriger Landstrassen. *Die Strasse* 2/1988
- [41] Krystek R.: Syntetyczny wskaźnik jakości ruchu ulicznego jako kryterium sterowania. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej*, Gdańsk 1980
- [42] Leung W.S., Lau C.C.: A New Study of the Traffic Flow-Concentration Relationship. *Traffic Engineering and Control* 10/1975
- [43] Leutzbach W., Wiedemann R.: Development and Applications of Traffic Simulation Models at the Karlsruhe Institute für Verkehrswesen. *Traffic Engineering and Control* 5/1986
- [44] Linzer E., Roess R., Mc Shane W.: Effect of Trucks, Buses and Recreational Vehicles on Freeway Capacity and Service Volume. *Transportation Research Record* 699/1979
- [45] Metodicheskie rekomendacii po ocenke propuskoj sposobnosti awtomobilnych dorog. *Transport*, Moskwa 1975
- [46] Michalski L., Kempa J., Sandecki T.: Porównanie metod oceny warunków ruchu i obliczania przepustowości na przykładzie wybranych odcinków dróg w Polsce. *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Metody oceny warunków ruchu na dwupasowych drogach dwukierunkowych”*. Warszawa 1984

- [47] News Road and Traffic: Speed /Flow/ Geometry Studies on Rural Single - Carriageway Roads. Traffic Engineering and Control 2/1981
- [48] Pawłowski M., Kempa J., Szezuraszek T.: Urządzenie do pomiarów ruchu drogowego. Drogownictwo 10/1988
- [49] Praca zbiorowa: Aktualizacja wytycznych obliczania przepustowości dróg zamiejskich. ATR Bydgoszcz, Politechnika Gdańska, Politechnika Warszawska, 1986 (praca nie publikowana)
- [50] Praca zbiorowa: Metoda oceny warunków ruchu i obliczania przepustowości zamiejskich dwupasowych dróg dwukierunkowych. Etap I, II. Politechnika Warszawska, Politechnika Gdańska, ATR Bydgoszcz, 1987, 1989 (praca nie publikowana)
- [51] Praca zbiorowa: Opracowanie koncepcji metody oceny warunków ruchu na drogach zamiejskich przystosowanej do prac planistycznych i projektowych. Politechnika Warszawska, Politechnika Gdańska, ATR Bydgoszcz, 1985 (praca nie publikowana)
- [52] Praca zbiorowa: Pomiary i badania ruchu drogowego. WKiŁ, Warszawa 1984
- [53] Praca zbiorowa: Rynek motoryzacyjny. WKiŁ, Warszawa 1980
- [54] Praca zbiorowa: Uzupełnienie wytycznych obliczania przepustowości dwupasowych dróg dwukierunkowych. Politechnika Gdańska, ATR Bydgoszcz, Politechnika Warszawska, 1984 (praca nie publikowana)
- [55] Praca zbiorowa: Wytyczne obliczania przepustowości dróg zamiejskich - projekt. Politechnika Warszawska, Politechnika Gdańska, ATR Bydgoszcz, 1987 (praca nie publikowana)
- [56] Proposed Chapters for the 1985 Highway Capacity Manual. Transportation Research Board. TR Circular 281, Washington 1984
- [57] Räder-Grossmann T.: Untersuchungen zum Einfluss von Fahrbahnebenenheiten auf die Fahrgeschwindigkeit und zu einigen Auswirkungen. Die Strasse 1/1988
- [58] Report XVII World Road Congress. Question III. Interurban Roads and Motorways. Sydney 1983
- [59] Richtlinien für die Anlage von Strassen RAS, Querschnitte RAS-Q. Ausgabe 1982
- [60] Road Capacities. Queues and Delays. Swedish Road Administration. Report 197 702, TV 131, Stockholm 1981
- [61] Road Transport Research, Traffic Capacity of Major Routes. OCDE 1983
- [62] Roess R.P.: Efforts Towards the Third Edition of the Highway Capacity Manual. Traffic Engineering and Control 8/1983
- [63] Roess R.P.; Linzer E.M., Mc Shane W.R., Pignataro L.J.: A Revised Procedure for the Capacity Analysis of Basic Freeway Sections. Transportation Research 1/1980

- [64] Roess R.P., Mc Shane W.R., Linzer E.M., Pignataro L.J.: Freeway Capacity Analysis Procedures. ITE Journal 12/1980
- [65] Rørbech J.: Capacity and Level of Service Conditions on Danish Two-lane Highways and Motorways. Proceedings of the Seminar on Road Design Held During the PTRC, Summer Annual Meeting. University of Warwick, England 1974
- [66] Rostocki A., Wieniawski W.: Motoryzacja w liczbach. WKiŁ, Warszawa 1977
- [67] Ruch drogowy. Centralne Biuro Projektowo-Badawcze Dróg i Mostów, Warszawa 1987
- [68] Rukowodstwo po ocenke propusknoj sposobnosti awtomobilnych dorog. Transport, Moskwa 1982
- [69] Saradshow W., Kleinschmidt P., Schwarzer W.: Ergebnisse der praktischen Überprüfung des neuen Verfahrens der TV Dresden zur Bewertung des Verkehrsablaufes und zur kapazitiven Bemessung der freien Strecke von Landstrassen. Die Strasse 12/1984
- [70] Saradshow W., Kleinschmidt P., Thomas K.: Ein neues komplexes Verfahren zur Bewertung des Verkehrsablaufes und zur kapazitiven Bemessung der freien Strecke von Landstrassen. Die Strasse 4/1982
- [71] Schmidt G., Stappert K.H.: Verkehrstechnische Ergebnisse aus dem Abgas - Grossversuch. Strassenverkehrstechnik 3/1986
- [72] Schofield M.: Speed, Flow and Capacity on the M6 Motorways. Traffic Engineering and Control 10/1986
- [73] Shih-Miao Chin: Cost as a Criterion for Evaluating Highway Level of Service. ITE Journal 8/1978
- [74] Silianow W.W., Jeremin W.M., Murawlewa L.J.: Imitacjonnoje modelirowanije transportnych potokow w projektowaniu dorog. Ministerstwo Wyższewo i Sredniewo Specjalnowo Obrazowanija ZSRR, Moskwa 1981
- [75] Silianow W.W.: Teoria transportnych potokow w projektowaniu dorog i organizacji dżiwienija. Transport, Moskwa 1977
- [76] Simpson D., Kerman J.A.: The Research and Development Background to „Highway Link Design”. Traffic Engineering and Control 9/1982
- [77] Simpson D.: The Relation Between Route Geometry and Vehicle Speed. Traffic Engineering Division, Department of Transport, 1980
- [78] Sitnikow J.M., Binnatow A.G.: Principy obosnowanija rosczjetnoj propusknoj sposobnosti awtomobilnych dorog. Sbornik Naucznych Trudow MADI, Moskwa 1980
- [79] Skutil V.: Measuring the Quality of Traffic Flow. ITE Journal 11/1985
- [80] Suchorzewski W.: Wybrane zagadnienia inżynierii ruchu. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1971

- [81] Szczuraszek T., Cielecki A., Kempa J.: Prace nad rozwojem metod obliczenia przepustowości i oceny warunków ruchu na dwupasowych drogach dwukierunkowych. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Metody oceny warunków ruchu na dwupasowych drogach dwukierunkowych”, Warszawa 1984
- [82] Szczuraszek T., Kempa J.: Samochody dostawcze jako grupa rodzajowa pojazdów w potoku. Drogownictwo 4/1982
- [83] Szczuraszek T.: Klasa samochodu a poziom ryzyka wypadku. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Wybrane zagadnienia bezpieczeństwa ruchu drogowego”, Katowice 1988
- [84] Szczuraszek T.: Metoda uwzględniania struktury rodzajowej pojazdów w modelowaniu ruchu potoku na międzywęzłowym odcinku drogi. Centralny Program Badań Podstawowych Nr 02.19-02.09, I, II, III i IV część sprawozdania. Warszawa 1986, 1987, 1988, 1989 (praca nie publikowana)
- [85] Szczuraszek T.: Model ruchu na międzywęzłowym odcinku drogi. Archiwum Inżynierii Lądowej PAN 3/1988
- [86] Szczuraszek T.: Nasycenie ruchu na drodze zamiejskiej w warunkach zatoru. Archiwum Inżynierii Lądowej PAN 2/1989
- [87] Szczuraszek T.: Nowe tendencje w klasyfikowaniu struktury rodzajowej ruchu. Drogownictwo 6/1987
- [88] Szczuraszek T.: Obliczanie przepustowości dwupasowych dróg dwukierunkowych metodą MADI. Problemy Projektowania Dróg i Mostów 3/1985
- [89] Szczuraszek T.: Propozycja nowej klasyfikacji rodzajowej pojazdów. Zeszyty Naukowe ATR Nr 164/26, Bydgoszcz 1989
- [90] Szczuraszek T.: Próba ustalenia granicy między ruchem zależnym i niezależnym w strumieniu ruchu. Materiały Konferencji Naukowej nt. „Nauka i praktyka w transporcie”, Warszawa 1985
- [91] Szczuraszek T.: Wpływ niektórych parametrów ruchowych i drogowych na straty czasu samochodów osobowych na wzniesieniach dwupasowych dróg dwukierunkowych określony za pomocą modelu symulacyjnego. Rozprawa doktorska. Gdańsk 1979 (praca nie publikowana)
- [92] Szczuraszek T.: Wpływ parametrów drogowych na prędkość pojazdów powolnych. Drogownictwo 1/1989
- [93] Thomas K., Kleinschmidt P.: Die spezifische Verkehrsleistungspraktikables Effektivitätsmass zur Bewertung des Verkehrsablaufes. Die Strasse 10/1981
- [94] Thomas K., Kleinschmidt P., Saradshow W.: Die Wirkung der Fahrbahn - und verkehrsbedingten Einfluss grössen auf den Verlauf der Geschwindigkeits - Dichte - Beziehung zweispuriger Landstrassen. Die Strasse 6/1982

- [95] Thomas K., Kleinschmidt P., Saradshow W.: Über die Grundsätze eines komplexen Bewertungsverfahrens des Verkehrsablaufes auf Landstraßen. Die Strasse 12/1981
- [96] Tracz M.: Przepustowość dróg wielopasowych wg HCM-1985. Drogownictwo 12/1985
- [97] Tracz M.: Przepustowość dwupasowych dróg dwukierunkowych wg HCM-1985. Drogownictwo 7-8/1987
- [98] Troutbeck R.J.: Effect of Overtaken Vehicle Speed and Length on Overtaking Behaviour on Two-lane Rural Roads. Traffic Engineering and Control 6/1982
- [99] Turner D.J.: Traffic Characteristics of a Rural Motorway. Traffic Engineering and Control 5/1983
- [100] Wahlgren O.: The Dependence of Vehicle Speeds on Different Factors - Particularly Road Geometry on Two-lane Highways in Finland. Finland Institute of Technology, Scientific Researches 22/1977
- [101] Wasiliew A.P.: Metodika razziota srednej skorosti transportnowo potoka. Awtomobilnyje Dorogi 1/1988
- [102] Wasiliew A.P.: Propusknaja sposobnost dorog w razlicznyje periody goda. Awtomobilnyje Dorogi 1/1983
- [103] Watanatada T.: A Model for Predicting Free-flow Speeds Based on Probabilistic Limiting Velocity Concepts: Theory and Estimation. Transportation Research Record 1091/1986
- [104] Werner B.A., Morrall J.F., Halle G.: Effects of Recreational Vehicles on Highway Capacity. Traffic Engineering 5/1975
- [105] Werner B.A., Morrall J.F.: Passenger Car Equivalencies of Trucks, Buses and Recreational Vehicles for Two-lane Rural Highways. Transportation Research Record 615/1976
- [106] Whight C.C., Hyde T.: The Measurement and Interpretation of Speed - Flow Relationships. Traffic Engineering and Control 4-5/1972
- [107] Whyte H.G. and associates: Passenger Car Equivalent Values for Rural Highways. Texas Transportation Institute, December 1981
- [108] Winzer T.: Measurement of Acceleration Noise and Discussion of the Energy Model Developed by Drew. Transportation Research 6/1981
- [109] Wytyczne obliczania przepustowości dróg zamiejskich. Problemy Projektowania Dróg i Mostów 1/1972
- [110] Yagar S.: Predicting Speeds for Rural 2-lane Highways. Transportation Research 1/1984
- [111] Yagar S., Aerde van M.: Geometrical and Environmental Effects on Speeds of Two-lane Highways. Transportation Research 4/1983

THE MODEL OF TRAFFIC FLOW ON TWO-LANE ROADS

Summary

The model of traffic flow on two-lane roads, presented in this paper, has been worked out in a different way than those known up to now. The relationship between an average travel speed and average effective factor of vehicle engine power, as well as indicators of demand and offer for overtaking, elaborated by the author, are the essential elements of the model. Furthermore, regard to the detailed traffic flow composition with simultaneous disregard of the equivalence coefficients of non-passenger vehicles is an important idea of the paper. Owing to this, a simple model of great exactness, practical in use, has been worked out.

After little analytic work and field study have been done, the model makes it possible to elaborate a particular method of evaluating the traffic flow conditions on rural, two-lane roads.

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ДВУХПОЛОСНОЙ
ДВУНАПРАВЛЕННОЙ ДОРОГЕ

Резюме

Представленная в работе модель движения транспортных потоков на двухполосных двуполосных дорогах была разработана иным образом чем до сих пор. Основными элементами модели являются сформулированные автором: зависимость средней скорости от среднего коэффициента эффективной удельной мощности автомобилей, а также коэффициенты потребности в обгонах и в возможности обгонов. Кроме того, важным признаком модели является учёт детального состава потока без необходимости одновременного применения перерасчётных коэффициентов средств передвижения разных типов к легковым автомобилям. В результате этого получили простую модель движения транспортных потоков с большой точностью и практичную в применении.

Представленная в работе модель, после выполнения дополнительных аналитических и эмпирических работ в сравнительно небольшом масштабе, делает возможным разработку детального метода расчёта пропускной способности и оценки условий движения на загородных двухполосных двуполосных дорогах.

**Biblioteka Główna ATR
w Bydgoszczy**

75441

ISSN 0209-0597