

POMIARY PARAMETRÓW RUCHU DROGOWEGO



Prof. dr hab. inż. Janusz GAJDA

Dr hab. inż. Ryszard SROKA, prof. n. AGH

Dr inż. Marek STENCEL

Dr inż. Piotr BURNOS

Dr inż. Tadeusz ŻEGLEŃ

Dr inż. Piotr PIWOWAR

Dr inż. Zbigniew MARSZAŁEK

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Inżynierii Biomedycznej

Katedra Metrologii i Elektroniki

al. A. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

Projekt okładki i stron tytułowych: **Przemysław Spiechowski**

Dyrektor Pionu Produktów i Usług: **Sylwia Krawczyk**

Menedżer ds. Wydawniczych: **Emilia Leśniewska**

Wydawca: **Karol Zawadzki**

Koordynator ds. redakcji: **Renata Ziółkowska**

Redaktor: **Agnieszka Grabarczyk**

Koordynator produkcji: **Mariola Grzywacka**

Łamanie: **Grafini**

Recenzenci:

Prof. dr hab. inż. Stanisław Gaca

Prof. dr hab. inż. Andrzej Michalski

Wydanie publikacji dofinansowane przez Akademię Górniczo-Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo.

Więcej na www.legalnakultura.pl

Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2015

ISBN: 978-83-01-18355-4

Wydanie I
Warszawa 2015

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321; faks 22 69 54 288
Infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl; www.pwn.pl

Druk i oprawa: Drogowiec-PL, Kielce

Spis treści

1. Wstęp	1
2. Parametry i charakterystyki ruchu drogowego	4
2.1. Definicje parametrów i charakterystyk ruchu drogowego	7
2.2. Techniki pomiaru parametrów ruchu drogowego	33
2.3. Warunki ruchu pojazdów samochodowych	40
2.4. Modele opisujące strumień pojazdów	41
3. Czujniki i detektory stosowane w monitoringu ruchu drogowego	55
3.1. Czujniki wbudowane	59
3.2. Czujniki nieinwazyjne	89
4. Indukcyjne czujniki pętlowe i ich wykorzystanie w pomiarach parametrów ruchu drogowego	101
4.1. Budowa czujnika	102
4.2. Zjawisko prądów wirowych	104
4.3. Pole magnetyczne czujnika	106
4.4. Parametry zastępcze czujnika	114
4.5. Układy kondycjonowania	129
4.6. Profil magnetyczny pojazdu samochodowego	140
4.7. Zastosowania pomiarowe indukcyjnych czujników pętlowych	144
4.7.1. Układ zliczania pojazdów	145
4.7.2. Pomiar odległości czasowych między pojazdami	149
4.7.3. Pomiar prędkości pojazdu	150
4.7.4. Pomiar długości pojazdu	155
4.7.5. Detekcja przyczepy	161
4.7.6. Detekcja osi pojazdów	162
4.8. Montaż czujnika pętlowego	171
5. Klasyfikacja pojazdów samochodowych	178
5.1. Klasyfikacja pojazdów z wykorzystaniem ich profili magnetycznych	183
5.1.1. Metody nieparametryczne	187

5.1.1.1. Automatyczna klasyfikacja pojazdów w systemach z pojedynczym czujnikiem pętlowym	188
5.1.1.2. Klasyfikacja na podstawie składowych R i X profilu magnetycznego	204
5.1.2. Metody parametryczne	220
5.1.2.1. Metody głosowania	222
5.1.2.2. Metody hierarchiczne	223
5.1.2.3. Metoda miar rozmytych	224
5.1.2.4. Metody grupowania	233
5.2. Wyostrzanie profili magnetycznych	239
5.3. Klasyfikacja oparta na liczbie i konfiguracji osi pojazdów	255
5.4. Reidentyfikacja pojazdów	266
6. Systemy ważenia pojazdów	279
6.1. Oddziaływanie pojazdów na nawierzchnię	280
6.2. Statyczne ważenie pojazdów	288
6.3. Dynamiczne ważenie pojazdów	290
6.3.1. Systemy pokładowe On-board WIM	294
6.3.2. Systemy wolnoprzejazdowe LS-WIM	296
6.3.3. Systemy szybkoprzejazdowe HS-WIM	298
6.3.4. Systemy wieloczujnikowe MS-WIM	302
6.3.5. Systemy mostowe B-WIM	306
6.3.6. Inne systemy WIM	312
6.4. Kryteria wyboru lokalizacji stanowisk WIM	314
6.5. Metody kalibracji systemów WIM	327
6.6. Algorytmy estymacji statycznego nacisku osi	342
6.7. Metody oceny dokładności systemów WIM	355
6.8. Właściwości metrologiczne systemów WIM	367
6.9. Administracyjne systemy WIM	381
7. Podsumowanie	397
Literatura	399

Przemieszczanie się osób oraz transport towarów są podstawowymi objawami aktywności społecznej i gospodarczej. Transport drogowy jest tą gałęzią, która w ostatnich latach rozwija się szczególnie dynamicznie.

W przeszłości konieczność przemieszczania się ludzi wynikała przede wszystkim z poszukiwania źródeł pożywienia. Nasi przodkowie wędrowali więc w poszukiwaniu wody, zwierzyny łownej, obfitszych pastwisk, terenów nadających się pod uprawę. W czasie swoich podróży zazwyczaj człowiek starał się wykorzystywać utarte ścieżki, które w miarę ich używania stawały się stałymi szlakami, a później drogami. Wybór szlaków narzucały człowiekowi: ukształtowanie terenu (góry, przełęcze itp.), jego pokrycie i zaludnienie (lasy, osiedla), konieczność dokonywania przepraw przez rzeki w miejscach najpłytszych (brody), konieczność okresowego zaopatrywania się w czasie wędrówek w żywność i wodę oraz konieczność pokonywania najkrótszej odległości. Początkowo tego rodzaju szlaki komunikacyjne były ledwie przetartymi ścieżkami, mniej lub bardziej wydeptanymi. Z czasem coraz częściej wykorzystywane do wędrówki, transportu zwierząt, a wreszcie do przejazdu pojazdów kołowych ścieżki stopniowo przemieniały się w trakty, a niekiedy były nawet umacniane.

Rozwój gospodarczy powoduje potrzebę transportowania niezbędnych do produkcji surowców i wyprodukowanych z nich towarów w poszukiwaniu rynków zbytu. W początkowym okresie rozwoju transportu drogowego do przenoszenia towarów wykorzystywano siłę ludzi. Gdy rozmiary lub ciężar ładunku przekraczały możliwości jednego człowieka, używano różnego rodzaju nosideł w celu rozłożenia ciężaru między dwóch tragarzy. Do przewożenia większych ładunków wykorzystywano siłę zwierząt domowych, a następnie coraz bardziej udoskonalane pojazdy.

W miarę rozwoju gospodarczego rosły potrzeby transportowania coraz większej masy towarów i coraz większej liczby osób, co przyczyniło się do rozwoju sieci dróg i środków transportu. Wywołany tymi zmianami gwałtowny wzrost natężenia ruchu spowodował w konsekwencji potrzebę prowadzenia pomiaru jego parametrów. Początkowo wynikała ona z wprowadzonych przepisów zapewniających

bezpieczeństwo uczestnikom ruchu drogowego oraz konieczności kontroli ich przestrzegania. W następnych etapach rozwoju zapotrzebowanie na informację pomiarową generowały systemy zarządzające infrastrukturą drogową oraz systemy monitorujące stan środowiska naturalnego. Wynikało ono z dążenia do zapewnienia warunków uczciwej konkurencji w transporcie oraz do zwiększenia jakości obsługi uczestników ruchu drogowego, z prowadzonych badań naukowych nad modelowaniem i prognozowaniem rozwoju ruchu drogowego oraz prac planistycznych nad rozwojem infrastruktury drogowej. Również ekonomiści upatrują w wynikach pomiaru parametrów ruchu drogowego źródło cennej informacji o stanie gospodarki oraz perspektywach jej rozwoju lub recesji.

Zespół autorów od kilkunastu lat prowadzi badania w zakresie pomiaru parametrów ruchu drogowego. W tym czasie zrealizował wiele projektów badawczych obejmujących zarówno pomiary podstawowych parametrów, prowadzone na stanowiskach pomiarowych wyposażonych w indukcyjne czujniki pętlowe, jak i złożone pomiary związane z klasyfikacją pojazdów na podstawie ich profili magnetycznych oraz z ważeniem pojazdów samochodowych w ruchu w systemach *Weigh-In-Motion* (WIM). Zrealizowane projekty stały się inspiracją do napisania niniejszej monografii, a ich wyniki stanowią istotny element jej zawartości merytorycznej.

Układ prezentowanych treści jest następujący. W rozdziałach 2 i 3 zawarto informacje wprowadzające Czytelnika w zagadnienie pomiaru parametrów ruchu drogowego. Omówiono w nich podstawowe pojęcia z teorii ruchu, definiując wiele parametrów, które są przedmiotem bezpośredniego lub pośredniego pomiaru. Przedstawiono również rozwiązania techniczne detektorów i czujników stosowanych w takich pomiarach.

Kolejne rozdziały zawierają opis sprzętu i metod pomiarowych stosowanych do rozwiązywania konkretnych zadań. W rozdziale 4 opisano wykorzystanie najpopularniejszego obecnie czujnika ruchu drogowego, którym jest indukcyjny czujnik pętlowy. Przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne takich czujników przeznaczone do różnych zastosowań. Mogą być one stosowane do detekcji obecności pojazdu w strefie pomiarów, zliczania pojazdów, pomiaru ich prędkości, klasyfikacji, a także – jak to pokazano w tym rozdziale – do wykrywania osi pojazdów samochodowych, w tym również osi podniesionych podczas przejazdu pustych samochodów ciężarowych.

W rozdziale 5 omówiono zagadnienie klasyfikacji pojazdów samochodowych. Problem ten występuje m.in. w systemach automatycznego poboru opłat za korzystanie z infrastruktury drogowej, przy ocenianiu gęstości ruchu i struktury strumienia pojazdów. Prace badawcze i konstrukcyjne prowadzi się w celu uzyskania większej rozdzielczości i skuteczności klasyfikacji. Wymagane są zatem:

- działania związane z poszukiwaniem takich konstrukcji czujników pętlowych, które pozwalają na wykrywanie detali geometrycznej konstrukcji podwozia pojazdu samochodowego;

- działania konstrukcyjne prowadzone z układem kondycjonowania współpracującym z czujnikiem pętlowym;
- działania w zakresie poszukiwania algorytmów przetwarzania sygnałów pomiarowych w celu wydobycia z nich szczegółowej informacji o geometrii i detalach konstrukcyjnych pojazdu, przydatnej w procesie jego klasyfikacji.

Docelowo dąży się do rozpoznawania nie tylko klasy pojazdu, ale nawet konkretnego egzemplarza poruszającego się po sieci dróg. Klasyfikacja o tak dużej rozdzielczości jest nazywana w literaturze reidentyfikacją pojazdów. Wyniki przedstawione w rozdziale 5 wskazują na możliwość osiągnięcia tego celu.

Rozdział 6 dotyczy bardzo ważnego zagadnienia, jakim jest ważenie pojazdów znajdujących się w ruchu. Zadanie to realizują systemy pomiarowe WIM. Wiąże się to z ochroną infrastruktury, zapewnieniem bezpieczeństwa uczestnikom ruchu drogowego, warunków uczciwej konkurencji w działalności gospodarczej, którą jest transport osób i towarów, oraz z ochroną środowiska naturalnego. Problemy kontroli masy pojazdów oraz nacisku ich osi na podłoże łączą się bezpośrednio z poszukiwaniem skutecznego sposobu eliminacji z ruchu pojazdów przeciążonych. Coraz częściej mówi się w różnych krajach o potrzebie automatycznego egzekwowania przepisów obowiązujących w tym zakresie. Przez analogię do fotoradarów systemy pomiarowe realizujące takie zadanie nazywamy foto-WIM lub administracyjnymi systemami WIM. Zrealizowanie takiego zadania wymaga rozwiązania wielu problemów formalnych, technicznych, a dodatkowo – co nie jest bez znaczenia – uzyskania społecznej akceptacji stosowania tych systemów. Wydaje się jednak, że nie ma alternatywy dla takiego rozwiązania.

Jest to pierwsza na polskim rynku wydawniczym monografia ujmująca problem pomiaru parametrów ruchu drogowego od strony stosowanych czujników, układów pomiarowych i algorytmów przetwarzania danych pomiarowych, oparta na własnych doświadczeniach konstrukcyjnych i badawczych jej autorów. Oddając do rąk Czytelnika tę monografię, wyrażamy jednocześnie naszą głęboką nadzieję, że przyczyni się ona do upowszechnienia wiedzy dotyczącej bardzo specyficznego i wąskiego zagadnienia, za jakie mogą być uważane pomiary parametrów ruchu drogowego. Być może dla niektórych stanie się ona inspiracją do podjęcia własnych prac badawczych lub konstrukcyjnych w tym stale rozwijającym się, ciekawym i ważnym obszarze nauki i techniki. Jesteśmy przekonani, że warto podejmować takie działania.

Autorzy

Pomiary parametrów ruchu drogowego były prowadzone w Polsce, począwszy od okresu międzywojennego. W tym czasie pomiary takie wykonywano na drogach pozamiejskich, a ich celem było określenie liczby pojazdów przejeżdżających w jednostce czasu przez dany przekrój drogi [61]. Parametr ten nazwano później natężeniem ruchu lub przepływem pojazdów (ang. *flow*).

Pomiary ruchu drogowego wznowiono po wojnie w 1954 roku. W roku 1965 wprowadzono ujednolicony system pomiarów ruchu, na który składają się pomiary generalne i pomiary uzupełniające. Generalny Pomiar Ruchu Drogowego (GPRD) wykonuje się okresowo co 5 lat – po raz pierwszy został przeprowadzony w 1965 roku. Jak łatwo policzyć, ostatni GPRD wykonano w 2010 roku. Pomiary uzupełniające są prowadzone w okresach pomiędzy pomiarami generalnymi, a ich realizację rozpoczęto w 1975 roku.

Statystyczne dane o ruchu drogowym są publikowane co 5 lat. Zawierają one:

- wartości średniego przepływu dobowego pojazdów oraz strukturę rodzajową ruchu w punktach pomiarowych,
- przepływ pojazdów w sieci dróg (natężenie ruchu) z podziałem na poszczególne województwa i z uwzględnieniem funkcjonalnego podziału dróg,
- rozkład przepływu pojazdów w sieci drogowej,
- łączne długości odcinków dróg z przepływem pojazdów w poszczególnych przedziałach wartości,
- dane opisujące zmiany i kierunki rozwoju ruchu (przepływu, struktury, zmienności parametrów).

Do roku 1980 Generalny Pomiar Ruchu Drogowego był prowadzony na drogach krajowych o nawierzchni twardej. Od roku 2000 pomiary wykonuje się na drogach krajowych i wojewódzkich¹. W okresie przejściowym metodyka pomiarów była zmieniana w zależności przede wszystkim od możliwości realizacji takich pomiarów.

Do roku 1980 GPRD wykonywano w trakcie czternastu okresów dziennych i trzech nocnych. W każdym dniu tygodnia pomiary powtarzano dwukrotnie. Pomia-

¹ W 1999 roku wprowadzono nowy układ sieci dróg wyróżniający drogi krajowe i wojewódzkie.

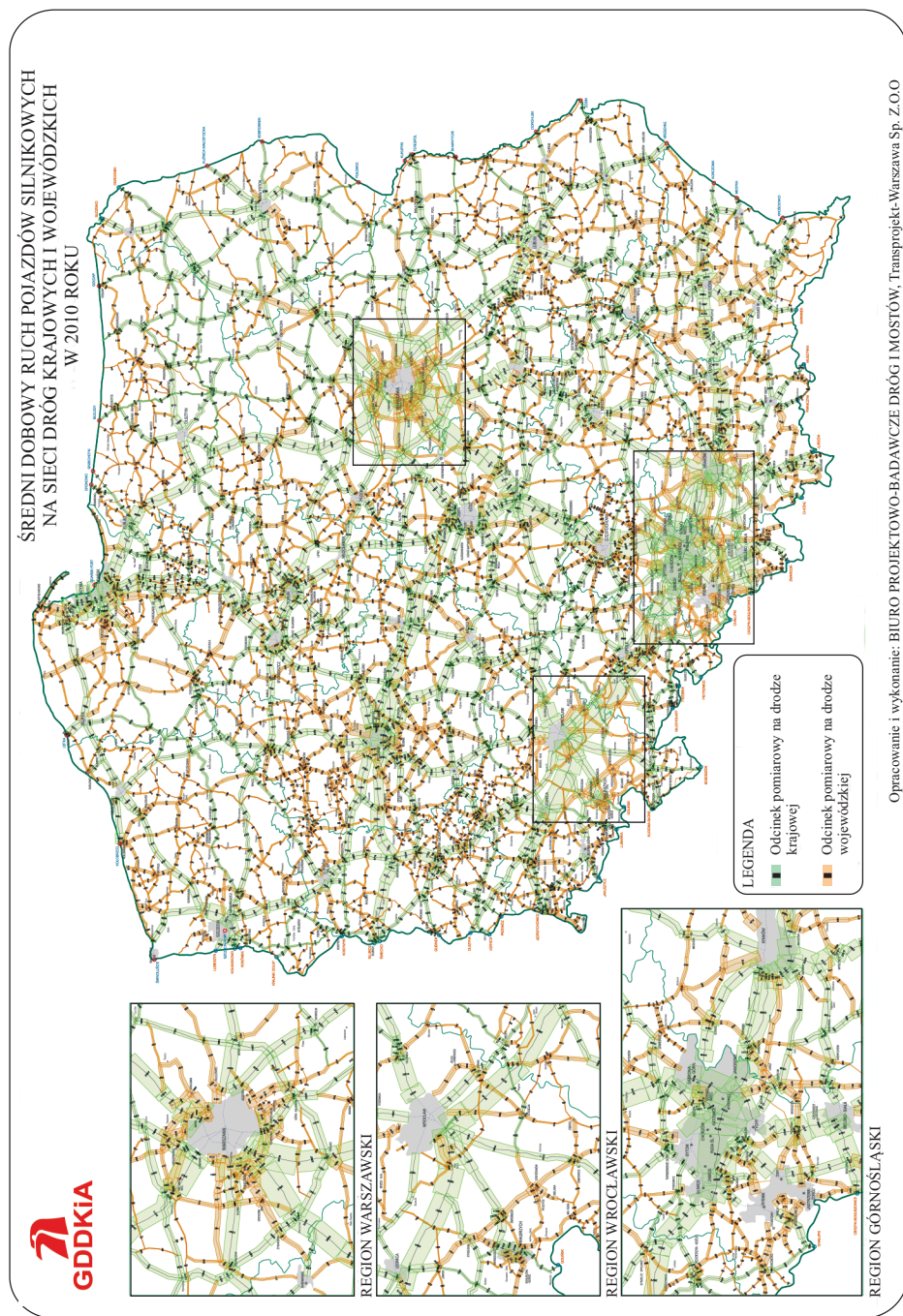
ry dzienne przeprowadzano w okresie ośmiu lub szesnastu godzin. W tych punktach, w których pomiar trwał szesnaście godzin, przeprowadzano również dwa pomiary nocne. Pomiary prowadzili obserwatorzy, którzy na specjalnie przygotowanych formularzach z zaznaczonymi sylwetkami pojazdów nanosili liczby pojazdów przejeżdżających w danym przedziale czasowym przez punkt obserwacyjny². System klasyfikacji pojazdów stosowany podczas takich pomiarów zawiera tabela 2.1. Liczba punktów pomiarowych wynosiła 1734.

W roku 2010 podjęto pierwsze próby automatyzacji pomiarów. Obserwatorzy ruchu mogli korzystać z automatycznych liczników, które były wyposażone w funkcję klasyfikacji pojazdów. Szersze zastosowanie znalazły również kamery wideo. Wyniki pomiarów uzyskane przez obserwatorów uzupełniono wynikami pochodzącymi z automatycznych stacji ciągłego pomiaru ruchu. Pomiary przeprowadzono na 17 247 km dróg w 1793 punktach pomiarowych. Przykładowe wyniki uzyskane podczas Generalnego Pomiaru Ruchu Drogowego w 2010 roku przedstawiono na rysunku 2.1 [253].

Tabela 2.1. Klasyfikacja pojazdów samochodowych stosowana podczas Generalnego Pomiaru Ruchu Drogowego w 2010 roku

Symbol klasy pojazdów	Klasa pojazdu	Współczynniki przeliczeniowe na pojazdy umowne
b	motocykle	0,5
c	samochody osobowe do dziewięciu miejsc łącznie z kierowcą, mikrobusy z przyczepą lub bez	1,0
d	lekkie samochody ciężarowe (dostawcze) o dopuszczalnej masie całkowitej do 3,5 t z przyczepą lub bez	1,0
e	samochody ciężarowe o dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 3,5 t bez przyczepy	2,0
f	samochody ciężarowe o dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 3,5 t z jedną lub więcej przyczepami, ciągniki siodłowe z naczepami, ciągniki balastowe z przyczepami standardowymi i niskopodwoziowymi	3,0
g	autobusy	2,0
h	ciągniki rolnicze z przyczepami lub bez, maszyny samobieżne (walce drogowe, koparki, maszyny rolnicze)	3,0
i	rowery	nie przelicza się

² Praca obserwatora jest uciążliwa. Szybko narastające zmęczenie zwiększa prawdopodobieństwo popełnienia błędów. Dlatego czas pracy obserwatora powinien być ograniczony do trzech godzin. Wydajność obserwatora zawiera się w przedziale od 700 pojazdów na godzinę do 2000 pojazdów na godzinę w zależności od trajektorii ruchu pojazdów i sposobu zapisu wyników zliczania.



Rys. 2.1. Wyniki pomiaru liczby pojazdów przejeżdżających przez daną drogę w ciągu doby, uzyskane podczas Generalnego Pomiaru Ruchu Drogowego w 2010 roku

Uzupełnieniem pomiarów generalnych są pomiary ciągle przepływu pojazdów (natężenia ruchu) w określonych przedziałach czasu (przepływy godzinne, dobowe, tygodniowe itd.). W tym ujęciu najbardziej istotne są określane na tej podstawie wahania przepływu miesięcznego w ciągu roku, dobowego w ciągu tygodnia oraz godzinowego w ciągu doby. Pomiary takie są prowadzone za pomocą automatycznych stacji pomiarowych, rozmieszczonych w wybranych punktach sieci dróg. Wyniki pomiarów są sumowane w godzinnych przedziałach czasu.

Generalny Pomiar Ruchu Drogowego w 2015 roku rozpoczął się w styczniu i został zakończony w październiku. Zakładana łączna długość dróg objętych pomiarem przekracza 18 000 km, a pomiar prowadzony był w 1954 punktach. Każdego dnia, w którym były prowadzone pomiary, brało w nich udział od 10 do 15 tysięcy obserwatorów.

W tym rozdziale zostaną omówione podstawowe parametry i charakterystyki ruchu drogowego, podane ich definicje i interpretacja, a także będzie przedstawiony sposób pomiaru. Wyniki pomiaru są wykorzystywane między innymi w:

- pracach planistycznych dotyczących rozbudowy sieci drogowej zarówno miejskiej, jak i pozamiejskiej, a także rozbudowy infrastruktury służącej do obsługi ruchu drogowego (parkingi, stacje benzynowe, motele);
- pracach projektowych dróg i skrzyżowań;
- organizacji ruchu na określonym terenie;
- analizach ekonomicznych i gospodarczych dotyczących np. rozwoju gospodarczego regionu lub kraju;
- zarządzaniu i utrzymaniu dróg;
- analizie wypadkowości na określonym odcinku drogi oraz w punktach krytycznych;
- analizie oddziaływania ruchu drogowego na środowisko (zanieczyszczenia, hałas);
- pracach związanych z modelowaniem ruchu drogowego i formułowaniem praw rządzących tym ruchem;
- pracach prowadzonych w celu poprawienia komfortu życia obywateli, np. poprzez udostępnianie informacji o aktualnym stanie ruchu drogowego, występujących utrudnieniach i prognozowanym czasie podróży.

2.1. Definicje parametrów i charakterystyk ruchu drogowego

Przedmiotem pomiaru mogą być zarówno parametry pojedynczego pojazdu, jak i parametry strumienia pojazdów poruszających się na danym odcinku drogi. Podstawowe parametry i charakterystyki ruchu drogowego zestawiono w tabeli 2.2 [61].

Tabela 2.2. Parametry i charakterystyki ruchu drogowego

Parametr (charakterystyka) ruchu drogowego	Opis, parametry składowe
Prędkość, straty czasu, zatrzymanie	odległość, droga czas, czas jazdy prędkość chwilowa, prędkość jazdy, prędkość podróży, prędkość miarodajna straty czasu pojazdów liczba zatrzymań
Czas podróży	czas zużyty na przejechanie określonego odcinka drogi czas podróży niekiedy zastępowany jest odwrotnością prędkości
Przepływ pojazdów (natężenie ruchu)	liczba pojazdów, osób, rowerzystów itd. przejeżdżających lub przechodzących przez przekrój drogi w jednostce czasu
Gęstość ruchu	liczba pojazdów znajdujących się w danej chwili na odcinku drogi o określonej długości
Zajętość	procent czasu, w którym określony odcinek drogi jest zajęty przez pojazdy
Odstępy czasowe pomiędzy pojazdami	odstępy czasu pomiędzy kolejnymi pojazdami poruszającymi się w tym samym kierunku po jednym pasie ruchu
Odstępy pomiędzy pojazdami	odcinki drogi rozdzielające kolejne pojazdy poruszające się w tym samym kierunku po jednym pasie ruchu
Koncentracja pojazdów	wyrażana przez gęstość lub zajętość
Pojazdy	różne klasy pojazdów: osobowe, dostawcze, ciężarowe, ciężarowe z przyczepą, ciągniki siodłowe, autobusy zwykłe i przegubowe, motocykle, rowery i inne
Pojazdy ciężarowe	liczba osi, odstępy pomiędzy osiami, masa całkowita, nacisk statyczny przypadający na jedną oś [246]
Struktura rodzajowa ruchu	udział pojazdów należących do poszczególnych klas w strumieniu pojazdów
Struktura kierunkowa i rozkład kierunkowy ruchu	struktura kierunkowa opisuje relacje kierunkowe na wlocie skrzyżowania, a rozkład kierunkowy opisuje ruch w każdym z dwóch kierunków na określonym odcinku drogi
Charakterystyki parkowania: czas parkowania, rotacja, wykorzystanie powierzchni parkingowej, akumulacja	długość czasu parkowania, średnia liczba parkujących pojazdów w danym przedziale czasu na jednym stanowisku, udział (w odniesieniu do wszystkich miejsc) zajętych miejsc parkingowych w określonym przedziale czasu, liczba pojazdów parkujących równocześnie na analizowanym parkingu
Komunikacja zbiorowa: punktualność częstotliwość regularność napełnienie	zgodność przejazdów z rozkładem jazdy odwrotność średniego odstępu czasowego pomiędzy pojazdami rozkład odstępow między pojazdami i odchylenia od średniego odstępu liczba osób w pojeździe przypadająca na jednostkę powierzchni

Parametr (charakterystyka) ruchu drogowego	Opis, parametry składowe
Bezpieczeństwo ruchu zdarzenia: wypadki, kolizje ofiary: ranni, ofiary śmiertelne straty materialne wskaźniki	liczba ludności, liczba pojazdów poszczególnych klas liczba zdarzeń, wypadków i kolizji liczba zdarzeń (wypadków) przypadająca na 1 km drogi
Oddziaływanie na środowisko: hałas, poziom dźwięku zanieczyszczenie powietrza zanieczyszczenie wody drzania	wskaźniki hałasu zanieczyszczenie tlenkami węgla CO, CO ₂ , tlenkami azotu, węglowodorami, pyłami zanieczyszczenie wody chlorkami, olejami, zawiesinami
Energia – zużycie paliwa	litry paliwa na 100 km przejechanej drogi

Podstawą oceny parametrów i charakterystyk wymienionych w tabeli 2.2 są wyniki pomiaru parametrów charakteryzujących pojedynczy pojazd oraz przestrzenne i czasowe relacje występujące pomiędzy dwoma pojazdami. Obecnie szerzej omówimy to zagadnienie, podając definicję wybranych parametrów oraz ich interpretację fizyczną.

Każdy pojazd poruszający się wybranym pasem ruchu jest opisany przez następujące charakterystyczne parametry:

- długość, którą będziemy oznaczać przez l_i ,
- położenie oznaczane przez x_i i umownie rozumiane jako położenie tylnego zderzaka pojazdu,

- prędkość związaną z położeniem znaną zależnością

$$v_i = \frac{dx_i}{dt},$$

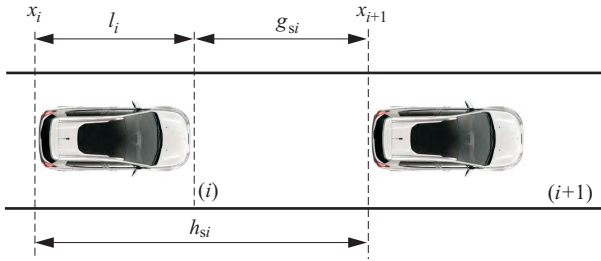
- przyspieszenie określone zależnością

$$a_i = \frac{d^2x_i}{dt^2};$$

parametr ten zależy nie tylko od właściwości silnika, w który jest wyposażony pojazd, ale również od nachylenia drogi, po której się on porusza, zatem nie jest to parametr charakteryzujący tylko sam pojazd. W niektórych przypadkach do analizy ruchu pojazdu wykorzystuje się również pochodną przyspieszenia nazywaną w języku angielskim *jerk* lub *jolt*.

Jest rzeczą oczywistą, że lista parametrów charakteryzujących indywidualny pojazd jest znacznie dłuższa i zawiera dodatkowo np. szerokość i wysokość pojazdu, liczbę osi, odległość pomiędzy osiami, ich nacisk statyczny na podłoże, masę całkowitą pojazdu itd. Niektóre z tych zagadnień będą omawiane w dalszych rozdziałach.

Parametrem charakteryzującym układ dwóch pojazdów jest odległość pomiędzy pojazdami. Sytuację ilustruje rysunek 2.2.



Rys. 2.2. Ilustracja sposobu określania odległości pomiędzy kolejnymi pojazdami [153]

Odległość pomiędzy pojazdami może być rozumiana jako odległość pomiędzy tylnymi zderzakami h_{si} (ang. *space headway*) lub odległość pomiędzy tylnym zderzakiem pojazdu poprzedzającego a przednim zderzakiem pojazdu następnego g_{si} (ang. *space gap*). Związek pomiędzy nimi wynika bezpośrednio z rysunku 2.2 i jest opisany zależnością

$$h_{si} = g_{si} + l_i, \quad (2.1)$$

gdzie l_i jest długością pojazdu.

Dzieląc obustronnie zależność (2.1) przez prędkość pojazdów (zakładamy, że poruszają się one z jednakową prędkością, gdyż tylko w takim przypadku zależności odległościowe pozostają stałe), otrzymamy związek między parametrami czasowymi opisującymi strumień pojazdów

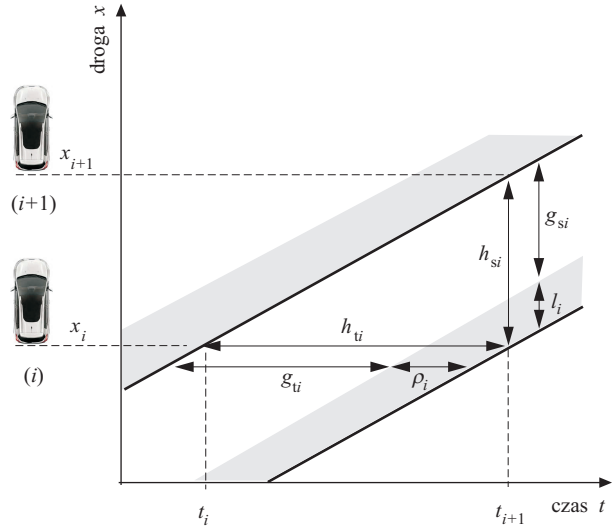
$$h_{ti} = g_{ti} + \rho_i, \quad (2.2)$$

gdzie: h_{ti} – przedział czasu pomiędzy przekroczeniem stanowiska pomiarowego przez tylne zderzaki dwóch kolejnych pojazdów (ang. *time headway*), g_{ti} – przedział czasu pomiędzy przekroczeniem stanowiska pomiarowego przez tylny zderzak pojazdu poprzedzającego i przedni pojazdu nadjeżdżającego po nim (ang. *time gap*), ρ_i – czas zajętości pasa ruchu przez dany pojazd (ang. *occupancy time*); parametr ten jest interpretowany jako czas potrzebny na przejechanie przez pojazd poruszający się z określoną prędkością odcinka równego jego długości.

Na rysunku 2.3 przedstawiono związki pomiędzy zależnościami przestrzennymi a czasowymi, występujące dla dwóch kolejnych pojazdów, w sytuacji gdy poruszają się one z jednakową i stałą prędkością. Dlatego ich tory w układzie współrzędnych czas-droga są równoległymi liniami prostymi. Nazywamy je trajektoriami pojazdu. W przypadku pojazdów przyspieszających na trajektoriach zaobserwujemy zmianę nachylenia. Trajektoria pojazdu nieruchomego jest linią poziomą.

Z zależności (2.1) i (2.2) wynika oczywisty związek między parametrami przestrzennymi a czasowymi danego pojazdu

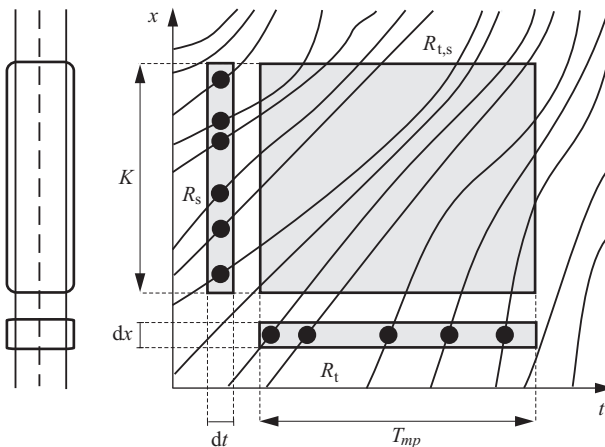
$$\frac{h_{si}}{h_{ti}} = \frac{g_{si} + l_i}{g_{ti} + \rho_i} = v_i. \quad (2.3)$$



Rys. 2.3. Ilustracja zależności przestrzennych i czasowych dla dwóch kolejnych pojazdów poruszających się z jednakową i stałą prędkością [153]

Przytoczone powyżej parametry charakteryzujące pojazdy poruszające się w kolumnie (strumień pojazdów) dotyczą tylko pojazdów poruszających się po jednym pasie ruchu. Oznacza to, że takie pojazdy nie mogą się wyprzedzać, zostaje więc zachowana ich kolejność. Łatwo można powyższe zależności zaadaptować na potrzeby ruchu odbywającego się po kilku pasach ruchu. W takim jednak przypadku kolejność pojazdów nie będzie już zachowana.

Gdy przedmiotem obserwacji i pomiaru jest równocześnie wiele różnych pojazdów, które poruszają się z różną prędkością i mogą przyspieszać i hamować, czasowo-przestrzenny wykres ich trajektorii staje się złożony i może wyglądać tak jak ten przedstawiony na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Trajektorie pojazdów poruszających się po jednym pasie ruchu [153]