

Doc. dr hab. inż. Marianowi Traczowi
składam serdeczne podziękowania za opie-
kę naukową i pomoc w trakcie wykonywania
niniejszej pracy.

Dziękuję również tym wszystkim, któ-
rzy pomogli mi przy realizacji pomiarów
i technicznym opracowaniu pracy.

autor

mgr inż. Janusz Chodur
Politechnika Krakowska
Instytut Dróg, Kolei i Mostów



BADANIA WPŁYWU WAHAŃ RUCHU
NA EFEKTYWNOŚĆ STEROWANIA SYGNALIZACJĄ ŚWIETLĄ
O STAŁYM PROGRAMIE

Praca doktorska

Promotor

doc. dr hab. inż. Marian Tracz

Kraków, wrzesień 1982

SPIS TREŚCI

	str.
PODSTAWOWE SYMBOLE I OZNACZENIA	5
1. WSTĘP	12
1.1. Przedmiot pracy	14
1.2. Sterowanie ruchem na skrzyżowaniu za pomocą sygnalizacji świetlnej	15
1.2.1. Sygnalizacja o stałym programie	16
1.2.2. Sygnalizacja o zmiennych programach /wieloprogramowa/	16
1.2.3. Sygnalizacja aktualizowana	17
1.3. Mierniki oceny efektywności sterowania	18
1.4. Zmienność natężeń ruchu w czasie	23
1.5. Zmiany struktury rodzajowej ruchu	27
1.6. Opis potoku ruchu w ujęciu probabilistycznym	28
1.7. Dotychczasowy stan badań w zakresie charakterystyki wahań natężenia ruchu oraz ich wpływu na efektywność sterowania i wnioski	34
1.8. Cel badań i zakres pracy	39
1.9. Sposób realizacji oraz układ pracy	40
2. POMIARY I BADANIA DLA OKREŚLENIA CHARAKTERYSTYK WAHAŃ RUCHU	42
2.1. Cel i metody badań	42
2.2. Poligony i techniki pomiarowe	43
2.3. Wahania natężeń i struktury ruchu na wlotach skrzyżowań w okresie pomiarowym	44
2.3.1. Czasokres i interwał pomiarów	44
2.3.2. Charakterystyka wahań natężenia ruchu	47
2.3.3. Przetwarzanie danych na EMC	55
2.3.4. Analiza zmienności i współzależności wskaźników wahań ruchu	56

2.3.5. Reprezentatywne charakterystyki wahań natężenia ruchu	60
2.3.6. Zmienność struktury rodzajowej w czasie	62
2.4. Wygładzanie danych empirycznych	64
2.5. Ocena wielkości interwału dla rejestracji natężeń	71
2.6. Analiza wahań ruchu dla określenia typowych profili zmienności natężenia w czasie	73
3. BADANIA ORAZ ANALIZA STATYSTYCZNA PARAMETRÓW PROCESU RUCHU NA WŁOCIE SKRZYŻOWANIA Z SYGNALIZACJĄ	76
3.1. Probabilistyczne ujęcie struktury rodzajowej ruchu	76
3.2. Czas przejazdu odcinka wlotowego	81
3.3. Długości statyczne pojazdów na wlocie skrzyżowania	86
3.4. Ruszanie pojazdów w kolejce po zapaleniu się sygnału zielonego	89
3.5. Odstępy czasowe między pojazdami na linii stop ..	90
4. MODEL SYMULACYJNY NA EMC DO BADANIA WPŁYWU WAHAŃ RUCHU NA EFEKTYWNOŚĆ STEROWANIA SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNA	96
4.1. Odwzorowanie wahań ruchu w procesie zgłoszeń	98
4.1.1. Generowanie strumienia zgłoszeń	99
4.1.2. Porównanie charakterystyk zmienności natężeń potoku stacjonarnego i niestacjonarnego	103
4.2. Model ruchu na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną	106
4.2.1. Przebieg ruchu i kolejka pojazdów na odcinku wlotowym skrzyżowania	107
4.2.2. Proces obsługi	110
4.3. Opis programu symulacyjnego	111
4.3.1. Zbieranie danych statystycznych	112

4.3.2. Zakres wyników symulacji	115
4.4. Weryfikacja modelu ruchu	116
4.5. Założenia do badań symulacyjnych dla oceny efektywności sterowania sygnalizacją świetlną	119
5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ SYMULACYJNYCH	121
5.1. Ocena przyjętej wielkości interwału rejestracji zmian natężenia	121
5.2. Porównanie warunków ruchu na wlocie skrzyżowania przy założeniu potoków stacjonarnych i niestacjonarnych	123
5.3. Wpływ wahań ruchu na podstawowe mierniki oceny sprawności skrzyżowań	126
5.3.1. Straty czasu	127
5.3.2. Kolejki maksymalne w cyklach	132
5.3.3. Kolejki na końcu sygnału zielonego	134
5.3.4. Zatrzymania	136
5.4. Wpływ struktury rodzajowej ruchu na efektywność sterowania	138
6. OCENA TEORETYCZNYCH FORMUŁ DLA SZACOWANIA STRAT CZASU W ŚWIETLE REZULTATÓW BADAŃ SYMULACYJNYCH	140
6.1. Straty czasu przy ciągłym stałym dopływie ruchu..	140
6.2. Straty czasu wg teorii masowej obsługi	142
6.3. Straty czasu w przypadku stacjonarnego, poissonowskiego strumienia zgłoszeń	143
6.4. Straty czasu wg modeli ruchu charakteryzujących stacjonarny strumień zgłoszeń współczynnikiem I..	145
6.4.1. Model Millera	145
6.4.2. Model Newella	146
6.4.3. Model Sosina	147

6.5. Ogólne formuły strat czasu	148
6.5.1. Wlot nienasycony $/x < 1/$	148
6.5.2. Wlot przesycony $/x > 1/$	149
6.5.3. Dowolny stan nasycenia wlotu	150
6.6. Straty czasu przy założeniu zmiennego natężenia dopływającego ruchu	151
6.7. Porównanie i ocena różnych formuł strat czasu w świetle rezultatów własnych badań symulacyjnych	154
7. SYNTEZA PRACY	161
7.1. Podsumowanie i ocena efektów pracy	161
7.2. Wnioski końcowe	168
7.3. Kierunki dalszych prac	173
8. BIBLIOGRAFIA	I - VIII

PODSTAWOWE SYMBOLE I OZNACZENIA

Parametry potoku pojazdów:

N	- natężenie ruchu,	$[P/h]$, $[E/h]$
q	- natężenie ruchu,	$[P/s]$, $[E/s]$, $[P/t_r]$
\bar{q}	- średnie natężenie ruchu w okresie obserwacji T_0	$[P/s]$, $[P/t_r]$
P	- pojazd rzeczywisty,	
E	- pojazd umowny,	
s.o.	- samochody osobowe,	
s.c.	- samochody ciężarowe,	
P, W, L	- relacje: w prawo, na wprost, w lewo	
uc	- udział samochodów ciężarowych w potoku pojazdów,	$[-]$
$uc/t_r/$	- udział samochodów ciężarowych w potoku pojazdów w interwale rejestracji t_r	$[-]$
t_p	- czas przejazdu odcinka wlotowego o długości L	$[s]$
S_{t_p}	- odchylenie standardowe czasu przejazdu odcinka wlotowego	$[s]$
v_{so}, v_{sc}	- prędkość pojazdu na wlocie skrzyżowania; odpowiednio s.o. i s.c.,	$[m/s]$, $[km/h]$
$\bar{v}_{so}, \bar{v}_{sc}$	- średnia prędkość pojazdów /s.o. i s.c./ na wlocie skrzyżowania,	$[m/s]$, $[km/h]$
\bar{v}_w	- średnia ważona prędkość obliczona z pomiarów na wlotach różnych skrzyżowań	$[m/s]$, $[km/h]$
l_{so}, l_{sc}	- długość stanowiska pojazdu w kolejce; odpowiednio s.o. i s.c.,	$[m]$
l_{so}^0, l_{sc}^0	- odległość tyłu pojazdu stojącego na pierwszej pozycji w kolejce od linii stop; odpowiednio s.o. i s.c.,	$[m]$
x_0	- odległość przodu pojazdu stojącego na pierwszej pozycji w kolejce od linii stop,	$[m]$

- $S_{l_{so}}, S_{l_{sc}}, S_{l_{so}^o}, S_{l_{sc}^o}, S_{x_o}$ - odchylenia standardowe zmiennych $l_{so}, l_{sc}, l_{so}^o, l_{sc}^o, x_o$, [m]
- Δt - odstęp czasowy między kolejnymi pojazdami kolumny, rejestrowany na linii stop, [s]
- $S_{\Delta t}$ - odchylenie standardowe odstępu czasowego między kolejnymi pojazdami na linii stop, [s]
- t_i - przeciętny czas potrzebny do wjazdu i-tego pojazdu z kolejki na skrzyżowanie, liczony od zapalenia się sygnału zielonego, [s]
- t_{rk} - przeciętny czas ruszenia pojazdu w kolejce liczony względem ruszenia i-szego pojazdu /czas reakcji pojazdów w kolejce na zmianę sygnałów/, [s]
- t_r - interwał w którym rejestrowane są w czasie pomiaru lub przebiegu symulacyjnego parametry potoku pojazdów /np. liczby pojazdów przejeżdżających dany przekrój/, [s]
- T_0 - czas obserwacji w badaniach empirycznych i przebiegach symulacyjnych /czas trwania pomiaru lub przebiegu symulacyjnego/, [s]

Parametry programu sygnalizacji:

- T - długość cyklu, [s]
- G, R, Z - rzeczywista długość sygnałów; zielonego, czerwonego i żółtego, [s]
- G_e - efektywna długość sygnału zielonego, [s]
- R_e - efektywna długość sygnału czerwonego, [s]
- t_f - czas tracony w danej fazie /w cyklu/, [s]
- λ - stosunek efektywnego sygnału zielonego do długości cyklu [-]

Mierniki i wskaźniki efektywności sterowania ruchem:

- S - natężenie nasycenia /w godzinie sygnału zielonego/, [E/h_z]

s	- natężenie nasycenia,	[E/s]
C	- przepustowość wlotu,	[P/h] , [E/h]
c	- przepustowość wlotu,	[P/s] , [E/s]
x	- stopień nasycenia wlotu - stosunek natężenia ruchu na wlocie do przepustowości,	[-]
x/IC/	- stopień nasycenia wlotu w cyklu o nr IC,	[-]
x*/IC/	- stopień obciążenia wlotu w cyklu o nr IC - stosunek zgłaszających się lub oczekujących przed linią stop pojazdów do przepustowości wlotu w cyklu,	[-]
d _i	- strata czasu i-tego pojazdu,	[s]
D	- sumaryczne straty czasu poniesione przez pojazdy w okresie obserwacji T ₀ ,	[s]
D/IC/	- sumaryczne straty czasu poniesione przez pojazdy w cyklu o nr IC,	[s]
\bar{d}	- średnia strat czasu przypadających na pojazd w poszczególnych cyklach okresu obserwacji T ₀ ,	[s/P] , [s/E]
d/IC/	- średnia strata czasu przypadająca na pojazd w cyklu o nr IC,	[s/P] , [s/E]
\bar{d}_Z	- średnia strat czasu przypadających na pojazd zatrzymany w poszczególnych cyklach okresu obserwacji T ₀ ,	[s/P] , [s/E]
d _Z /IC/	- średnia strata czasu przypadająca na pojazd zatrzymany w cyklu o nr IC,	[s/P] , [s/E]
LZ/IC/ i Z/IC/	- liczba i procent pojazdów zatrzymanych w cyklu o nr IC	[P] , [%]
\bar{Z}	- średnia procentu pojazdów zatrzymanych w poszczególnych cyklach okresu obserwacji T ₀ ,	[%]
K	- maksymalna kolejka w okresie obserwacji T ₀ ,	[P]

- \bar{K} - średnia kolejek maksymalnych w poszczególnych cyklach okresu obserwacji T_0 , [P]
- $K/IC/$ - maksymalna kolejka w cyklu o nr IC, [P]
- $K_k/IC/$ - kolejka na końcu sygnału zielonego w cyklu o nr IC /liczba pojazdów zostających na następnym cykl/, [P]
- \bar{K}_k - średnia kolejek na końcu sygnału zielonego w poszczególnych cyklach okresu obserwacji T_0 , [P]
- L_K - maksymalna długość kolejki w okresie obserwacji T_0 , [m]
- $L_k/IC/$ - maksymalna długość kolejki w cyklu o nr IC, [m]

Parametry i zmienne modelu ruchu:

- l - droga, [m]
- t - czas, [s]
- $\{q/t/\}_{t=1, \dots, n}$ - szereg czasowy natężenia ruchu - uporządkowany w kolejności otrzymywania zbiór liczb pojazdów dojeżdżających do skrzyżowania w interwałach t_r podczas okresu obserwacji T_0 , [P/ t_r]
- $IMIN, IMAX$ - min. i max. liczba pojazdów dojeżdżających do skrzyżowania w interwale rejestracji t_r podczas okresu obserwacji T_0 /1 i n-ta statystyka pozycyjna szeregu czasowego $\{q/t/\}_{t=1, \dots, n}$ /, [P/ t_r]
- ρ - rozstęp szeregu czasowego $\{q/t/\}_{t=1, \dots, n}$ [P/ t_r]
- WZW - względny zakres wahań wartości $q/t/$ w okresie obserwacji T_0 , [-]
- Δ^2 - średni, kwadratowy przyrost natężenia w kolejnych interwałach t_r szeregu czasowego $\{q/t/\}_{t=1, \dots, n}$, [P²/ t_r]
- RWU - rozstęp wahań unormowanych natężenia ruchu, [P/ t_r]

WZWU	- względny zakres wahań unormowanych natężenia ruchu,	[-]
S_q^2	- wariancja szeregu czasowego $\{q/t/\}_{t=1, \dots, n}$ w okresie T_0 ,	$[P^2/t_r]$
I	- stosunek wariancji do wartości średniej szeregu czasowego $\{q/t/\}_{t=1, \dots, n}$ w okresie obserwacji T_0 ,	[-]
S_q	- odchylenie standardowe szeregu czasowego $\{q/t/\}_{t=1, \dots, n}$ w okresie T_0 ,	$[P/t_r]$
ϵ	- współczynnik zmienności szeregu czasowego $\{q/t/\}_{t=1, \dots, n}$ w okresie T_0 ,	[-]
χ_{t_r}	- współczynnik nierównomierności ruchu w okresie T_0 ,	[-]
t_{si}	- interwał o stałej intensywności zgłoszeń,	[s]
RI_i	- relatywna intensywność ruchu w i-tym przedziale t_r lub t_{si} ,	[-]
ϵ_{RI}	- współczynnik zmienności relatywnych intensywności ruchu $RI/t/$ w okresie obserwacji T_0 ,	[-]
$\Delta t_{i-1,i}^{so}, \Delta t_{i-1,i}^{sc}$	- czasy obsługi pojazdów /odpowiednio s.o. i s.c./ z kolejki po zapaleniu się sygnału zielonego /zależne od pozycji "i" pojazdu w kolejce/,	[s]
RK	- czas reakcji pierwszego pojazdu w kolejce na zmianę sygnałów /z czerwonego na zielony/,	[s]
RK10 i RK1C	- różnica między momentami ruszenia 1 do 6 pojazdu w kolejce /odpowiednio dla s.o. i s.c./,	[s]
RK20 i RK2C	- różnica między momentami ruszenia kolejnych - począwszy od 7 - pojazdów w kolejce /odpowiednio dla s.o. i s.c./,	[s]
t_x	- opóźnienie czasowe przy dojeździe pojazdu do kolejki,	[s]

- t_0 - odstęp czasu między kolejnymi pojazdami na danym pasie ruchu, [s]
- t_{om} - minimalny odstęp czasu między kolejnymi pojazdami na danym pasie ruchu, [s]
- DMIN - minimalny odstęp czasu na linii stop między kolejnymi pojazdami realizującymi przejazd skrzyżowania bez zatrzymań, [s]
- TR - czas rozruchu w przebiegu symulacyjnym, [s]

Parametry opisu probabilistycznego potoku ruchu i analizy statystycznej:

- P/o/o/, P/c/o/, P/o/c/, P/c/c/ - prawdopodobieństwa warunkowe występowania s.o. i s.c. w potoku ruchu,
- g/x/ - funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu empirycznego zmiennej losowej X,
- G/x/ - dystrybuanta empiryczna w próbie,
- f/x/ - funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu zmiennej losowej X w populacji,
- F/x/ - dystrybuanta zmiennej losowej X w populacji,
- n - liczebność próby,
- ξ - współczynnik zmienności w próbie - względna miara rozrzutu,
- g_1 - współczynnik skośności w próbie - miara skośności rozkładu,
- d - poziom istotności,
- λ - statystyka testu zgodności Kołmogorowa,
- λ_α - krytyczna wartość statystyki z granicznego rozkładu λ Kołmogorowa,
- χ^2 - statystyka testu zgodności χ^2 ,
- t - statystyka Studenta,

- t_d - wartość krytyczna statystyki t Studenta,
- a - stała wygładzania,
- w_i - waga informacji,
- \bar{t}_{wi} - średni wiek informacji, [s]
- r - współczynnik korelacji z próby,
- ρ - współczynnik korelacji między dwiema badanymi cechami w populacji,
- s_r - odchylenie przeciętne od linii regresji,
- $\{q/t/\}$ - proces stochastyczny natężenia ruchu,
- $q/t/$ - realizacja procesu stochastycznego $\{q/t/\}$.

1. WSTĘP

Skrzyżowania jednopoziomowe są podstawowym i zarazem krytycznym elementem każdej sieci ulic. Są one miejscem, gdzie pojazdy poruszające się po sieci ponoszą większość strat czasu. Zakłócenia płynności ruchu pojazdów występujące na skrzyżowaniach, decydują o ograniczeniu przepustowości krzyżujących się kierunków i tym samym o przepustowości całego układu ulic. Pomimo, przeznaczania w wielu krajach, dużych nakładów inwestycyjnych na segregację potoków ruchu przez budowę węzłów różnopoziomowych, skrzyżowania jednopoziomowe stanowią nadal i będą stanowić w przyszłości podstawowy element miejskich układów komunikacyjnych. W Polsce, w okresie trudności gospodarczych i wynikającej stąd konieczności ograniczenia zakresu nowych inwestycji komunikacyjnych, twierdzenie takie jest tym bardziej uzasadnione. Biorąc ten fakt pod uwagę wydaje się, iż w perspektywie najbliższych lat, poprawy warunków ruchu upatrywać należy w doborze jak najefektywniejszych metod organizacji ruchu i sterowania jego przebiegiem oraz modernizacji geometrii istniejących skrzyżowań.

Dla sterowania ruchem na pojedynczym skrzyżowaniu najczęściej stosuje się sygnalizację świetlną o stałym; jednym lub kilku programach, eksploatowanych jednakże bardzo często nieracjonalnie i nieefektywnie. Wynikać to może z faktu, iż w sytuacji gdy istnieją dosyć szczegółowe zasady projektowania geometrycznego skrzyżowań oraz obliczania programów sygnalizacji, brak jest równocześnie szerszych możliwości określania mierników oceny efektywności, takich jak natężenia krytyczne, straty czasu, kolejki, zatrzymania itp. Istniejące metody obliczeniowe w tym zakresie ograniczają się do najprostszyc przy-

padków geometryczno-ruchowych, zakładając jeszcze przy tym szereg zasadniczych uproszczeń.

Wśród istotnych czynników mających wpływ na efektywność sterowania ruchem na skrzyżowaniu za pomocą sygnalizacji świetlnej, zwłaszcza o stałym programie, wskazano w pracy [77] wahania wielkości i struktury natężeń ruchu, które powodować mogą również istotne błędy w obliczeniach programów sygnalizacji świetlnej. Zarówno w matematycznych modelach ruchu, jak i w metodach obliczania przepustowości, poziomu swobody ruchu, programu sygnalizacji oraz w praktyce sterowania przyjmuje się powszechnie, że natężenie ruchu oraz jego struktura w okresie, który bierzemy za podstawę obliczeń, są stałe a zmiennymi losowymi są momenty przybyć pojazdów oraz ich rodzaje. W rzeczywistości zarówno natężenie jak i struktura rodzajowa i kierunkowa są funkcją czasu /np. zmieniają się zależnie od pory dnia, interwału wewnątrz okresu szczytowego itp/. Zachodzą więc w strumieniu zgłoszeń wahania, które mogą być cykliczne jak również nieregularne.

Problem ten, w sposób bardziej lub mniej szczegółowy, uwzględniają jedynie nieliczne metody wymiarowania geometrycznego i wytyczne sterowania. Jednak opracowane teoretyczne algorytmy obliczeniowe lub symulacyjne nie stanowią prostych i dogodnych w użyciu metod. Stąd też nie znajdują powszechnego i praktycznego zastosowania. Celowym więc jest podjęcie zagadnienia sterowania ruchem na skrzyżowaniach w takim ujęciu, by poprzez opracowanie odpowiedniego instrumentu badawczego, a następnie określenie wpływu wahań ruchu na efektywność sterowania sygnalizacją świetlną stworzyć podstawy do praktycznej oceny warunków ruchu i racjonalnego sterowania na skrzyżowaniu, na którym strumienie pojazdów dojeżdżających są strumieniami niestacjonarnymi.

1.1. Przedmiot pracy

Wśród skrzyżowań z sygnalizacją świetlną pod względem współdziałania wyróżnić można:

- skrzyżowania odosobnione /pojedyncze/, które działają niezależnie od innych skrzyżowań,
- skrzyżowania sprzężone; dwa lub więcej blisko siebie położone skrzyżowania,
- skrzyżowania działające w liniowej koordynacji sterowania /ciągi skrzyżowań/,
- skrzyżowania działające w sieciowej koordynacji sterowania /skrzyżowania z części lub całego obszaru miasta/,
- skrzyżowania podlegające sterowaniu strategicznemu w aglomeracjach [42].

Przeważającą większość w polskich miastach stanowią skrzyżowania dwóch pierwszych, z wyżej wymienionych grup, przy czym ostatnio coraz częściej dla zmniejszenia ujemnych skutków sygnalizacji takich jak straty czasu, zatrzymania i zakłócenia płynności przejazdu, wprowadzana jest w dużych miastach koordynacja, głównie na ciągach skrzyżowań. Programy sygnalizacyjne na pojedynczym skrzyżowaniu projektowane przeważnie na tzw. godzinę szczytu eksploatowane są często w okresie całej doby. Występujący w rzeczywistości ujemny wpływ wahań ruchu, krótko jak i długoterminowych, na efektywność takiego sterowania [32] praktycznie jest pomijany. Ten stan rzeczy prowadzi w efekcie do znacznych strat społecznych i ekonomicznych.

Powyższe przesłanki uzasadniają potrzebę prowadzenia badań mających na celu poprawę nieefektywnej eksploatacji skrzyżowań z sygnalizacją o stałym programie. Badania takie podjęto w niniejszej pracy. Ich przedmiotem są procesy ruchu na pojedynczym

skrzyżowaniu z sygnalizacją stałoczasową, a w szczególności:

- ruch dopływający do skrzyżowania: jego charakterystyka i modelowanie, ze szczególnym uwzględnieniem wahań w czasie,
- przebieg ruchu na wlocie skrzyżowania przy sterowaniu stałoczasowym; tworzenie się i rozładowanie kolejki,
- warunki w jakich ruch przebiega; straty czasu, kolejki, zatrzymania itp.

oraz analiza oddziaływania wahań ruchu na efektywność sterowania ocenianą przez warunki w jakich ruch się odbywa.

1.2. Sterowanie ruchem na skrzyżowaniu za pomocą sygnalizacji świetlnej

Sygnalizację świetlną, stosowaną jako jeden z podstawowych środków organizacji ruchu na pojedynczych skrzyżowaniach w miastach, z uwagi na sposób jej działania, determinujący zdolność dostosowania się do ruchu, można podzielić na następujące rodzaje:

- sygnalizacja o stałym programie,
- sygnalizacja o zmiennych programach /wieloprogramowa/,
- sygnalizacja o częściowej aktualizacji,
- sygnalizacja aktualizowana,
- sygnalizacja aktualizowana wyższego rzędu.

Stopień skomplikowania urządzeń sterujących rośnie zgodnie z kolejnością wyżej wymienionych rodzajów sygnalizacji. Szereg zalet sygnalizacji zdecydowało o jej rozpowszechnieniu się, przy czym zdecydowanie najliczniejszą grupę w kraju stanowią najprostsze typy sygnalizacji. Wiąże się to niewątpliwie z dostępnością automatycznych urządzeń sterujących jak i stopniem ich skomplikowania.

1.2.1. Sygnalizacja o stałym programie

Sygnalizacja o stałym programie charakteryzuje się narzuca-
niem potokom pojazdów na pojedynczym skrzyżowaniu sekwencji wa-
runków ruchu, określonej stałą długością cyklu i niezmiennym po-
działem cyklu na poszczególne fazy /splitem/. Jest to najprost-
szy i zarazem powszechnie stosowany rodzaj sygnalizacji instalowa-
wanej na odosobnionym skrzyżowaniu. Programowanie takiej sygna-
lizacji odbywa się przeważnie wg amerykańskiej metody HCM-65 lub
brytyjskiej RRL [17], [29], [57], [72], [80]. Program sygnaliza-
cji dostosowany jest zazwyczaj do ruchu szczytowego występujące-
go w godzinach dojazdów lub powrotów z pracy. Może to być rów-
nież kompromisowy program sygnalizacji spełniający w większym
stopniu zmieniające się w ciągu dnia wymagania ruchu [29].

Przeprowadzona ocena warunków ruchu [32] na odosobnionych skrzy-
żowaniach wykazała, że eksploatacja jednego, stałego programu
w okresie całej doby jest niewłaściwa i powoduje nieuzasadniony
wzrost strat czasu w stosunku do optymalnych, osiągalnych przy
innych programach dostosowanych do natężeń w poszczególnych
okresach doby.

1.2.2. Sygnalizacja o zmiennych programach /wieloprogramowa/

Sygnalizacja o zmiennych programach stanowi udoskonaloną od-
mianę sygnalizacji o stałym programie i różni się od niej posia-
daniem kilku programów stałoczasowych. Poszczególne programy eks-
ploatowane są w określonych porach doby, a przełączanie progra-
mów następuje automatycznie za pomocą zegara. Przy zmianach na-
tężenia ruchu powtarzających się regularnie w poszczególnych
dniach, sterowanie sygnalizacją wieloprogramową daje dość dobre
efekty, jakkolwiek nie uwzględnia krótkotrwałych wahań ruchu.

Większą elastyczność w dostosowaniu programów sygnalizacyjnych do aktualnych wahań w potokach ruchu na skrzyżowaniu, posiada system o stałych kilku programach, wybieranych na bieżąco przez procesor urządzenia sterującego, zgodnie z rejestrowanym zapotrzebowaniem [44]. Programy sygnalizacyjne obliczone dla różnych, oczekiwanych stanów obciążenia, przechowywane są w tzw. bibliotece programowej. Odpowiednio zaprogramowana logika decyzyjna, wykorzystująca informacje o ruchu pochodzące z detektorów, umożliwia wybór z biblioteki programowej najbardziej odpowiedniego do aktualnych warunków ruchowych programu sygnalizacyjnego. Zmiana programu o stałym cyklu może następować co 5 do 15 minut.

1.2.3. Sygnalizacja aktualizowana

Sygnalizacja aktualizowana, której podział, zasady działania i parametry podaje praca [72], dostosowuje swój program sygnalizacyjny do aktualnych warunków ruchowych, dzięki automatycznemu przetwarzaniu bieżących danych ruchowych. Wraz ze zmianami całkowitego obciążenia skrzyżowania jak również poszczególnych kierunków ruchu, zmienia się długość cyklu i jego podział na fazy. Sterowanie tego rodzaju wymaga jednakże skomplikowanej aparatury do detekcji i sterowania, co pociąga za sobą wysokie koszty związane z jej instalacją i eksploatacją. W przypadku zaś dużych natężeń ruchu, sygnalizacja aktualizowana pracuje jako stałoczasowa, przy czym eksploatowany jest cykl o maksymalnej długości.

Aktualnie w Polsce sygnalizacja tego typu funkcjonuje na kilku zaledwie skrzyżowaniach, a nowe urządzenia nie są instalowane z uwagi na brak krajowej produkcji.

Dokonany krótki przegląd rodzajów sygnalizacji wykazuje, że w zasadzie w każdym z wymienionych przypadków, przynajmniej okre-



sowo, działanie sygnalizacji można rozważać jako działanie sygnalizacji o stałym programie. Jeżeli weźmie się pod uwagę, że również na skrzyżowaniach objętych koordynacją sterowania zasadniczo eksploatuje się sygnalizację o stałych programach, to uzasadnionym wydaje się wniosek, że podstawowe znaczenie mają badania warunków ruchu - przy szczególnym uwzględnieniu jego krótkotrwałych wahań - umożliwiające ocenę efektywności sterowania właśnie za pomocą sygnalizacji o stałym programie i to nie tylko w odniesieniu do godziny ale i do poszczególnych cykli.

1.3. Mierniki oceny efektywności sterowania

W celu dokonania oceny efektywności sterowania ruchem na skrzyżowaniu za pomocą sygnalizacji o stałym programie niezbędne jest określenie mierników efektywności, które po wyskalowaniu umożliwiają również klasyfikację warunków ruchu na skrzyżowaniu.

Do mierników takich zalicza się:

- straty czasu,
- kolejki,
- zatrzymania,
- przepustowość,
- stopień nasycenia ruchem,
- przeciążenia cykli,
- wykorzystanie faz sygnału zielonego przez ruch.

Przy ocenie sprawności skrzyżowania najczęściej wykorzystuje się straty czasu i kolejki, chociaż również i innym miernikom wymienionym w dalszej kolejności niekiedy nadaje się decydujące znaczenie. Przykładem może być HCM-65 [17], [57], gdzie jako kryterium wyznaczania poziomu swobody ruchu przyjęto, wyznaczany w okresie ruchu szczytowego, stosunek faz sygnału zielonego w pełni wykorzystany do całkowitej liczby faz w godzinie /zwany współ-

czynnikiem obciążenia/.

Straty czasu

Strata czasu jest określana jako dodatkowy czas, powstający przy przejeździe skrzyżowania, ponad niezbędne minimum odpowiadające czasowi jazdy bez zakłóceń, a spowodowany przez czynniki zewnętrzne, na które kierowca danego pojazdu nie ma wpływu.

Straty czasu wynikają ze zwalniania pojazdu, zatrzymania, powolnej jazdy w kolumnie i przyspieszania. Straty czasu, zwiększając czas podróży, wzmagają tym samym zmęczenie kierowcy oraz uszczuplają jego czas, który mógłby zużytkować na inne cele. Strata czasu to także dodatkowy koszt podróży. Dlatego też szacowanie czasu traconego na skrzyżowaniu, a w dalszej kolejności jego minimalizacja, są bardzo istotne ze społecznego punktu widzenia.

Straty czasu określane są zazwyczaj w postaci średnich strat czasu przypadających na każdy z przejeżdżających skrzyżowanie w pewnym okresie czasu pojazdów, lub na każdy pojazd zatrzymany. Rozważa się również maksymalne straty czasu ponoszone przez pojazd w danym okresie czasu. Określanie strat czasu przez bezpośredni pomiar na skrzyżowaniu jest bardzo trudne.

Kolejki

Długości kolejek i związany z nimi czas zatrzymania pojazdów są miernikiem efektywności obsługi na skrzyżowaniu bezpośrednio ocenianym przez kierowców. Występujące kolejki na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją, gdzie okresowo przebieg ruchu jest zamknięty, są wprawdzie zjawiskiem normalnym, ale dojeżdżający kierowca intuicyjnie ocenia, czy wielkość kolejki będzie stanowiła przeszkodę uniemożliwiającą przejazd skrzyżowania w ciągu jednego cyklu. Długie oczekiwanie w kolejce, w bezruchu wywołuje zniecierpliwienie kierowców i w konsekwencji, jeżeli sytuacja taka powtarza się przy kolejnych przejazdach przez skrzyżowanie, kierowcy poszuku-

ją innych, dogodniejszych dróg lub, w wypadku braku takich możliwości, decydują się na jazdę w godzinach pozaszczytowych. Stan taki, z uwagi na występujące niedogodności w podróżach powoduje negatywną ocenę układu komunikacyjnego, jak również poczynań inżynierów ruchu.

Jako miernik efektywności sterowania ruchem bierze się średnią z maksymalnych kolejek w cyklach a rzadziej maksymalną kolejkę zarejestrowaną w pewnym okresie. Rozważa się również wielkości kolejek na końcu sygnału zielonego, czyli liczby pojazdów, które nie zdążyły zjechać w danym cyklu i pozostają na cykl następny. Kolejki, występujące na końcu sygnału zielonego, świadczą o przeciążeniu wlotu na skrzyżowaniu.

Zatrzymania

Zatrzymania pojazdów przy przejeździe skrzyżowania powodują zwiększenie hałasu, emisji spalin, a przede wszystkim zużycia paliwa. Wywołują więc niekorzystne oddziaływanie na środowisko a także podnoszą koszty podróży. Do oceny sprawności skrzyżowania bierze się proporcję pojazdów zatrzymanych przy przejeździe skrzyżowania, bądź przeciętną liczbę zatrzymań przypadających na pojazd przy przejeździe skrzyżowania. Można również określać liczby /lub procenty/ pojazdów zatrzymujących się przez określoną liczbę cykli.

Przepustowość

Przepustowość jest czynnikiem wpływającym w decydujący sposób na straty czasu, zatrzymania i kolejki. Jest ona zdeterminowana zarówno geometrią wlotów skrzyżowania, jak również programem sygnalizacji eksploatowanym na skrzyżowaniu. Zależy ona także od natężeń ruchu przecinających się /wzajemnie podporządkowanych/ strumieni, występujących w jednej fazie ruchu. W przypadku rela-

cji bezkolizyjnych określenie przepustowości jest stosunkowo proste, sytuacja trochę komplikuje się przy obliczaniu kolizyjnych relacji skrętnych, lecz stosowane w Polsce metody HCM-65 i RRL [17], [29], [72] pozwalają na przeprowadzenie obliczeń praktycznie we wszystkich możliwych przypadkach. Przy projektowaniu programu sygnalizacji wymaga się, aby sygnalizacja zapewniała odpowiednią przepustowość na wlotach skrzyżowania - odniesioną generalnie do okresu jednej godziny. Przepustowość pasów ruchu, za wyjątkiem prowadzących kolizyjne relacje skrętne, ulega małym zmianom w czasie /decydują tutaj głównie wahania struktury rodzajowej/, stąd też przepustowość jest stosowana jako miernik możliwości układu a nie jakości sterowania w szczytowych okresach ruchu.

Stopień nasycenia ruchem

Nazwą stopień nasycenia pasa lub zespołu pasów na wlocie określa się stosunek natężenia ruchu do przepustowości zdeterminowanej udziałem sygnału zielonego w cyklu:

$$x = \frac{q}{\lambda \cdot s} \quad /1.1/$$

gdzie: x - stopień nasycenia pasa lub zespołu pasów na wlocie,

q - natężenie ruchu na danym pasie lub zespole pasów, przypadające na rozważaną jednostkę czasu,

λ - udział sygnału zielonego efektywnego $/G_e/$ w cyklu $/T/$,

$$\lambda = \frac{G_e}{T} \quad /1.2/$$

s - natężenie nasycenia na danym pasie lub zespole pasów na wlocie na jednostkę czasu jak w odniesieniu do q .

Wskaźnik ten łączy w sobie trzy zasadnicze elementy funkcjonowania skrzyżowania; potok dopływający, przepustowość i program sygnalizacji. Jest on podstawową zmienną niezależną wyprowadzo-

nych funkcji strat czasu i kolejek. Na podstawie wartości x określone są warunki ruchu na skrzyżowaniu:

- a/ $x < 1$ - wlot nienasycony, istnieje na nim stan równowagi dynamicznej w odniesieniu do kolejek i strat czasu,
- b/ $x \cong 1$ - wlot nasycony, sytuacja jest niestabilna, czas potrzebny do osiągnięcia równowagi bardzo szybko wzrasta,
- c/ $x > 1$ - wlot przesycony, nie istnieje stan równowagi, średnie straty czasu kolejki zależą od długości rozważanego interwału czasowego.

Przeciążenia cykli

Przeciążenia cykli występują, gdy natężenie potoku dopływającego przewyższa przepustowość wlotu w danym cyklu, w efekcie czego po zakończeniu sygnału zielonego pozostaje na wlocie kolejka, której pojazdy dodatkowo obciążają następny cykl. Przeciążenia można charakteryzować za pomocą wielkości kolejek rejestrowanych na końcu sygnału zielonego, liczbą lub procentem cykli przeciążonych w rozważanym okresie czasu, albo też czasem trwania przeciążeń podczas okresów szczytowych.

Wykorzystanie faz sygnału zielonego przez ruch

Pełne wykorzystanie poszczególnych faz sygnału zielonego przez ruch na wlocie skrzyżowania jest miarą obciążenia wlotu i zarazem warunków ruchu jakie panują na wlocie. Pod uwagę bierze się proporcję faz sygnału zielonego w pełni wykorzystanych i całkowitej liczby faz w godzinie.

W przypadku niestacjonarnych potoków ruchu dopływających do skrzyżowania istotne z punktu widzenia jakości obsługi są nie tylko bezwzględne wartości wymienionych mierników oceny sprawności skrzyżowania, ale także ich rozkłady wynikające ze znacznej zmienności w czasie.

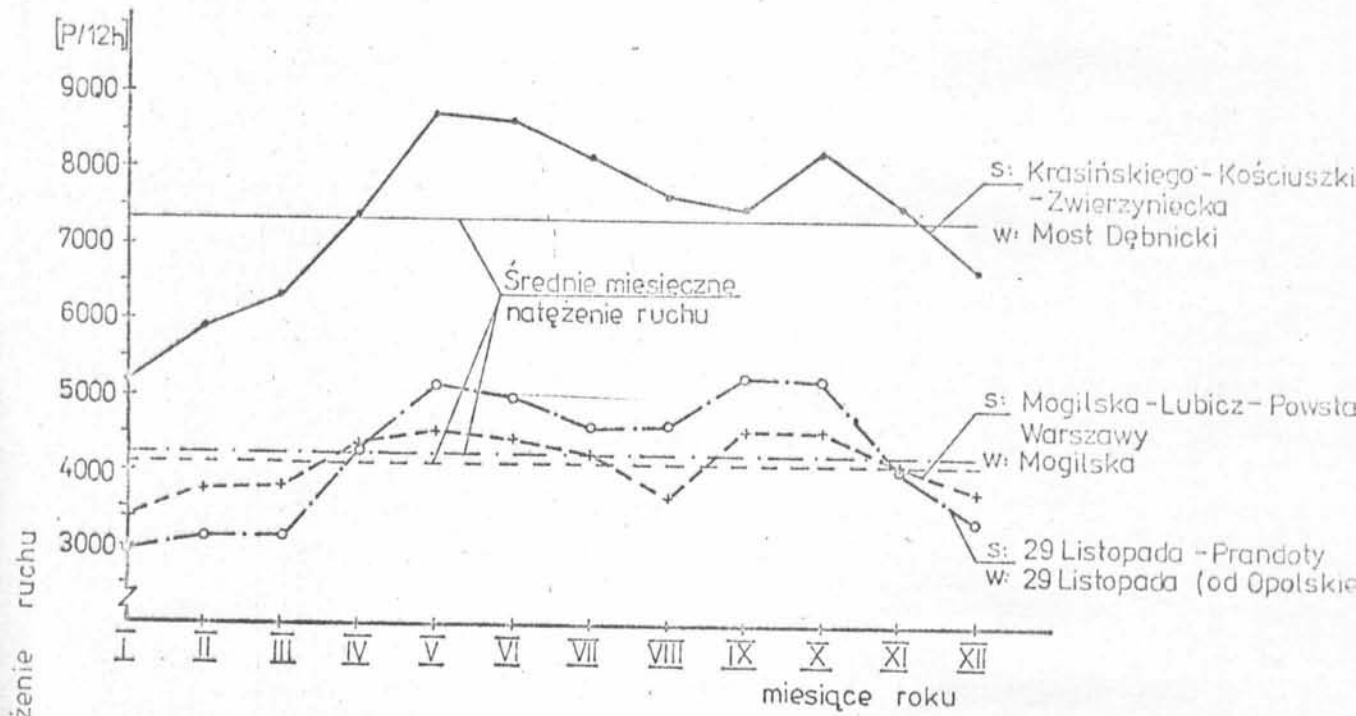
1.4. Zmienność natężeń ruchu w czasie

Charakterystyczną cechą ruchu są obserwowane w praktyce wahania jego natężenia. Rozpatrując w danej chwili ruch na pewnym obszarze, możemy mówić o jego wahaniami przestrzennych, obserwując zaś ruch w danym przekroju ulicy lub na konkretnym skrzyżowaniu w dłuższym okresie czasu - o jego wahaniami w czasie.

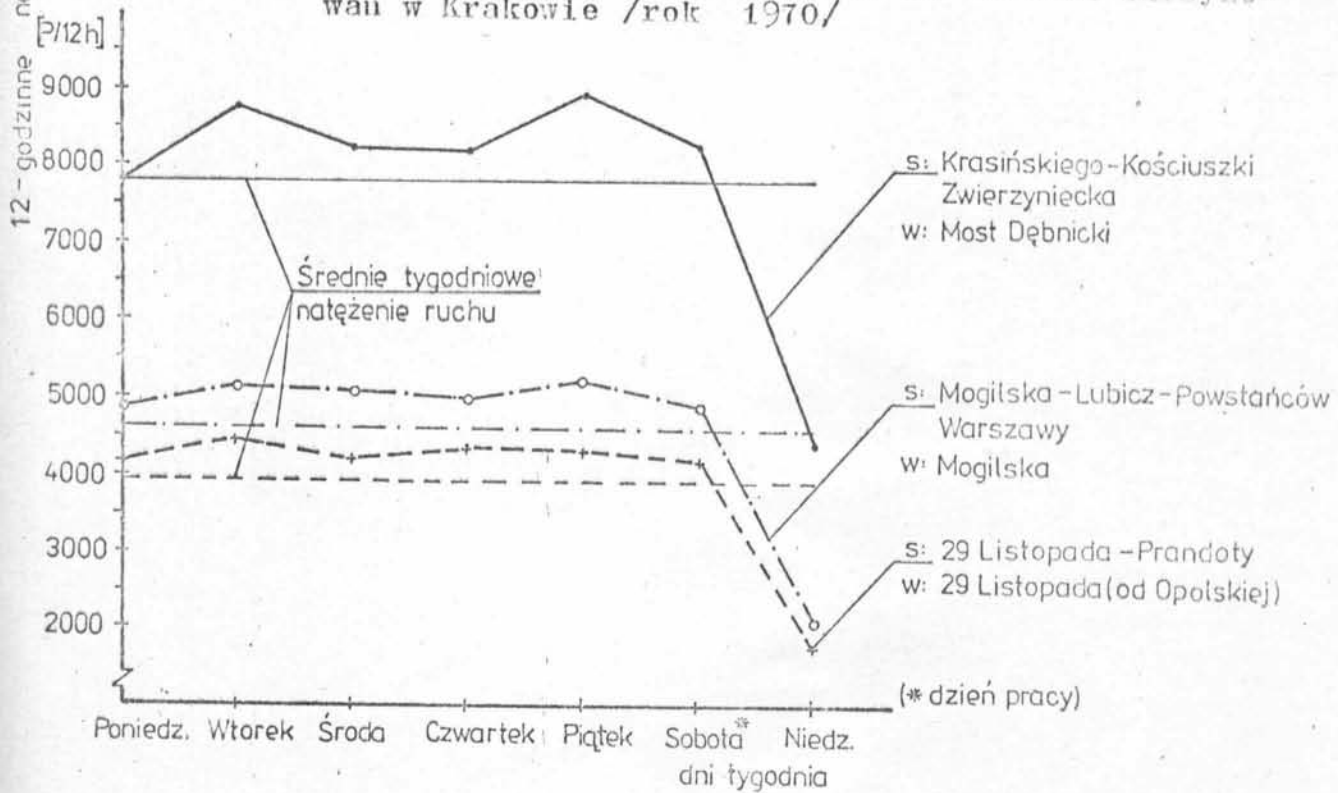
Obserwacje w ustalonych miejscach przeprowadzane w różnych okresach czasowych; roku, miesiąca, tygodnia i dnia, umożliwiają poznanie charakteru zmian natężenia ruchu w różnych skalach czasu. Wyniki takich obserwacji podawane są w postaci wykresów wahań ruchu, czyli bezwzględnych lub względnych wartości jego natężenia, zarejestrowanego w okresach o długości od 1 do 24 godzin w poszczególnych miesiącach roku, dniach tygodnia i godzinach dnia /rys. 1.1 + 1.6/. Rzadko spotyka się i analizuje obraz zmian natężenia ruchu w interwałach krótszych niż godzina.

Zmienność natężenia ruchu w poszczególnych miesiącach roku /rys. 1.1/ obserwowana na wlotach skrzyżowań, wykazuje pewne prawidłowości. Najwyższe natężenia ruchu występują w miesiącach maju i czerwcu oraz wrześniu i październiku, zaś najniższe w styczniu, lutym i marcu, przy czym wielkość natężenia w miesiącach zimowych spada - w zależności od skrzyżowania - do wartości 75 + 55 procent maksymalnych natężeń w miesiącach letnich [78]. Wśród najważniejszych przyczyn wahań natężenia w ciągu roku wymienia się; różne motywacje komunikacyjne ludzi w poszczególnych miesiącach oraz zróżnicowane w ciągu roku warunki atmosferyczne. Niewątpliwie w ostatnim okresie wpływ na wahania i wielkość natężeń ma limitowanie zużycia paliwa w Polsce. Problemu tego nie analizowano jednak w pracy.

Zmiany w okresie tygodnia /rys. 1.2/ - spowodowane przede



Rys. 1.1. Wahania ruchu w okresie roku na wlotach skrzyżowań w Krakowie /rok 1970/



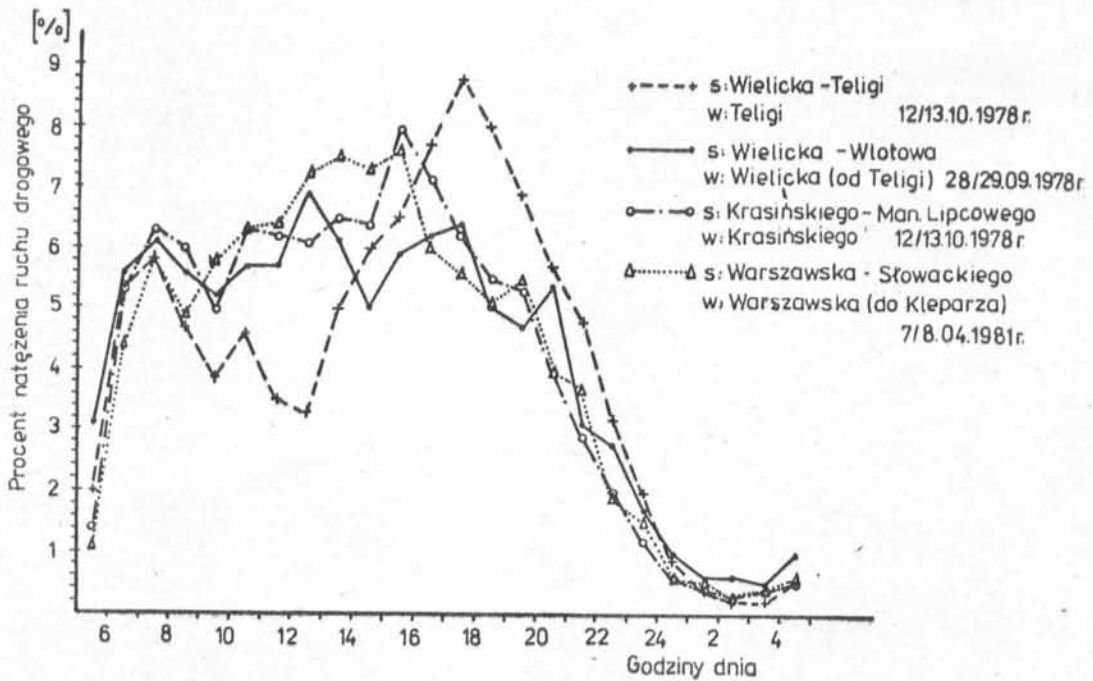
Rys. 1.2. Wahania ruchu w ciągu tygodnia na wlotach skrzyżowań w Krakowie /1970 r./

wszystkim potrzebami przewozowymi jak również zwyczajami mieszkańców - są w poszczególnych roboczych dniach tygodnia niewielkie. Znaczny spadek ruchu odnotowuje się przeważnie w niedzielę.

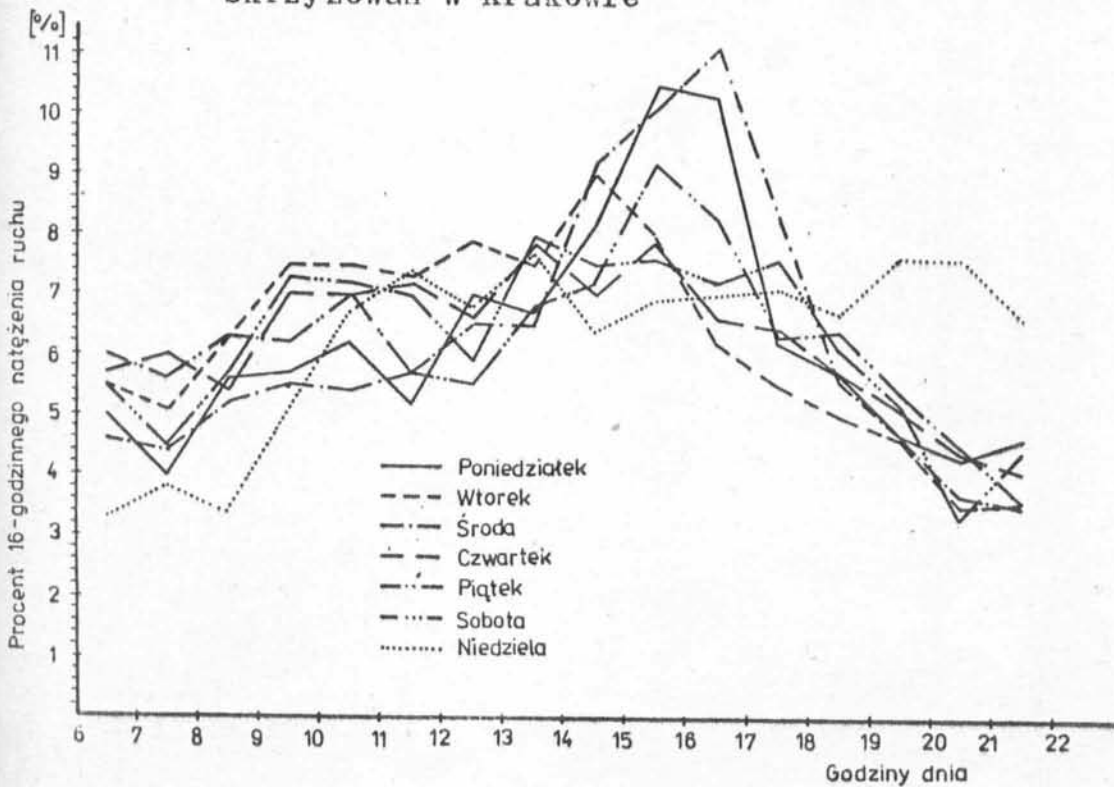
Obraz wahań ruchu w ciągu doby /rys. 1.3/ - jedna z najważniejszych charakterystyk ruchu - potwierdza wg badań autora znane prawidłowości ruchu miejskiego. Zrelatywizowane wartości natężenia /natężenie z każdej godziny wyrażone w procentach sumarycznego natężenia w okresie całej doby/ umożliwiają bezpośrednie porównanie wykresów z różnych skrzyżowań. Z rys. 1.3 wyraźnie wynika, że wśród czynników od których bez wątpienia zależą wahania dobowe znajdują się również; lokalizacja skrzyżowania oraz funkcje krzyżujących się ulic:

- ul. Teligi to typowa ulica lokalna, która wprowadza ruch z peryferyjnego osiedla mieszkaniowego do arterii wlotowej do miasta,
- al. Krasińskiego spełnia zadania zarówno arterii wewnątrzmijskiej jak i tranzytowej,
- ul. Warszawska prowadzi zaś ruch śródmiejski.

Na przebieg zmian natężenia ruchu w okresie doby wpływa również dzień tygodnia, w którym odbywa się ruch /rys. 1.4/. Wyraźnie zaznacza się różnica między charakterem wahań obserwowanych w dni robocze i w niedzielę. Widoczne są /rys. 1.3 i 1.4/ spiętrzenia ruchu czyli tzw. godziny szczytu, przy czym natężenie ruchu w godzinie maksymalnego obciążenia na rozważanych skrzyżowaniach waha się w granicach 7 + 9% ruchu dobowego /9 + 11% natężenia 16-godzinnego/. Analiza rozkładu strat czasu w ciągu doby na skrzyżowaniach bez sygnalizacji, przeprowadzona w pracy [77] wykazała, że bardzo duży procent strat czasu ponoszą kierowcy w jednej tylko godzinie szczytu w przypadkach, gdy natężenia zbliżone są do przepustowości. Udział godziny szczytu w dobowych



Rys. 1.3. Wahania ruchu w ciągu doby na wlotach skrzyżowań w Krakowie

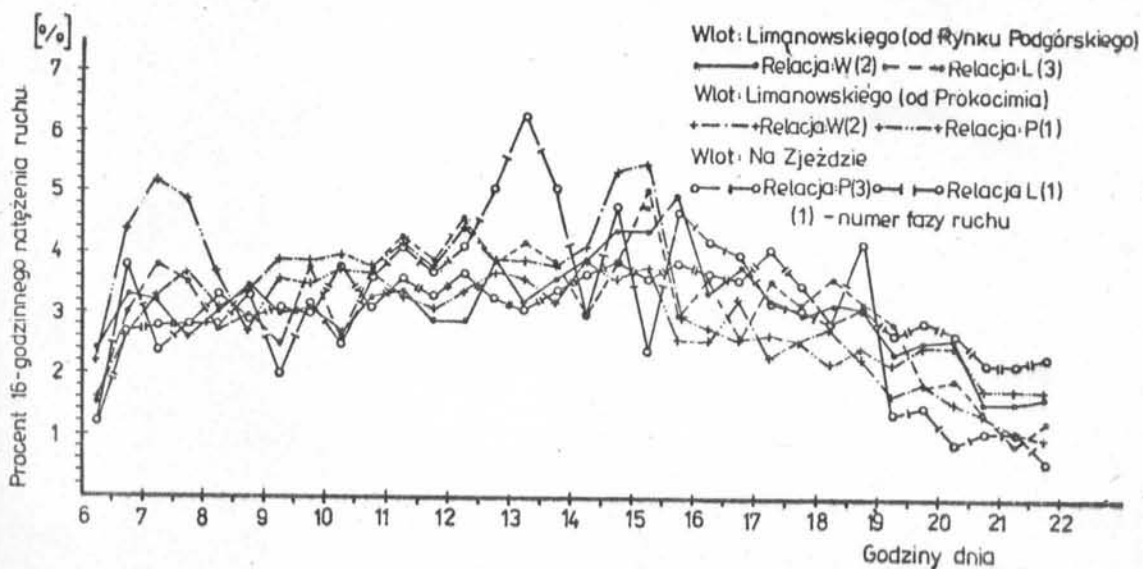


Rys. 1.4. Wahania ruchu w ciągu poszczególnych dni tygodnia w przekroju arterii wylotowej z Krakowa w kierunku Warszawy /Al. 29 Listopada 1980 r./

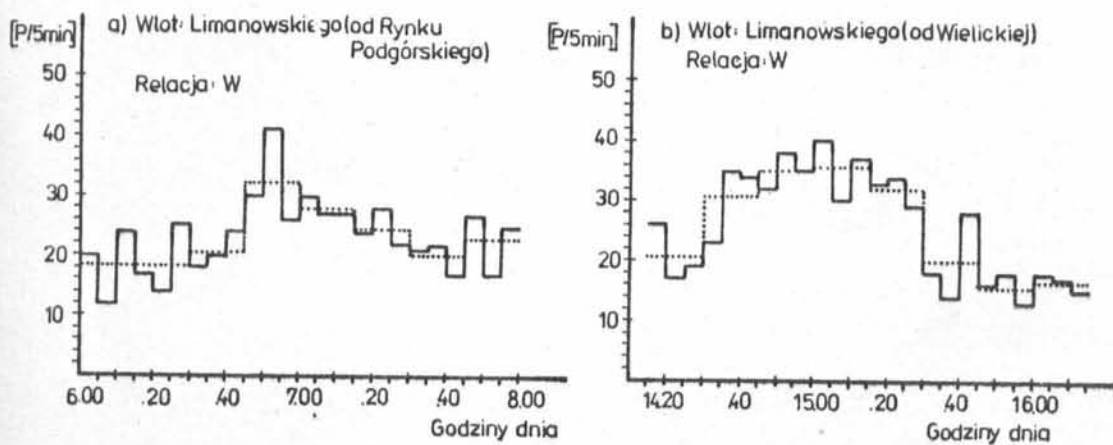
stratach czasu, wynoszący od 18 do 51%, zależy od położenia skrzyżowania w mieście i związanego z tym zakresu wahań ruchu /rys. 1.2 i 1.3/. Istotny wpływ na wielkość wahań w ciągu doby na poszczególnych ulicach i skrzyżowaniach w mieście ma także stopień wykorzystania przepustowości. Im stopień ten jest wyższy tym wahania ruchu są mniejsze z uwagi na niemożliwość przepuszczenia większego ruchu i przenoszenie się części ruchu na godziny pozaszczytowe.

Zmienność natężenia ruchu rejestrowanego przez autora w interwałach 30 minutowych w ciągu 16 godzin dnia na poszczególnych wlotach skrzyżowania /rys. 1.5/, wskazuje na znaczne zróżnicowanie charakteru i zakresu wahań natężeń ruchu pojazdów różnych relacji, rozważanych we wspólnej skali czasu. Przedstawione na rys. 1.5 linie zmienności natężeń pozwalają na stwierdzenie występowania dość znacznych zmian obciążenia poszczególnych faz ruchu na skrzyżowaniu w ciągu dnia, jak również wahań obciążenia poszczególnych relacji w zakresie danej fazy ruchu.

W świetle tych spostrzeżeń widać, że eksploatacja w dłuższym okresie czasu sygnalizacji o stałym programie - zaprojektowanej wg zasad metod HCM-65 bądź RRL, uwzględniających w toku obliczeń jedynie obciążenia pojedynczych, reprezentatywnych relacji lub wlotów w każdej z faz - powodować będzie zmienną w czasie sprawność funkcjonowania skrzyżowania. Dla pełniejszego zobrazowania zmian proporcji obciążenia poszczególnych relacji na wlotach skrzyżowania w ciągu dnia, w aneksie na rys. 1.1 i 1.2 przedstawiono wykresy zmian struktury kierunkowej ruchu. Przedstawione na rys. 1.6 wahania natężeń ruchu rejestrowanego w interwałach 5 oraz 15-minutowych, na wybranych relacjach z wlotów skrzyżowania Limanowskiego - Na Zjeździe w Krakowie, obrazują obserwowane w rzeczywistości charakterystyczne profile natężenia podczas



Rys. 1.5. Wahania ruchu w ciągu dnia na wlotach skrzyżowania Limanowskiego - Na Zjeździe w Krakowie /3.07.1980 r/



Rys. 1.6. Wahania ruchu podczas godzin "szczytowych" na wlotach skrzyżowania Limanowskiego - Na Zjeździe w Krakowie /3.07.1980 r./

godzin szczytowych. Takie krótkoterminowe zmiany natężeń ruchu, charakteryzujące gwałtowność powstawania szczytów oraz szybkość ich zaniku, rzadko są rejestrowane z uwagi na brak odpowiedniej, automatycznej aparatury do pomiarów ciągłych. Przy pomiarach ręcznych, realizowanych cyklicznie, przeważnie raz w roku na poszczególnych skrzyżowaniach, podstawowym interwałem pomiarowym jest 30 minut.

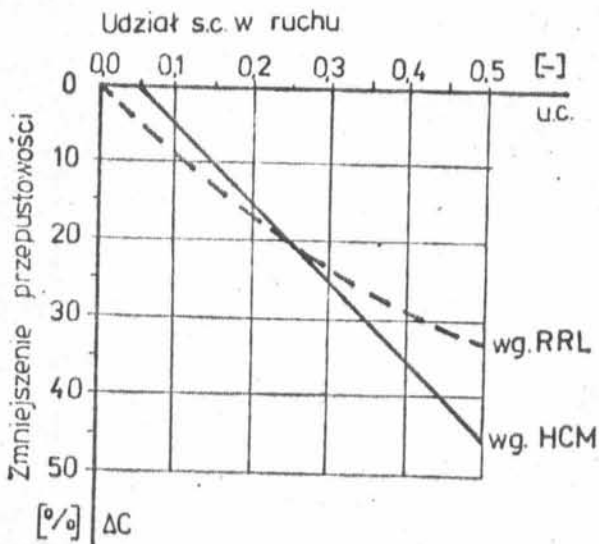
Na podstawie badań przeprowadzonych w USA stwierdzono wpływ krótkoterminowych wahań ruchu na przepustowość i natężenia krytyczne, co znalazło odzwierciedlenie w metodzie HCM-65 projektowania sygnalizacji, gdzie wprowadzono tzw. współczynnik nierównomierności ruchu w godzinie γ_{15} , określony jako stosunek liczby pojazdów przejeżdżających przekrój drogi w godzinie szczytu do poczwórnej wartości maksymalnego natężenia ruchu obserwowanego w 15-minutowym okresie tej godziny. Minimalna wartość współczynnika γ_{15} obserwowana na ulicach miast USA wynosi około 0,5, zaś najczęściej występująca mieści się w przedziale 0,85 + 0,90 [39]. Autor pracy [72] wskazuje na występowanie przypadków, kiedy w ciągu 15 minut notowane są natężenia sięgające 40% natężeń godzinowych, zaś w ciągu 5 minut natężenia wynoszące do 20% natężeń godzinowych. Tak duże kilkuminutowe spiętrzenia ruchu występują zwłaszcza w mniejszych miastach które charakteryzują się krótkotrwałymi okresami ruchu szczytowego. Przedstawione wyżej przesłanki potwierdzają celowość przebadania w warunkach krajowych właśnie wahań natężenia ruchu rejestrowanego w krótkich interwałach, dla poznania ich charakteru oraz opisu w wielkościach liczbowych a następnie ustalenie wpływu na sprawność funkcjonowania skrzyżowania z sygnalizacją o stałym programie.

1.5. Zmiany struktury rodzajowej ruchu

Dla pełnego obrazu ruchu niezbędna jest również znajomość jego struktury rodzajowej, czyli udziału poszczególnych typów pojazdów w ruchu. Znane są różne stopnie szczegółowości podziału pojazdów. Najczęściej stosowany praktyczny podział, ogranicza się do wydzielenia czterech grup; samochodów osobowych, ciężarowych, autobusów oraz rowerów i motocykli. Udział samochodów ciężarowych i autobusów w ruchu ulicznym wywiera znaczny wpływ na jego przebieg. Powoduje głównie obniżenie prędkości potoku ruchu, szczególnie na ulicach o większych pochyleniach podłużnych, oraz zmniejsza przepustowość przekrojów ulicznych i wlotów na skrzyżowania. Wielkość wpływu samochodów ciężarowych na przepustowość wlotów skrzyżowań z sygnalizacją w zależności od ich udziału w ruchu - wg metody HCM-65 i RRL - przedstawiono na rys. 1.7. Wpływ ten jest istotny, gdyż przy wzroście udziału samochodów ciężarowych o 20% /np. od $u_c = 10\%$ do $u_c = 30\%$ / przepustowość obniża się o 14% wg metody RRL i o 20% - wg HCM.

Struktura rodzajowa ruchu, podobnie jak jego natężenie, ulega zmianom w ciągu dnia. Charakter tych zmian, przy interwale rejestracji ruchu na skrzyżowaniu wynoszącym 30 minut, obrazuje rys. 1.8. Wahania struktury rodzajowej ruchu na poszczególnych wlotach skrzyżowań przedstawiono w aneksie na rys. 1.3 i 1.4. Charakterystyczny jest przebieg zmian struktury rodzajowej wykazujący, iż największy udział samochodów ciężarowych i autobusów w ruchu na skrzyżowaniu przypada na godziny przedpołudniowe i południowe /odpowiednio ok. 30 i 25% dla analizowanych skrzyżowań/.

Rejestrując ruch w krótszych interwałach np. 5-minutowych, otrzymuje się obraz krótkoterminowych zmian struktury rodzajo-



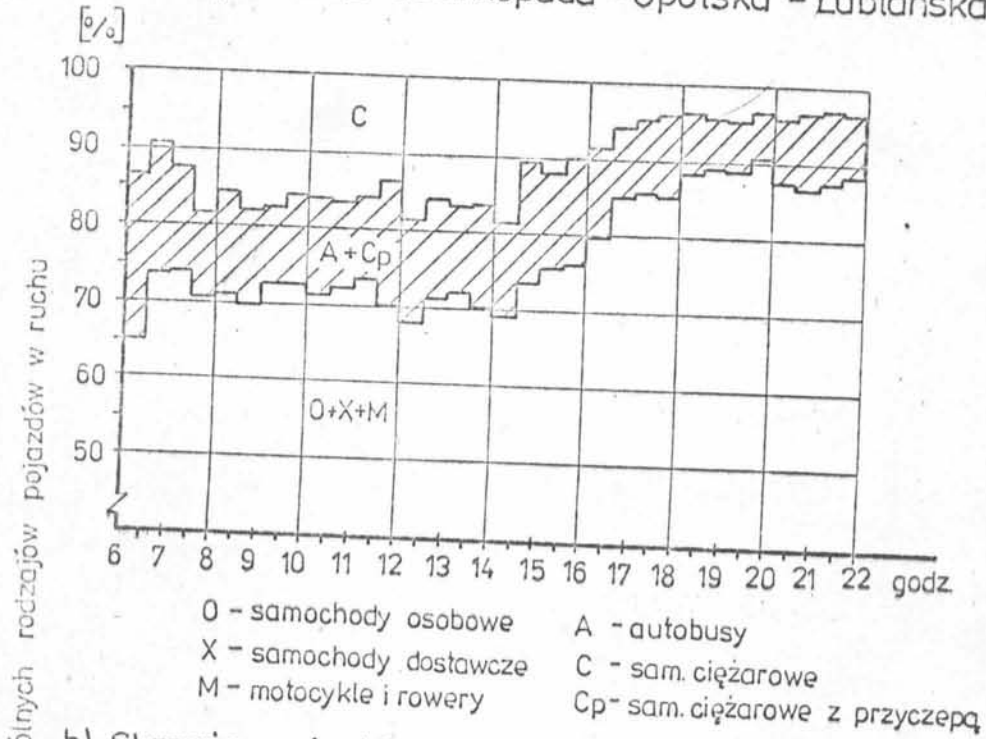
Rys. 1.7. Wpływ udziału samochodów ciężarowych i autobusów w ruchu na przepustowość wlotu

węj /rys. 1.9/. Zanotowany na rozważanych skrzyżowaniach udział samochodów ciężarowych w potoku przyjmuje w interwałach 5-minutowych wartości w przedziale od 3 do 32% podczas 2-godzinnych okresów ruchu szczytowego. Całkowity brak w literaturze danych dotyczących wahań struktury rodzajowej, oraz stwierdzony istotny wpływ udziału samochodów ciężarowych na efektywność funkcjonowania skrzyżowania uzasadniają dlaczego w pracy podjęto również badania mające na celu określenie charakteru i zakresu krótkotrwałych wahań struktury rodzajowej ruchu.

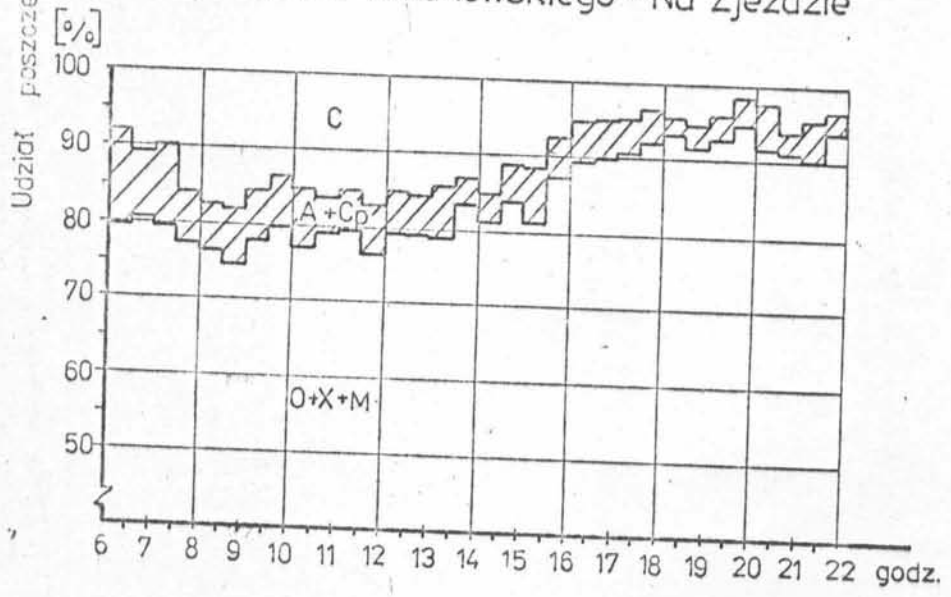
1.6. Opis potoku ruchu w ujęciu probabilistycznym

Potok pojazdów można rozważać jako ruch dyskretnych obiektów w dwuwymiarowej przestrzeni, którą ograniczają droga i czas. Przyjmując ustalony przekrój w konkretnym miejscu drogi, można obserwować przemieszczający się w miarę upływu czasu strumień

a) Skrzyżowanie: 29 Listopada - Opolska - Lublańska



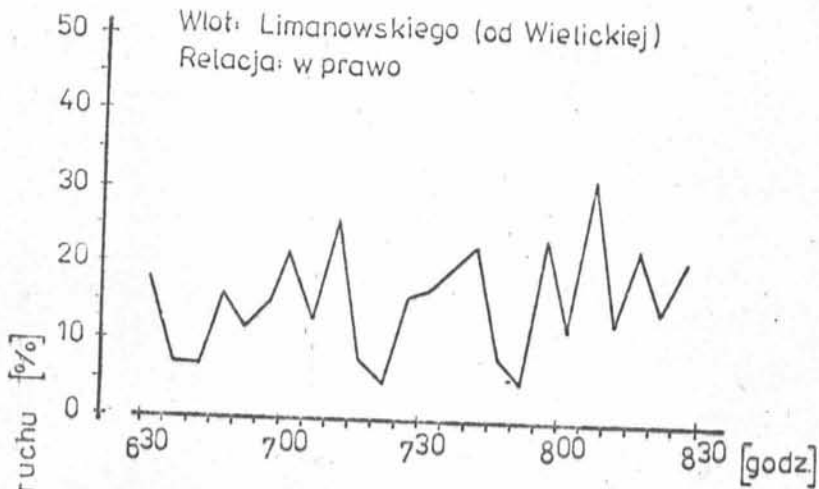
b) Skrzyżowanie: Limanowskiego - Na Zjeździe



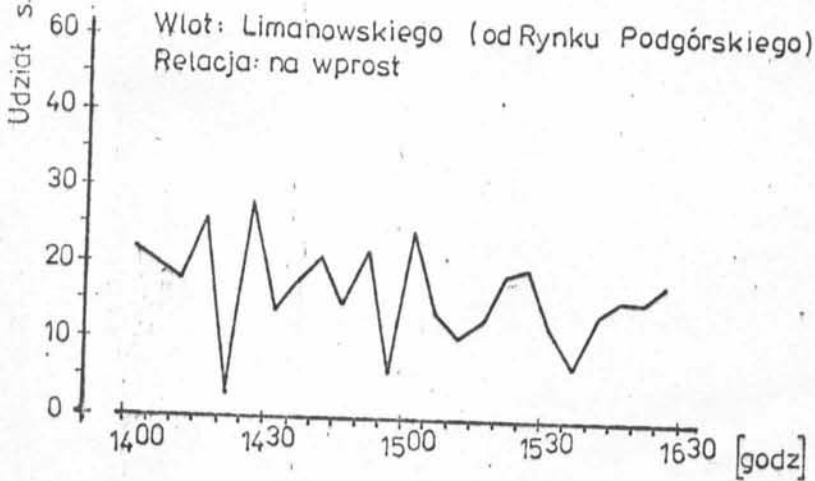
Rys. 1.8. Zależność między strukturą rodzajową ruchu na skrzyżowaniu a porą dnia

ZMIENNOŚĆ STRUKTURY RODZAJOWEJ

Skrzyżowanie: Na Zjeździe - Limanowskiego



$$s.c. = C + C_p + A$$



Rys. 1.9. Zmienność struktury rodzajowej w okresach ruchu szczytowego

pojazdów, czyli zdarzenia zachodzące w czasie. Momenty przejazdu poszczególnych pojazdów przez dany przekrój są zdarzeniami losowymi. Losowy strumień pojazdów rozpatrywać można w dwojakim ujęciu:

- a/ badając rozkład liczb pojazdów, które przejeżdżają przekrój w danym przedziale czasu,
- b/ badając rozkład długości odcinków czasu pomiędzy chwilami, w których przejeżdżają pojazdy.

Najczęściej stosowanym [13], [16], [18], [59], [64], [70], [76], [77] rozkładem, opisującym liczby pojazdów przejeżdżających dany przekrój, jest rozkład Poissona, którego funkcja gęstości prawdopodobieństwa ma postać:

$$f/n/ = \frac{1}{n!} \bar{t}_0^n \cdot e^{-\left(\frac{t_0}{\bar{t}_0}\right)} \quad /1.3/$$

gdzie: $f/n/$ - prawdopodobieństwo pojawienia się n pojazdów w interwale t ,

\bar{t}_0 - średni odstęp czasowy w strumieniu pojazdów o natężeniu N [P/h] obliczany wg wzoru:

$$\bar{t}_0 = \frac{3600}{N} \quad /1.4/$$

W strumieniu pojazdów podlegającym regułom rozkładu Poissona odstępy czasu między kolejnymi pojazdami mają rozkład wykładniczy, o funkcji gęstości prawdopodobieństwa danej wzorem

$$f/t_0/ = \frac{1}{t_0} \cdot e^{-\frac{t_0}{t_0}} \quad /1.5/$$

gdzie: $f/t_0/$ - prawdopodobieństwo wystąpienia odstępu czasowego między kolejnymi pojazdami o wielkości t_0 [s],
pozostałe oznaczenia j.w.

W rzeczywistości w strumieniu pojazdów na jednym pasie ruchu istnieje pewien minimalny odstęp t_{om} między kolejnymi pojazdami.

W związku z tym, praktycznie do opisu strumienia pojazdów stosuje się dwuparametrowy rozkład wykładniczy przesunięty, którego funk-

cja gęstości prawdopodobieństwa ma postać:

$$f/t_0/ = \frac{1}{\bar{t}_0 - t_{0m}} \cdot e^{-\frac{t_0 - t_{0m}}{\bar{t}_0 - t_{0m}}} \quad /1.6/$$

Dla zastosowania rozkładu wykładniczego do opisu odstępów czasowych między pojazdami niezbędne jest przyjęcie założenia, że czas przyjazdu kolejnego pojazdu jest niezależny od momentów przejazdu poprzednich pojazdów, a prawdopodobieństwo zgłoszenia się pojazdu w interwale czasu t_0 jest proporcjonalne do długości tego interwału. W rzeczywistych, miejskich warunkach ruchu założenia te niejednokrotnie nie są spełnione i stąd też szereg autorów [38], [40], [44], [45], [63] poddaje w wątpliwość możliwość powszechnego stosowania poissonowskiego rozkładu do opisu strumienia pojazdów. Utrata cech losowości występuje w ruchu przerywanym przez sygnalizację świetlną i to w tym większym stopniu w im mniejszej odległości od skrzyżowania z sygnalizacją rozważamy ruch. Przy większych natężeniach ruchu, przy których odstępy między pojazdami są małe i występuje wzajemne oddziaływanie na siebie kolejnych pojazdów część pojazdów porusza się nieswobodnie.

Rozkłady odstępów czasu w warunkach ruchu nieswobodnego i przerywanego były przedmiotem badań naukowych, przy czym próby ich opisu szły w dwóch kierunkach. Próbowano bowiem /Krell, Wörner, Hondermarg [44]/ dobrać odpowiednią funkcję matematyczną, jak najdokładniej opisującą empiryczny rozkład odstępów czasowych, bądź zbudować odpowiedni model przebiegu ruchu, wykorzystując złożone rozkłady prawdopodobieństwa. Złożony wykładniczy rozkład prawdopodobieństwa stosowali m.in. Norman /HCM-65/ i Kell [44]. W tym przypadku dystrybuanta rozkładu ma postać:

$$F/t_o/ = /1 - \mathcal{L}/ \cdot e^{-\frac{t_o - t_{om1}}{\bar{t}_{o1} - t_{om1}}} + \mathcal{L} \cdot e^{-\frac{t_o - t_{om2}}{\bar{t}_{o2} - t_{om2}}} \quad /1.7/$$

gdzie: $1 - \mathcal{L}$ - udział pojazdów jadących swobodnie - wg HCM-65 dla natężenia $N > 500$ P/h istnieje empiryczny związek [13]: $1 - \mathcal{L} = \exp[-0,016 \cdot N]$,

\bar{t}_{o1} - średni odstęp czasowy w zbiorze swobodnie jadących pojazdów,

\bar{t}_{o2} - średni odstęp czasowy w zbiorze pojazdów jadących nieswobodnie,

t_{om1} - minimalny odstęp czasowy w ruchu swobodnym,

t_{om2} - minimalny odstęp czasowy w ruchu nieswobodnym.

Przy dużych natężeniach stosowano również [31], [44] rozkład złożony stanowiący sumę ważoną przesuniętego rozkładu wykładniczego i rozkładu Erlanga:

$$F/t_o/ = /1 - d/ \cdot e^{-\frac{t_o - t_{om1}}{\bar{t}_{o1} - t_{om1}}} + d \cdot e^{-k \frac{t_o - t_{om2}}{\bar{t}_{o2} - t_{om2}}} \cdot \sum_{n=0}^{k-1} \frac{\left[\frac{t_o - t_{om2}}{\bar{t}_{o2} - t_{om2}} \right]^n}{n!} \quad /1.8/$$

gdzie: k - parametr oznaczający stopień utraty losowości odstępów czasowych w nieswobodnej części ruchu. Parametr ten wg [31] przyjmuje wartości $k = 5 + 7$,

- pozostałe oznaczenia jak we wzorze /1.7/.

Prowadząc badania w warunkach krajowych Krystek [38] aproksymował rozkłady odstępów czasowych rozkładem wykładniczym, gamma i logarytmiczno-normalnym stwierdzając, iż rozkłady gamma i logarytmiczno-normalny znacznie dokładniej opisują częstości występowania odstępów czasu między pojazdami w potokach o natężeniach od 0 do 1500 P/h niż rozkład wykładniczy. Zasugerował równocześnie, że dla mniej dokładnych obliczeń można stosować rozkład wykładniczy, pod warunkiem, że natężenie ruchu nie przekracza 600 P/h/kier.

Uwzględniając występowanie kolumn pojazdów w strumieniu ruchu,

do opisu rozkładu odstępów czasowych Dawson [44] użył również ważonej sumy przesuniętych rozkładów logarytmiczno-normalnego i Erlanga, o następującej funkcji gęstości prawdopodobieństwa:

$$f/t_0/ = /1 - \alpha/ \frac{1}{S./t_0 - t_{om1}/ \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{[\ln/t_0 - t_{om1}/ - \ln/\bar{t}_{o1} - t_{om1}/]}{2S^2}} +$$

$$+ \alpha \cdot \frac{/t_0 - t_{om2}/^{k-1}}{/k - 1/!} \cdot \left(\frac{k}{\bar{t}_{o2} - t_{om2}}\right)^k \cdot e^{-k \frac{t_0 - t_{om2}}{\bar{t}_{o2} - t_{om2}}} \quad /1.9/$$

gdzie: S^2 - wariancja rozkładu logarytmiczno-normalnego, pozostałe oznaczenia jak we wzorach /1.7/ i /1.8/.

Jak wynika z przedstawionego przeglądu stochastycznych modeli ruchu, chęć dokładnego odwzorowania rzeczywistego potoku ruchu prowadzi do dosyć skomplikowanych postaci wzorów opisujących rozkłady odstępów czasowych między pojazdami i praktyczne stosowanie ich w badaniach przebiegu ruchu na skrzyżowaniach prowadziłyby do nieefektywnych obliczeniowo algorytmów. Sytuacja jeszcze bardziej komplikuje się jeżeli uwzględni się wahania ruchu w czasie, czyli rozkłady zmiennych losowych występujących w strumieniu pojazdów uzależni się od dodatkowego parametru tj. czasu. W takim przypadku, z matematycznego punktu widzenia, przebieg ruchu należy rozważać jako proces stochastyczny, niestacjonarny.

Proces losowy nosi nazwę stacjonarnego jeśli wyróżnia się on niezmiennością swoich charakterystyk probabilistycznych przy translacji wzdłuż osi czasu [8], czyli niezależnością od czasu kształtu oraz parametrów rozkładu N-wymiarowej zmiennej losowej $/X_{t1}, X_{t2}, \dots, X_{tN}/$, $t_i \in T$ [28]. W przypadku potoku ruchu, którego intensywność jest zależna od czasu /np. podczas godzin ruchu szczytowego/ będziemy mieli do czynienia z procesem sto-

chastycznym niestacjonarnym, przy czym, przez intensywność potoku rozumiemy [71] graniczną wartość ilorazu:

$$\lim_{T \rightarrow 0} \frac{P [q/t, t + T/\geq 1]}{t + T - t} \quad /1.10/$$

gdzie: $P [q/t, t + T/\geq 1]$ - jest prawdopodobieństwem przybycia $q/T/\geq 1$ pojazdów w interwale czasu $/t, t + T/$.

Intensywność ruchu można traktować również jako wartość oczekiwaną chwilowego natężenia $E/q/$, czyli wartość oczekiwaną liczby pojazdów pojawiających się w jednostce czasu. Przy potoku stacjonarnym wartości oczekiwane np. obciążeń minutowych będą stałe wewnątrz większego interwału o długości T , podczas gdy przy potoku niestacjonarnym te wartości oczekiwane będą zmieniać się wraz z czasem. Proces stochastyczny ruchu oznaczono symbolem $\{q/t/\}$, zaś funkcję losową argumentu t zwaną realizacją procesu stochastycznego - $q/t/$ [58].

Niektórzy autorzy [10], [15], [34], [52], [60] w swoich pracach traktowali potok o zmiennej w czasie intensywności, jako proces stochastyczny stacjonarny w przedziałach. Proces $\{q/t/\}$ możemy traktować jako stacjonarny w przedziale $/0, T/$ jeśli funkcja gęstości n -tego rzędu procesu stacjonarnego spełnia warunki:

$$f /q_1, \dots, q_n; t_1, \dots, t_n/ = f /q_1, \dots, q_n; t_1 + \xi, \dots, t_n + \xi /$$

dla dowolnego ξ i wszystkich czasów należących do przedziału $/0, T/$

[54]. Nikisch [52] prowadząc badania w warunkach krajowych wykazał, że w natężeniu ruchu występują interwały, podczas których proces możemy uważać za stacjonarny, gdyż przy stałej wartości ^{sredniej} procesu wariancja jest również stała.

Poszukiwania różnych badaczy w zakresie probabilistycznego opisu potoku ruchu wskazują, że dokładny opis rozkładu odstępów czaso-

wych między pojazdami w odniesieniu do potoków ruchu charakteryzujących się zmiennością parametrów w szerokim zakresie, jest bardzo trudny i mimo wyprowadzenia skomplikowanych wzorów, zawsze do pewnego stopnia przybliżony. Występujące w rzeczywistości znaczne wahania ruchu, szczególnie podczas godzin szczytowych /rys. 1.6/, były dotychczas pomijane w jego opisie. W tej pracy zastosowano pewne uproszczenia w zakresie opisu rozkładu odstępów czasowych między pojazdami w potoku, uwzględniono równocześnie jednak niestacjonarność procesu.

1.7. Dotychczasowy stan badań w zakresie charakterystyki wahań natężenia ruchu oraz ich wpływu na efektywność sterowania i wnioski

Bezpośrednie badania na rzeczywistych poligonach, pozwalające na dokładną ocenę sprawności funkcjonowania skrzyżowania o ruchu sterowanym za pomocą sygnalizacji świetlnej, w szerokim zakresie zmienności jego parametrów, są bardzo trudne do wykonania, nawet przy zastosowaniu automatycznej aparatury pomiarowej. Dlatego też w przeważającej mierze w badaniach stosowane są metody modelowania matematycznego bądź symulacyjnego na maszynach cyfrowych. Takie podejście do zagadnienia determinuje w znacznym stopniu organizację jak i sam przebieg prac badawczych. Zazwyczaj więc są one podzielone na-empiryczne badania potoków ruchu pozwalające na ich opis matematyczny bądź odwzorowanie numeryczne oraz - właściwe badania wpływu zmienności parametrów ruchu na sprawność funkcjonowania skrzyżowania z sygnalizacją wykonywane na opracowanych modelach przebiegu ruchu.

W odniesieniu do potoku ruchu prace badawcze dotyczą głównie rozkładów odstępów czasowych między pojazdami bądź ilości pojaz-

dów przejeżdżających przekrój w interwale czasu. Najistotniejsze rezultaty prac z tego zakresu przedstawiono w rozdziale 1.6.

Na szczególną uwagę zasługują badania zmienności ruchu w czasie. Prowadzone w dość szerokim zakresie badania zmienności natężeń ruchu /w czasie jak i w przestrzeni/ odnoszą się zazwyczaj do długich okresów czasu z interwałem rejestracji 1 godz. [65], [75]. Wyniki takich badań są jednak praktycznie nieprzydatne do analizy funkcjonowania sygnalizacji w okresach obejmujących np. godziny ruchu szczytowego, kiedy to niezbędna jest znajomość zmienności ruchu w znacznie krótszych interwałach czasu. Badania w tym kierunku podjął Tonke [60] dążąc do znalezienia zależności między natężeniem ruchu rejestrowanym w interwałach minutowych podczas okresów szczytowych a czasem bieżącym. Stosując metodę najmniejszych kwadratów określił linię przebiegu /profile/ natężenia w czasie, w postaci odcinków prostych i paraboli kwadratowych. Dla określonych kombinacji dwóch profili natężenia niestacjonarnego potoku ruchu prowadził badania strat czasu na skrzyżowaniu bez sygnalizacji świetlnej. Kimber i Hollis [33], [34] do badania strat czasu i kolejek w okresach szczytowych na skrzyżowaniach z prawem pierwszeństwa zastosowali profil natężenia w postaci funkcji schodkowej o podstawie czasu równej 1 godzinie. Do kalibracji zbudowanego modelu użyli profilu natężenia ruchu o kształcie krzywej normalnej /Gausa/ podając równocześnie dla takiego przypadku zasadę określania czasu trwania okresu ruchu szczytowego.

Catling [15] w rozważaniach teoretycznych jak również badaniach symulacyjnych, dotyczących strat czasu i kolejek na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją do opisu zmiennego w czasie potoku ruchu użył paraboli 2 stopnia /por. wzór /6.24//.

Generalnie jednak stwierdza się, że zbyt mała jest liczba

danych odnośnie profili czasowych zgłoszeń pojazdów na wlotach skrzyżowań i rzeczywiste wahania natężeń ruchu na skrzyżowaniach mogą znacznie odbiegać od założonych w poszczególnych modelach. W literaturze krajowej zaś zupełnie brak jest informacji dotyczących szczegółowej charakterystyki zmienności natężeń ruchu rozważanych w krótkich interwałach czasu.

Ustalenie wpływu wahań ruchu na efektywność sterowania wiąże się z koniecznością przyjęcia kryteriów oceny efektywności sterowania. Wśród stosowanych mierników oceny efektywności sterowania sygnalizacją świetlną najważniejsze miejsce zajmują niewątpliwie straty czasu i kolejki, a w dalszej kolejności bierze się również pod uwagę zatrzymanie pojazdów, przeciążenia cykli /kolejki zostające na następny cykl/ oraz stopień wykorzystania faz zielonych przez ruch. Wymienione mierniki efektywności pozwalają również na klasyfikację warunków ruchu oraz określanie stopnia swobody ruchu, uważanego za syntetyczny wskaźnik sprawności skrzyżowania.

Badania empiryczne, teoretyczne jak również symulacyjne prowadzone od wielu lat w różnych krajach koncentrują się głównie na szacowaniu strat czasu i kolejek, jakie powstają na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną. Niewątpliwie największe osiągnięcia w tym zakresie posiadają Anglicy, Amerykanie i Niemcy. W większości jednakże przypadków opracowane metody i wzory obliczania strat czasu i kolejek oparte zostały o modele zgłoszeń pojazdów określone przez stacjonarne procesy stochastyczne [2], [16], [23], [35], [68], [76], [77], [80], [82]. W praktyce zaś nie są one stacjonarne i nie mogą być nawet w uproszczeniu rozsądnie reprezentowane jako takie, szczególnie w odniesieniu do okresów szczytowych, kiedy to zgłoszenia pojazdów w przekroju drogowym stanowią proces zależny od czasu. Formuły wyprowadzone na drodze teoretycznej sprawdzane były metodami symulacyjnymi uwzględniający-

mi jednakże również stacjonarne, stochastyczne potoki.

Niektórzy autorzy, jak np. Miller [56], Newell [31], Sosin [67], próbując ująć w pewnym sensie niestacjonarny charakter ruchu, wprowadzili w swoich modelach parametr, będący miarą rozproszenia częstości przejazdów przez przekrój w postaci stosunku wariancji do średniej dla rozkładu zgłoszeń. Newell parametr ten odniósł zarówno do dopływu jak i odpływu ruchu. Takie podejście w dalszym ciągu nie pozwalało jednakże na ujęcie najistotniejszych cech niestacjonarnego potoku.

Bardziej szczegółowe rozważania teoretyczne odniesione do poszczególnych cykli, mogących znajdować się w jednym z trzech stanów; nienasyconym, nasyconym lub przesyconym, pozwalają co prawda na dość dokładne ujęcie zmienności dopływającego potoku, jak również uwzględnienie okresowych przeciążeń przy obliczaniu strat czasu i kolejek, ale takie obliczenia prowadzone w skali mikro pociągają za sobą równocześnie bardzo duży nakład pracy, ograniczający w efekcie ich praktyczne zastosowanie [15], [62].

Analiza porównawcza najważniejszych modeli strat czasu na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną zaprezentowana zostanie w rozdziale 6.

Dokonany przegląd literatury w zakresie badań zmienności ruchu w czasie oraz wpływu zmienności na efektywność sterowania na skrzyżowaniach pozwolił na sprecyzowanie następujących wniosków:

- a/ Na bazie pomiarów ręcznych bądź automatycznych opracowywane są zależności między natężeniem ruchu i czasem, przy czym powszechnie stosowanym interwałem rejestracji jest 1 godz. Dane takie nie pozwalają na ocenę zmienności ruchu np. podczas okresów szczytowych, najistotniejszych w aspekcie oceny sprawności skrzyżowania.
- b/ Dla opisu zmienności w czasie ruchu rejestrowanego w krótkich

interwałach konieczne jest użycie wskaźników umożliwiających opis tych wahań w wartościach liczbowych, Brak jest takich wskaźników w literaturze.

- c/ Badania przeprowadzone w RFN pozwoliły na określenie zależności natężenia ruchu od czasu w okresach szczytowych dla poszczególnych miejsc pomiarowych lecz dotyczyły one skrzyżowań z pierwszeństwem przejazdu.
- d/ W większości prac, prowadzonych w głównej mierze za granicą, w opracowanych modelach profile natężenia ruchu były zakładane, przy czym postać ich wyrażano za pomocą funkcji schodkowej lub krzywej o równaniu z prostą interpretacją matematyczną.
- e/ Problem mierników oceny efektywności sterowania sygnalizacją świetlną o stałym programie jest dobrze rozeznany, a do najczęściej stosowanych mierników należą straty czasu i kolejki. W przypadku procesów niestacjonarnych istotne jest prowadzenie ich analizy w poszczególnych cyklach.
- f/ Teoretyczne formuły strat czasu i kolejek na skrzyżowaniu z sygnalizacją wyprowadzone zostały w przeważającej większości na bazie modeli zakładających dopływ stacjonarnych potoków ruchu i weryfikowane były najczęściej metodą symulacji a tylko częściowo empirycznie.
- g/ Przedstawione w literaturze formuły na straty czasu lub kolejki w przypadku potoków niestacjonarnych są bardzo kłopotliwe do stosowania. Wymagają one prowadzenia żmudnych obliczeń w krótkich interwałach, w których ruch można uznać za stacjonarny, przy czym należy określić warunki ruchu odrębnie dla każdego takiego interwału /stan nasycenia wlotu, kolejka na początku interwału, możliwość rozładowania się jej/.
- h/ W literaturze brak jest również praktycznych zależności mierników oceny efektywności sterowania sygnalizacją z uwzględnieniem wahań ruchu od parametrów charakteryzujących ruch oraz sterowanie jego przebiegiem. Stanowi to istotny brak w praktyce inżynierskiej mogący rzutować w znacznym stopniu na racjonalność rozwiązań.
- i/ Należy zwrócić uwagę na prawie zupełny brak w kraju badań do-

tyczących krótkoterminowych zmian natężeń ruchu i w konsekwencji świadomości ich wpływu na efektywność /straty czasu, energii, oddziaływanie na środowisko itd./ sterowania sygnalizacją o stałym programie, jak również doświadczeń w zakresie analiz odniesionych do tych zagadnień.

1.8. Cel badań i zakres pracy

Synteza wniosków przedstawionych w ustępie 1.7 umożliwiła sprecyzowanie podjętych zamierzeń badawczych - sygnalizowanych w poszczególnych punktach wstępu - i uściślenie ich celu.

W chwili obecnej brak jest w kraju rozeznania znaczenia problemu oddziaływania wahań ruchu na efektywność sterowania sygnalizacją o stałym programie. Brak jest również odpowiedniego narzędzia badawczego umożliwiającego poznanie zmienności ruchu w czasie oraz scharakteryzowanie jej w wartościach liczbowych. Zagadnienia te w dostępnej literaturze światowej traktowane są jedynie w sposób przyczynkowy. Problemy te podjęto w niniejszej pracy.

Cele i wynikający z nich zakres pracy przedstawiają się więc następująco:

- zbadanie i opis krótkoterminowych wahań ruchu dopływającego do pojedynczego skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, poprzez określenie wskaźników charakteryzujących wahania, oraz ich wzajemnych związków /stanowi to problematykę rozdziału 2/,
- zamodelowanie potoku ruchu z wahaniami natężenia adekwatnymi do występujących w godzinach ruchu szczytowego oraz opracowanie modelu przebiegu ruchu na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją o stałym programie /rozdział 3 i 4/,
- zbadanie wpływu wahań ruchu na sterowanie sygnalizacją, poprzez określenie wartości podstawowych mierników efektywności sterowania i porównanie z uzyskanymi dla stacjonarnych potoków /rozdział 5/.

Osięgnięcie nakreślonych celów pozwoli na dowiedzenie prawdziwoś-

ci tezy, że wartości podstawowych mierników oceny efektywności sterowania sygnalizacją świetlną o stałym programie, szacowane przy założeniu stacjonarnego potoku dopływającego, są obarczone istotnym błędem wynikającym z nieuwzględnienia rzeczywistej zmienności ruchu. Określenie wielkości tego błędu jest ważne dla oceny znaczenia przedmiotowego problemu. Oszacowanie wartości mierników efektywności sterowania z uwzględnieniem wahań ruchu pozwoli również na analizę porównawczą i ocenę modeli strat czasu opracowanych przez różnych autorów /rozdział 6/.

Zamierzeniem autora niniejszej pracy jest osiągnięcie takich rezultatów w przedmiotowym zakresie, które nie tylko stworzą podstawy naukowe ukierunkowujące dalsze badania, ale przede wszystkim będą miały znaczenie praktyczne, umożliwiając, poprzez prawidłową ocenę wielkości wahań ruchu i efektywności sterowania, podnoszenie sprawności skrzyżowań.

1.9. Sposób realizacji oraz układ pracy

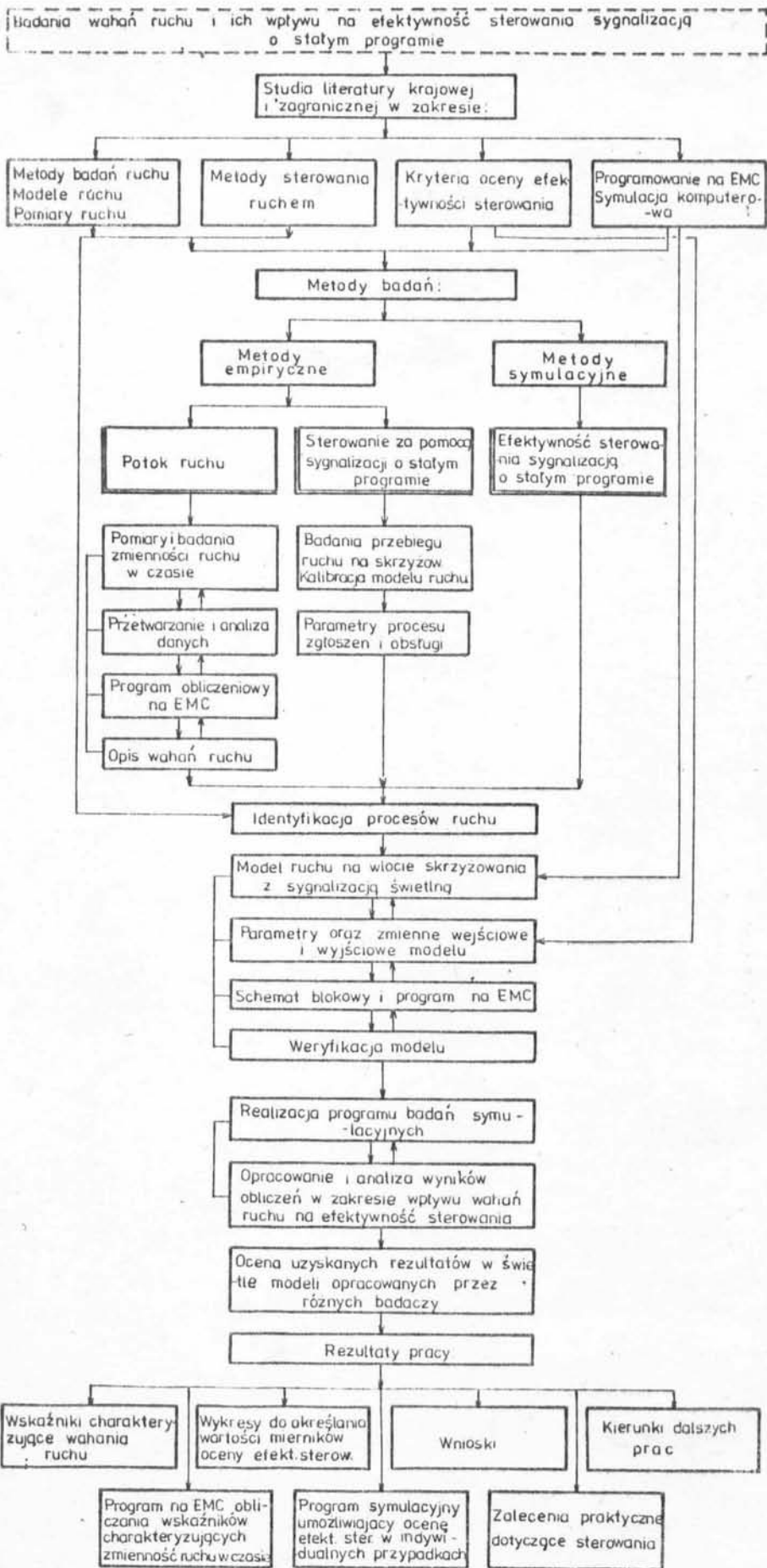
Realizacja przedstawionych wyżej zamierzeń wymaga przeprowadzenia badań zarówno empirycznych jak i modelowych, symulacyjnych. Badania empiryczne dotyczyć będą natężenia i struktury potoku dopływającego do skrzyżowania oraz parametrów determinujących przebieg ruchu na skrzyżowaniu. Umożliwią one scharakteryzowanie wahań ruchu oraz poprawne zbudowanie modelu ruchu na skrzyżowaniu. Badania symulacyjne - przewidziane z uwagi na złożoność zagadnienia i niemożliwość przebadania go w sposób bezpośredni przez pomiary na skrzyżowaniach - pozwolą zaś na określenie efektywności sterowania w sytuacji gdy potok dopływający jest potokiem niestacjonarnym.

Badania postanowiono odnieść do ruchu przebiegającego bezko-

lizyjnie, dla którego jako reprezentatywną przyjęto relację na wprost zachodzącą z jednego pasa na wlocie skrzyżowania. W potoku ruchu wyodrębniono dwa rodzaje pojazdów - samochody osobowe i ciężarowe.

Schemat ideowy pracy wyjaśniający również sposób jej realizacji przedstawiono na rys. 1.10.

Praca składa się z dwóch części: części zasadniczej i aneksu. Rozdział pracy na dwie części podyktowany został potrzebą uzyskania przejrzystości prezentowanego materiału. Część zasadnicza zawiera podstawowe rozważania i analizy oraz główne rezultaty badań i obliczeń. Poprzedzona została zestawieniem podstawowych symboli i oznaczeń zaś na zakończenie podano bibliografię zawierającą 84 pozycje. Aneks natomiast zawiera materiały o znaczeniu drugorzędym - tablice, wykresy oraz testy statystyki matematycznej. Numeracja załączników w aneksie odpowiada numerom rozdziałów w zasadniczej części pracy.



rys. 1.10. Schemat ideowy pracy

2. POMIARY I BADANIA DLA OKREŚLENIA CHARAKTERYSTYK WAHAŃ RUCHU

Pomiary i badania terenowe zmienności ruchu w czasie, których przedmiotem jest potok ruchu dopływający do wlotu skrzyżowania, zgodnie z przyjętym schematem pracy powinny w efekcie umożliwić opis liczbowy i graficzny wahań ruchu. Równocześnie rezultaty tych badań winny stanowić podstawę do opracowania modelu procesu zgłoszeń na wlocie skrzyżowania.

2.1. Cel i metody badań

Głównym celem podjętych badań wahań ruchu było określenie charakteru oraz zakresu zmian natężenia ruchu i jego struktury rodzajowej w przypadku, gdy interwał rejestracji zmian przybie-
ra długość od jednej do kilku minut. Zaplanowane obszerne pomiary miały dostarczyć materiału, który umożliwiłby określenie wskaźników pozwalających na liczbowy opis wahań ruchu a także poznanie charakteru zmian zachodzących w czasie. Zamierzono ustalić zależności poszczególnych wskaźników charakteryzujących wahania od podstawowego parametru potoku ruchu, jakim jest jego natężenie, a także wzajemne zależności między wskaźnikami. Szczególną uwagę zwrócono na okresy ruchu szczytowego, wyróżniające się specyficznymi cechami ruchu, istotnymi z uwagi na efektywność sterowania sygnalizacją świetlną. Poprzez poznanie i analizę zmienności ruchu w tych okresach zmierzano do określenia reprezentatywnych linii zmian natężenia ruchu oraz czasu trwania szczytu. Dane te wykorzystano później przy opracowywaniu modelu ruchu na wlocie skrzyżowania.

Dla przeprowadzenia badań wahań ruchu wytypowano odpowiednie skrzyżowania, zwane dalej poligonami pomiarowymi. Z uwagi na du-

ży zakres pomiarów przewidzianych na co najmniej dwa lata i znaczną liczbę skrzyżowań zdecydowano się na opracowanie programu obliczeniowego na EMC, umożliwiającego przetworzenie całego zakresu danych z pomiarów. Realizacja pomiarów w znacznej mierze uzależniona była od możliwych do zastosowania technik pomiarowych. Brak automatycznej aparatury pomiarowej /detektory + rejestrator/ spowodował znaczne wydłużenie procesu zbierania danych, oraz zwiększenie nakładu pracy niezbędnego do ich uzyskania. W toku opracowania rezultatów badań pominięto analizę błędów pomiarowych.

2.2. Poligony i techniki pomiarowe

Pomiary zmienności natężenia i struktury rodzajowej ruchu pojazdów dojeżdżających do wlotu skrzyżowania przeprowadzone zostały na obszarze miasta Krakowa. Wykonano je na ogólnodostępnych skrzyżowaniach, po przeprowadzeniu wstępnego rozeznania oraz analizy ich przydatności do zaplanowanych badań. Opracowując program badań w pierwszej kolejności sprecyzowano kryteria doboru poligonów. Biorąc pod uwagę cel pomiarów, a także metodę badań dobrano poligony w ten sposób aby spełnione były następujące warunki:

- ruch na dojeździe do skrzyżowania odbywał się po jednym pasie i nie podlegał bezpośrednio wpływowi sygnalizacji świetlnej z sąsiedniego skrzyżowania /skrzyżowanie odosobnione/,
- ruch pojazdów nie był blokowany przez ruch tramwajów /np. przystanki bez wysepek przystankowych/,
- w natężeniu ruchu można było wyodrębnić charakterystyczne okresy szczytowe,
- skrzyżowania były zlokalizowane, w miarę możliwości, na całym obszarze miasta /różne strefy komunikacyjne/.

i praca - dom, okresy szczytowe w większości wypadków przypadają w czasie rannych dojazdów i popołudniowych powrotów z pracy. Sam czas trwania ruchu szczytowego kształtuje się różnie. Czasokresy realizacji pomiarów określono opierając się na danych z publikacji [78], materiałach udostępnionych przez Wydział Komunikacji Urzędu Miasta Krakowa oraz wieloletnich pomiarach prowadzonych w ramach ćwiczeń i praktyk studenckich. W odniesieniu do okresów szczytowych przyjęto zasadniczo 3-godzinny czasokres pomiarowy przypadający głównie na godziny $6^{00} - 9^{00}$ i $13^{30} - 16^{30}$. Oczywiście czas trwania samego "szczytu" jest znacznie krótszy, jednakże precyzyjne określenie jego początku i końca, mimo posiadania danych historycznych, jest praktycznie niemożliwe. W związku z tym czas pomiaru musi być ustalony z takim zapasem, który zapewni uchwycenie właściwego okresu szczytowego. Na niektórych skrzyżowaniach, o dokładnym rozeznaniu i zlokalizowaniu okresów szczytowych zdecydowano się na krótszy bo 2-godzinny pomiar w czasie każdego okresu szczytowego.

W celu rozeznania charakteru zmian ruchu również w pozaszczytowych okresach dnia, na wybranych pięciu skrzyżowaniach przeprowadzono dłuższe pomiary, obejmujące w jednym przypadku 24 godziny, w dwóch 16 godzin $/6^{00} - 22^{00}/$ i w dwóch przypadkach 15 godzin $/6^{00} - 21^{00}/$.

Dla określenia zmieniającej się w czasie intensywności ruchu niezbędna jest znajomość chwilowych natężeń, czyli natężeń rejestrowanych w krótkich interwałach czasu. W związku z tym powstaje problem doboru wielkości tych krótkich przedziałów czasu w sposób, który pozwoli na, w miarę możliwości jak najdokładniejsze lecz równocześnie racjonalne, odtworzenie rzeczywistej zmienności potoku. Względy praktyczne przemawiają za przyjęciem niezbyt krótkich interwałów rejestracji, gdyż powoduje to, szczegól-

nie w przypadku pomiarów manualnych, znaczne utrudnienie, z drugiej strony zaś wydłużenie tych przedziałów powoduje, że natężenia zarejestrowane w takich przedziałach zbliżają się do natężenia średniego godzinowego. Z kolei zbyt krótkie interwały /rzędu kilkudziesięciu sekund/ będą dawały obraz zmian natężenia trudny do analizy wizualnej, ze względu na duże wahania natężeń występujących w kolejnych interwałach.

Stamma [71] prowadząc badania zmierzające do określenia natężeń miarodajnych na skrzyżowaniach bez sygnalizacji sugeruje, że dla dostatecznie dokładnego odwzorowania przepływu ruchu wystarczające wydaje się przyjęcie interwału $t_r = 1$ min. Identyczny interwał o stałej intensywności strumienia przyjęli Retzko i Tonke [60] przy konstrukcji profili natężenia, które posłużyły im do badania strat czasu na skrzyżowaniach z pierwszeństwem przejazdu. Kimber i Hollis [33], [34] stosowali interwał, po którym następowała zmiana natężenia potoku dopływającego, o długości równej 5 min. Catling [15] analizując wpływ na straty czasu liczby interwałów, na które podzielony jest okres ruchu szczytowego doszedł do wniosku, że reprezentacja potoku dopływającego w interwałach 5 do 10 min. daje dokładne prognozy średnich strat czasu na skrzyżowaniu z sygnalizacją. Branston [10] dokonując porównania pomierzonych i szacowanych wg. formuł Catlinga i Mayne'go długości kolejek na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną o ruchu przesyconym brał pod uwagę podział okresu szczytowego na interwały 6, 12 i 18-minutowe. Wykazał, że różnica między szacowanymi kolejkami w przypadku 6 i 12-minutowych interwałów jest bardzo mała. Amerykańska metoda HCM-65 obliczania przepustowości uwzględnia nierównomierność ruchu w godzinie szczytu za pomocą tzw. współczynnika nierównomierności ruchu γ , biorąc pod uwagę podział godziny na cztery 15-minutowe okresy w przypadku skrzyżowań z sygnalizacją, lub

podział na dwanaście 5-minutowych okresów w odniesieniu do dróg ekspresowych i autostrad [17], [72].

Z powyższego widać, że w zależności od celu prowadzonych badań stosuje się różne interwały, będące podstawą ujęcia wpływu wahań ruchu. Dane z literatury wskazują jednak na rząd oraz zakres wielkości interwału odpowiedniego do określenia profilu natężenia ruchu a także jego charakterystyki w okresie szczytowym. Przy doborze interwału rejestracji należy wziąć pod uwagę również pracę obserwatora, której dokładność związana jest z jego wyposażeniem w zegarek do odmierzania czasu, zaś jej efektywność zależy m.in. od łatwości określania i odczytu wielokrotności podstawowego interwału rejestracji. Łatwiej jest pomiarowemu operować interwałem 5 czy 10-minutowym niż 6 czy 11-minutowym.

Powyższe przesłanki przemawiają za celowością przyjęcia interwału 5-minutowego, który najczęściej powtarza się w różnych pracach a i ze względów realizacyjnych pomiarów wydaje się być tym minimalnym, który jeszcze nie utrudnia w znaczny sposób pracy pomiarowego. W przeprowadzonych pomiarach jako zasadniczy interwał rejestracji przyjęto $t_R = 5$ min., część pomiarów wykonano jednakże przy $t_R = 1$ min., co w dalszym toku pracy umożliwiło analizę zmienności ruchu prowadzoną na bazie różnej wielkości interwałów, będących wielokrotnością interwału podstawowego.

2.3.2. Charakterystyka wahań natężenia ruchu

Zarejestrowane w czasie pomiaru /okresie obserwacji T_0 / liczby pojazdów przejeżdżających dany przekrój w określonych interwałach t_R , w powiązaniu z bieżącym czasem dają obraz wahań natężenia ruchu w czasie. Taki uporządkowany w kolejności otrzymywania w czasie pomiaru zbiór liczb pojazdów dojeżdżających do skrzyżo-

wania w interwałach t_r , zwany jest szeregiem czasowym [58] lub zapisem czasowym [53]. Szereg czasowy natężenia ruchu oznaczono symbolem $\{q/t/\}_{t=1, \dots, n}$, w którym t oznacza bieżący czas o jednostce równej interwałowi pomiarowemu t_r . Zgodnie z terminologią przyjętą w matematyce liczby pojazdów są zmienną zależną, zaś czas zmienną niezależną. W inżynierii ruchu szereg czasowy natężenia ruchu przedstawiany jest zazwyczaj w postaci wykresu natężenia ruchu, zwanego też niekiedy linią przebiegu natężenia, bądź profilem natężenia. Przykładowy szereg czasowy z interwałem rejestracji równym 1 min., będący fragmentem pomiaru na wlocie skrzyżowania Wrocławska - Pod Fortem, przedstawiono na rys. 2.1. Wykres stanowiący efekt całego 15 godzinowego pomiaru zamieszczono w aneksie na rys. 2.1.a.

Jak już wcześniej wspomniano do opisu zmienności ruchu w czasie nie wystarczy tylko jej wizualna ocena, niezbędne są pewne wskaźniki, które umożliwią statystyczną charakterystykę szeregu czasowego w wartościach liczbowych. Z uwagi na prawie całkowity brak w literaturze informacji w tym zakresie, podjęto się w niniejszej pracy kompleksowego wyprowadzenia takich wskaźników a następnie oceny ich przydatności do charakteryzowania szeregów czasowych natężenia ruchu. Poniżej zdefiniowane zostaną proponowane wskaźniki oraz podany zostanie sposób ich wyznaczania. Zasadnicze zmienne używane w definicjach pokazano na rys. 2.1.

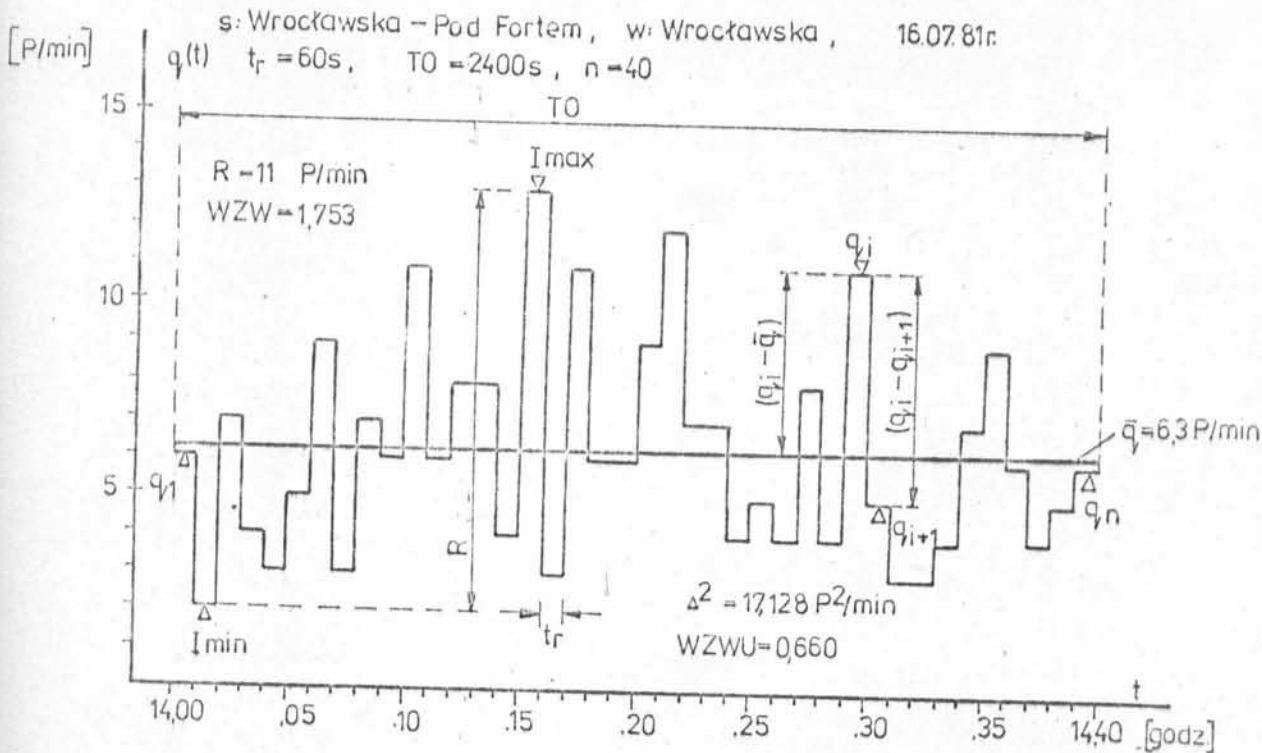
Średnia liczba pojazdów w interwale t_r - \bar{q}

- jest to określona wzorem:

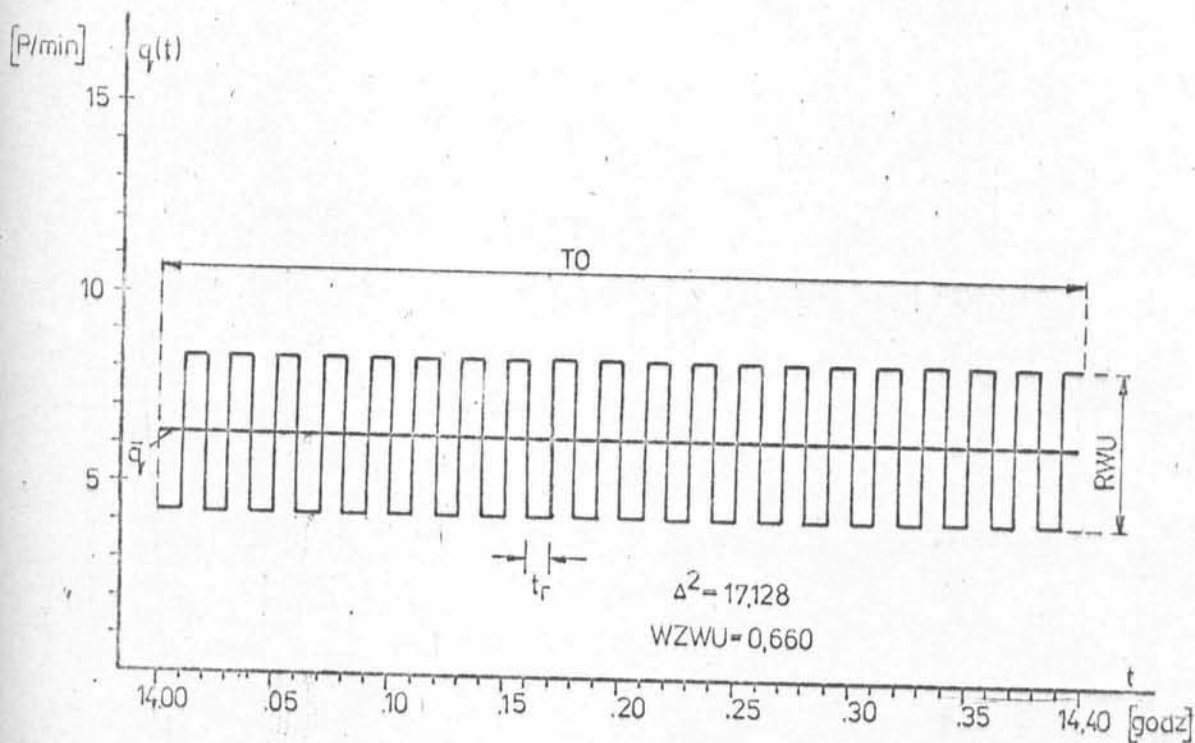
$$\bar{q} = \frac{t_r \cdot \sum_{i=1}^n q_i}{T_0} \quad [P/t_r] \quad /2.1/$$

gdzie: t_r - interwał rejestracji [s]

q_i - liczba pojazdów w i -tym interwale t_r [P], odpowiadająca wartości szeregu czasowego $\{q/t/\}$ dla $t=i$



Rys. 2.1. Przykład szeregu czasowego natężenia ruchu $\{q(t)\}_{t=1, \dots, n}$



Rys. 2.2. Teoretyczny, unormowany szereg czasowy, odpowiadający względem wskaźnika Δ^2 empirycznemu zapisowi natężenia ruchu w czasie /Rys. 2.1/ - graficzna interpretacja wskaźnika RWU

Względny zakres wahań - WZW

- określony jest jako stosunek rozstępu szeregu czasowego

$\{q/t\}_{t=1, \dots, n}$ do średniej liczby pojazdów w interwale rejestracji t_r .

$$WZW = \frac{R}{q} \quad [-] \quad /2.4/$$

WZW podaje, jaki jest obszar /zakres/ zmienności natężenia ruchu względem wartości średniej. Zakres ten wyznaczają największa i najmniejsza liczba pojazdów zarejestrowanych w interwale t_r podczas okresu obserwacji T_0 .

Średni, kwadratowy przyrost natężenia w kolejnych interwałach

$$t_r - \Delta^2$$

- wyrażony jest wzorem:

$$\Delta^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} /q_i - q_{i+1}/^2 \quad [P^2/t_r] \quad /2.5/$$

i oznacza średnią kwadratów różnic ilości pojazdów w kolejnych interwałach t_r szeregu czasowego $\{q/t\}_{t=1, \dots, n}$

Jest to wskaźnik, którego formuła podobna jest w swej budowie do wzoru na wariancję z próby, lecz określa on zmienność ruchu z przedziału na przedział. Jest to istotny wskaźnik z punktu widzenia opisu wahań ruchu w okresie obserwacji. Ujmuje on wszystkie zarejestrowane w okresie obserwacji liczby pojazdów a jego wartość zależy od wielkości natężenia ruchu podczas okresu obserwacji.

Rozstęp wahań unormowanych - RWU

- jest to różnica między maksymalną i minimalną wartością teoretycznego szeregu czasowego /rys. 2.2/ zbudowanego w ten sposób, aby jego wskaźnik Δ^2 był równy średniemu, kwadratowemu przyrostowi

wi natężenia w kolejnych interwałach t_r empirycznego szeregu czasowego natężenia ruchu.

$$RWU = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} /q_i - q_{i+1}/^2} \quad [P/t_r] \quad /2.6/$$

Z matematycznego punktu widzenia jest to średnia kwadratowa [14] różnic liczb pojazdów w kolejnych interwałach t_r szeregu czasowego $\{q/t/\}_{t=1, \dots, n}$.

Względny zakres wahań unormowanych WZWU

- jest to stosunek rozstępu wahań unormowanych do średniej liczby pojazdów w interwale rejestracji t_r .

$$WZWU = \frac{RWU}{\bar{q}} = \frac{\Delta}{\bar{q}} \quad [-] \quad /2.7/$$

Wskaźnik ten określa względną miarę zmienności natężenia z przedziału na przedział i może być stosowany do porównywania wahań natężenia ruchu potoków o różnych natężeniach /różnych wartościach $\bar{q}/$.

Wariancja szeregu czasowego - S_q^2

- jest to średnia kwadratów odchyłeń liczb pojazdów w poszczególnych interwałach t_r danego okresu obserwacji TO od średniej liczby pojazdów \bar{q} w interwale t_r :

$$S_q^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n /q_i - \bar{q}/^2 \quad [P^2/t_r] \quad \text{gdy } n \leq 30 \quad /2.8/$$

lub

$$S_q^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n /q_i - \bar{q}/^2 \quad [P^2/t_r] \quad \text{gdy } n > 30 \quad /2.9/$$

Wariancja jest miarą rozproszenia pojedynczych wyników pomiaru czyli liczb pojazdów w interwałach t_r . Wielkość wariancji zależy od wielkości odchyłeń liczb pojazdów w poszczególnych interwałach od liczby średniej, czyli od kształtu profilu natężenia w rozwa-

żanym okresie obserwacji.

Wskaźnik I

- jest to iloraz wariancji szeregu czasowego $/S_q^2/$ i średniej liczby $/\bar{q}/$ pojazdów przypadających na interwał t_r w okresie obserwacji T_0 :

$$I = \frac{S_q^2}{\bar{q}} \quad /2.10/$$

Korzystając z wzorów 2.1 oraz 2.8 i 2.9 można zapisać:

$$I = \frac{n}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n /q_i - \bar{q}/^2}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad \text{gdy } n \leq 30$$

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n /q_i - \bar{q}/^2}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad \text{gdy } n > 30$$

Wskaźnik ten stosowany jest [30], [31], [55], [56], [62], [63], [67], [68], [82] w formułach na straty czasu, dla ujęcia niezgodności rzeczywistego procesu ruchu, w którym występują wahania z przyjmowanym do jego opisu teoretycznym procesem Poissona.

Odchylenie standardowe szeregu czasowego - S_q

- jest to średnia kwadratowa odchyleni natężeń ruchu w poszczególnych interwałach t_r od natężenia średniego \bar{q} . Odchylenie standardowe S_q jest pierwiastkiem kwadratowym z wariancji S_q^2 :

$$S_q = \sqrt{S_q^2} \quad [P/t_r] \quad /2.11/$$

i podobnie jak wariancja jest miarą rozrzutu liczb pojazdów zarejestrowanych w interwałach t_r podczas okresu T_0 .

Współczynnik zmienności szeregu czasowego - ξ

- jest to stosunek odchylenia standardowego S_q do średniej liczby pojazdów w interwale $t_r / \bar{q}/$:

$$\xi = \frac{s}{\bar{q}} \quad [-] \quad /2.12/$$

Współczynnik zmienności ξ jest bezwymiarową, względną miarą rozproszenia w zbiorze liczb pojazdów tworzących szereg czasowy

$$\{q/t/\}_{t=1, \dots, n}$$

Wskaźnik nierównomierności ruchu w okresie obserwacji - γ_{t_r}
- jest to iloraz natężenia ruchu w okresie obserwacji T_0 i odpowiedniej krotności maksymalnej liczby pojazdów zarejestrowanej w interwale t_r podczas tego okresu $/T_0/$:

$$\gamma_{t_r} = \frac{t_r \sum_{i=1}^n q_i}{T_0 \cdot I_{MAX}} \quad [-] \quad /2.13/$$

Wskaźnik ten jest odpowiednikiem wprowadzonego w HCM-65 współczynnika nierównomierności ruchu w godzinie szczytu.

Relatywna intensywność ruchu w i-tym przedziale t_r - RI_1

- jest to stosunek faktycznej liczby pojazdów w i-tym interwale t_r do średniej liczby $/\bar{q}/$ pojazdów przypadającej na każdy z interwałów t_r w okresie T_0 :

$$RI_1 = \frac{q_i}{\bar{q}} \quad [-] \quad /2.14/$$

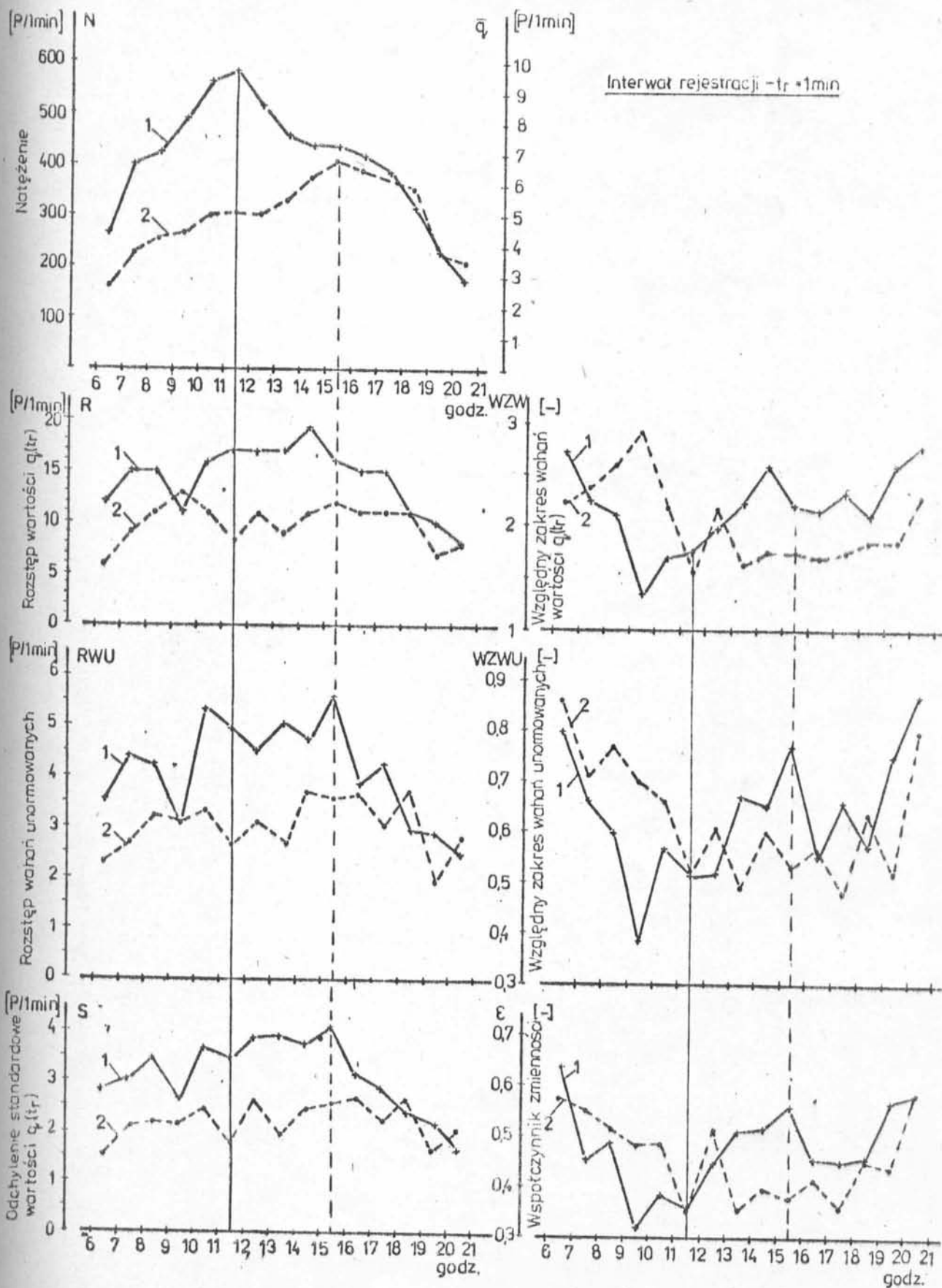
Wskaźnik ten umożliwia obliczanie zrelatywizowanych linii zmienności natężenia w czasie, a przez to bezpośrednio, graficzne porównywanie różnych potoków ruchu.

Wśród wprowadzonych wskaźników szczególnie przydatnymi do oceny porównawczej różnych potoków ruchu są względne miary zmienności ruchu w okresie obserwacji; WZW, WZwu, ξ . Pierwsza z nich, WZW oprócz średniej wartości natężenia w przedziałach t_r , uwzględnia tylko dwie, wybrane spośród wszystkich zarejestrowanych w przedziałach t_r , liczby pojazdów, w związku z czym uzależniona

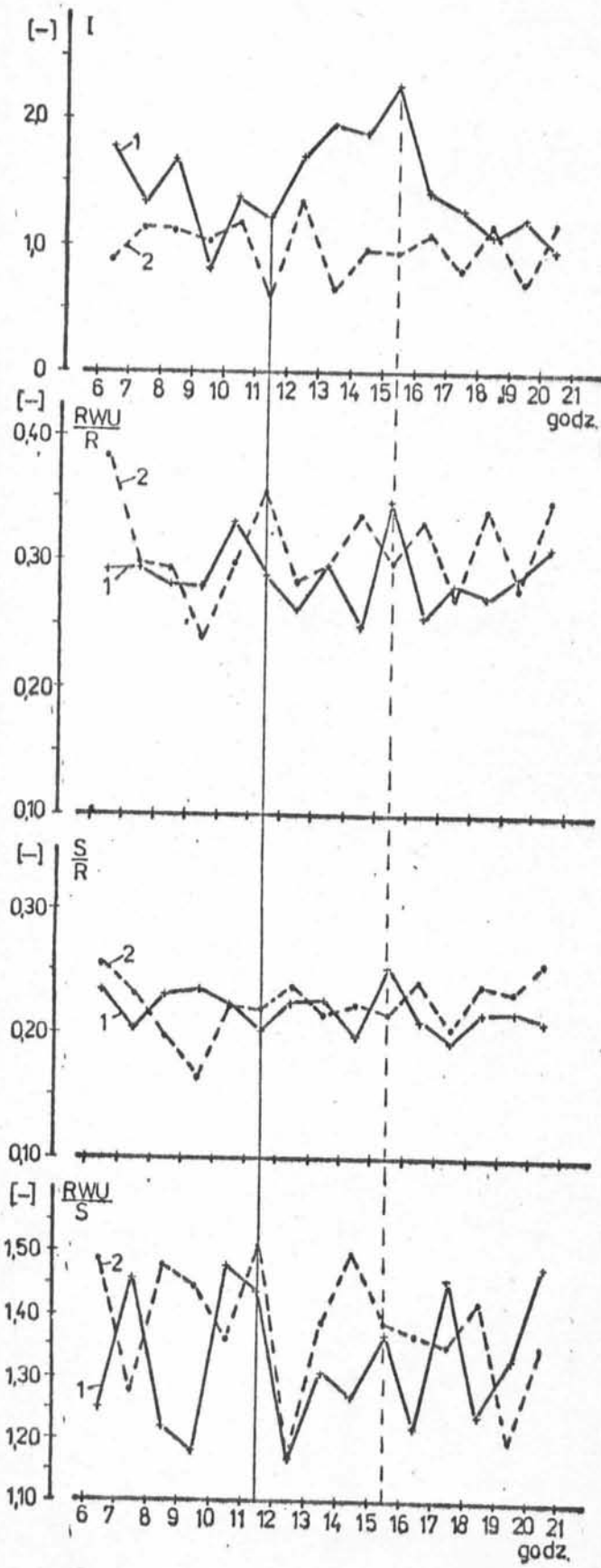
jest od przypadkowych, pojedynczych zmian ruchu. Pozostałe zaś, ujmując cały zbiór liczb pojazdów tworzących szereg czasowy $\{q/t\}_{t=1, \dots, n}$, reagować będą na zmiany ruchu w całym okresie obserwacji T_0 , w efekcie powinny więc dosyć dobrze opisywać charakter wahań ruchu w rozważanym okresie $/T_0/$. Należy zwrócić uwagę, że przy stałym względnym zakresie wahań $/WZW/$ dla różnych potoków ruchu, wskaźnik WZWU teoretycznie może przyjmować różne wartości, podobnie jak i przy stałym współczynniku zmienności $/\epsilon/$. Z definicji wskaźniki te są więc niezależne.

Wskaźnik nierównomierności ruchu γ_{t_r} w przypadku bardzo krótkich interwałów rejestracji t_r /np. 1 min./ uwypuklał będzie w znaczny sposób pojedynczą, maksymalną wartość natężenia ruchu w interwale t_r podczas okresu obserwacji /dla $T_0 = 60$ min. i $t_r = 1$ min. wartość ta będzie mnożona przez 60/. Wskaźnik ten jest więc sens rozważać przy interwałach t_r nie mniejszych niż 5 min.

Z punktu widzenia charakterystyki ruchu na wlocie skrzyżowania interesujące są nie tylko wartości wskaźników zmienności ruchu w okresach szczytowych, ale także w przekroju całego dnia. Policzone - na bazie 15 godzinnych pomiarów przeprowadzonych na dwóch skrzyżowaniach z interwałem rejestracji $t_r = 1$ min. - niektóre wskaźniki zmienności ruchu, w okresach obserwacji, odpowiadających poszczególnym godzinom dnia, pokazano na rys. 2.3. Pełny wyjściowy zapis w czasie bezpośrednich danych z pomiaru na jednym ze skrzyżowań zamieszczono w aneksie na rys. 2.1.a. Jak widać /rys. 2.3/ wartości wskaźników wahań ruchu, i to zarówno bezwzględnych jak i względnych, zmieniają się w wyraźny sposób w ciągu dnia. Wskaźniki takie jak R , RWU , S w godzinach o większych natężeniach przyjmują większe wartości, zaś względne miary wahań WZW , $WZWU$, ϵ - mniejsze, lecz maksymalnym natężeniom /godzina szczytu/ nie odpowiadają ekstremalne wartości tych wskaźników. Występowanie



rys. 2.3. Zmienność wskaźników charakteryzujących wahania natężenia ruchu w czasie



Rys. 2.3 - od.

większych wartości wskaźników RWU i S w godzinach sąsiadujących z godziną szczytu wskazuje, że ruch w tych godzinach, o natężeniu niewiele różniącym się od szczytowego podlega większym wahaniom niż w godzinie o maksymalnym natężeniu. Przemawia to za potrzebą brania pod uwagę przy projektowaniu czy ocenie sprawności sygnalizacji, ruchu nie tylko odnoszącego się do zegarowej godziny o maksymalnym natężeniu ale do okresu dłuższego /np. 2 + 3 godz./.

Wartości, jakie przyjmuje wskaźnik I sugerują, że na wlocie skrzyżowania Wrocławska - Pod Fortem proces ruchu jest bardzo zbliżony do procesu Poissona /dla którego $I = 1,0$ /.

Stosunki niektórych wskaźników jak; RWU/R, S/R, RWU/S, rozważane w funkcji czasu, przyjmują wartości oscylujące wokół pewnej stałej, co świadczy o istniejących w rzeczywistości zależnościach między nimi, przy czym wykres S/R wskazuje na najsilniejszą zależność między tymi wskaźnikami /S i R/ charakteryzującymi wahania ruchu w różnych godzinach /o różnych natężeniach N/.

2.3.3. Przetwarzanie danych na EMC

Z uwagi na konieczność przeprowadzenia dużej liczby obliczeń niezbędnych do wyznaczenia wskaźników charakteryzujących zmienność ruchu w każdym okresie obserwacji, opracowano program obliczeniowy EMPIR na maszynę cyfrową. Program ten, dla wczytanych liczb pojazdów zarejestrowanych w interwałach t_r okresu obserwacji T_0 , sporządza wykres natężenia ruchu w czasie /którego jednostką jest interwał rejestracji t_r /.

Umożliwia on ponadto obliczanie wszystkich, wyszczególnionych w rozdziale 2.3.2 wskaźników charakteryzujących wahania ruchu rejestrowanego w przedzia-

łach t_r , w odniesieniu do całego okresu obserwacji T_0 , oraz poszczególnych godzin wewnątrz tego okresu. Obliczane są również natężenia godzinowe oraz relatywne intensywności ruchu w poszczególnych interwałach rejestracji. Cała taka sekwencja obliczeń może być kilkakrotnie powtarzana dla innych interwałów czasowych, stanowiących wielokrotność podstawowego interwału rejestracji t_r . Program EMPIR napisany został w języku Fortran na EMC CYBER-72. Składa się z programu głównego i podprogramu CHAWA, umożliwiającego obliczanie wskaźników charakteryzujących wahania ruchu. Czas obliczeń centralnego procesora zmienia się, w zależności od natężenia ruchu, długości okresu obserwacji oraz interwału rejestracji i waha się przeciętnie w granicach $/0,5 + 1,0/$ s dla jednej sekwencji obliczeń, odpowiadającej interwałowi rejestracji lub interwałowi stanowiącemu jego wielokrotność. Program został zbudowany z myślą o współpracy w przyszłości z automatyczną aparaturą rejestrującą, co będzie możliwe po dostosowaniu programu do wezytywania danych z innego nośnika informacji niż karty perforowane. Wydruk podprogramu CHAWA zamieszczono w aneksie na rys. 2.2.

2.3.4. Analiza zmienności i współzależności wskaźników wahań ruchu

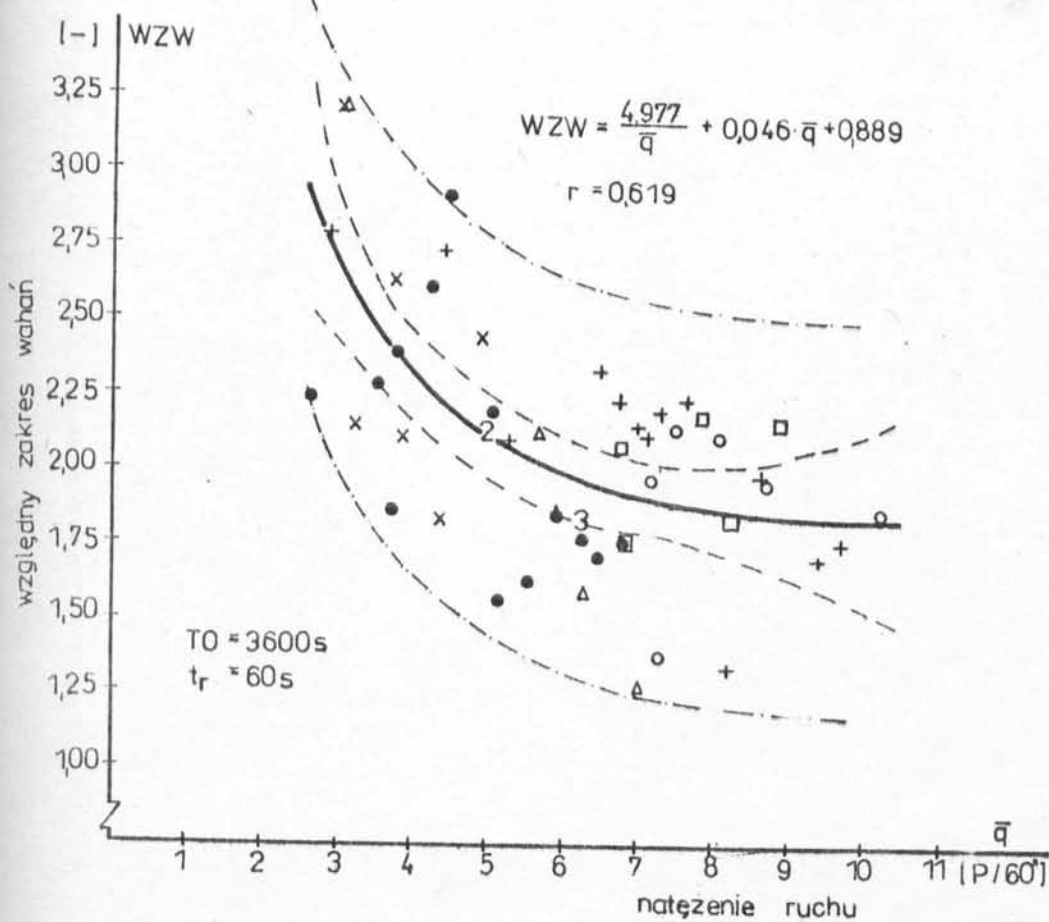
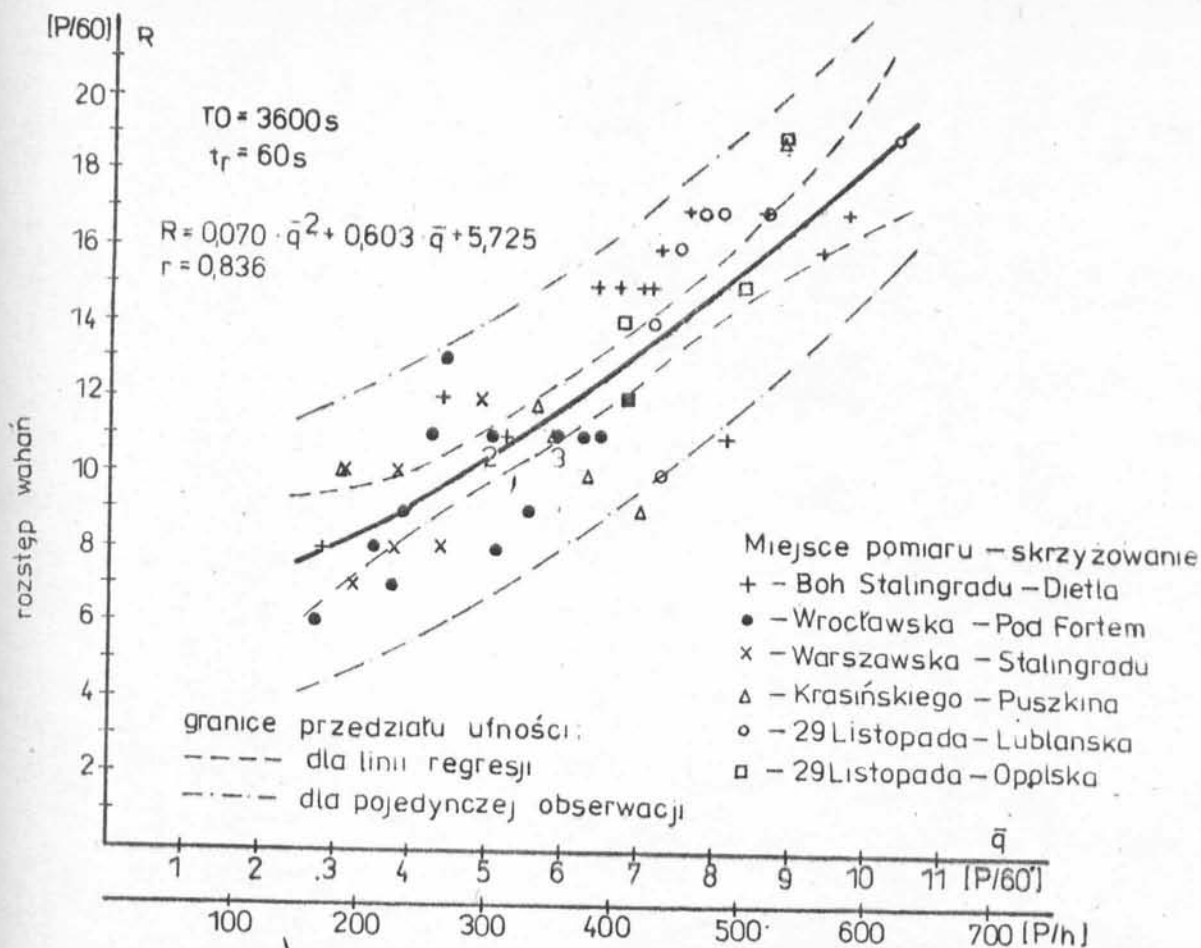
Przy badaniach zmienności natężenia ruchu ze względu na kilka cech, za jakie możemy uznać wprowadzone wskaźniki, bardzo ważnym zagadnieniem jest określenie współzależności czyli korelacji, jakie występują między tymi cechami. Ustalenie równań regresji w sytuacji, gdy między badanymi parami cech istnieje silna korelacja, umożliwia bowiem przewidywanie zmian jednej z cech przy znajomości zachowania się drugiej, a tym samym redukcję liczby wskaźników niezbędnych dla uzyskania pełnego zakresu informacji o zmienności ruchu. Pamiętać przy tym należy, że sama korelacja wykazuje jedy-

nie matematyczny stosunek między zmiennymi, a nie oznacza, iż zmiany jednej cechy wywołują zmiany drugiej. Wskaźniki charakteryzujące zmienność natężenia ruchu, jak wynika z rys. 2.3, przyjmują różne wartości w poszczególnych godzinach dnia. Wskazuje to, że w ciągu dnia zmienia się nie tylko natężenie \bar{q} ruchu obserwowanego w poszczególnych godzinach, ale także jego charakter.

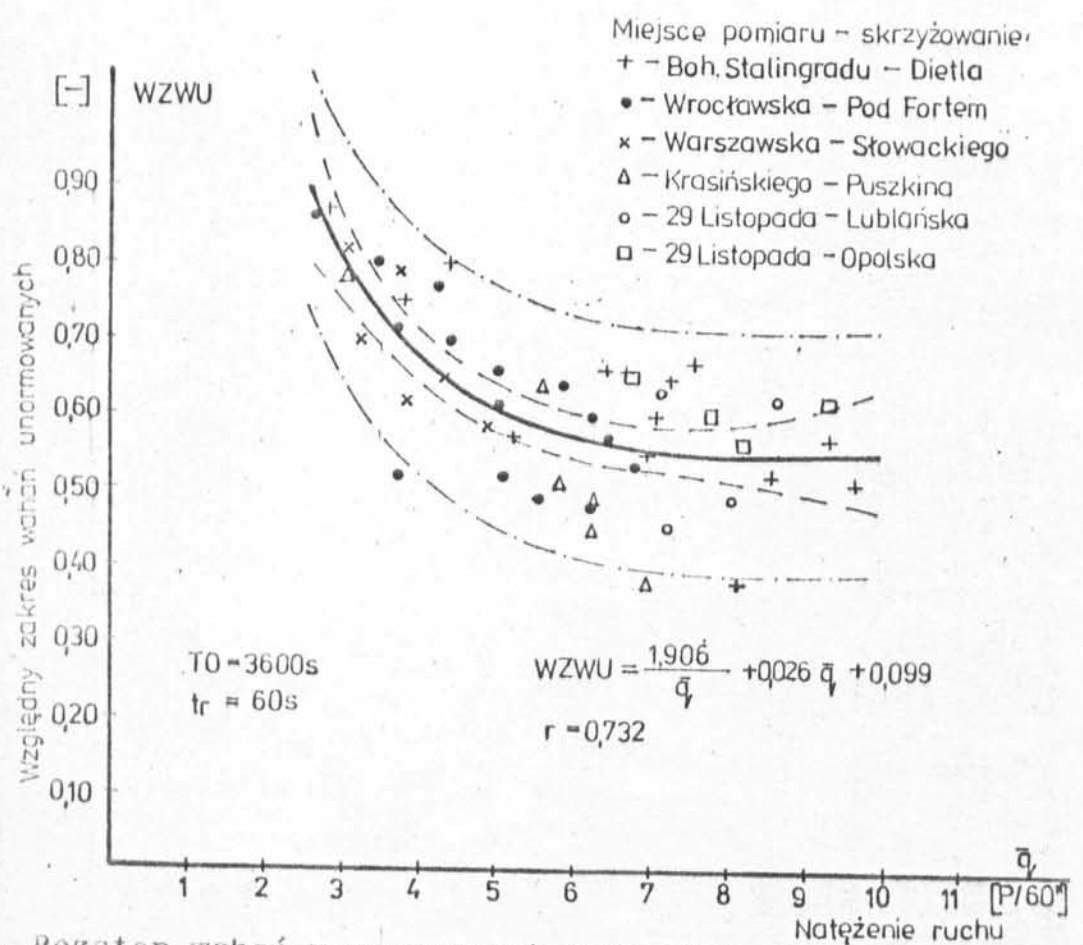
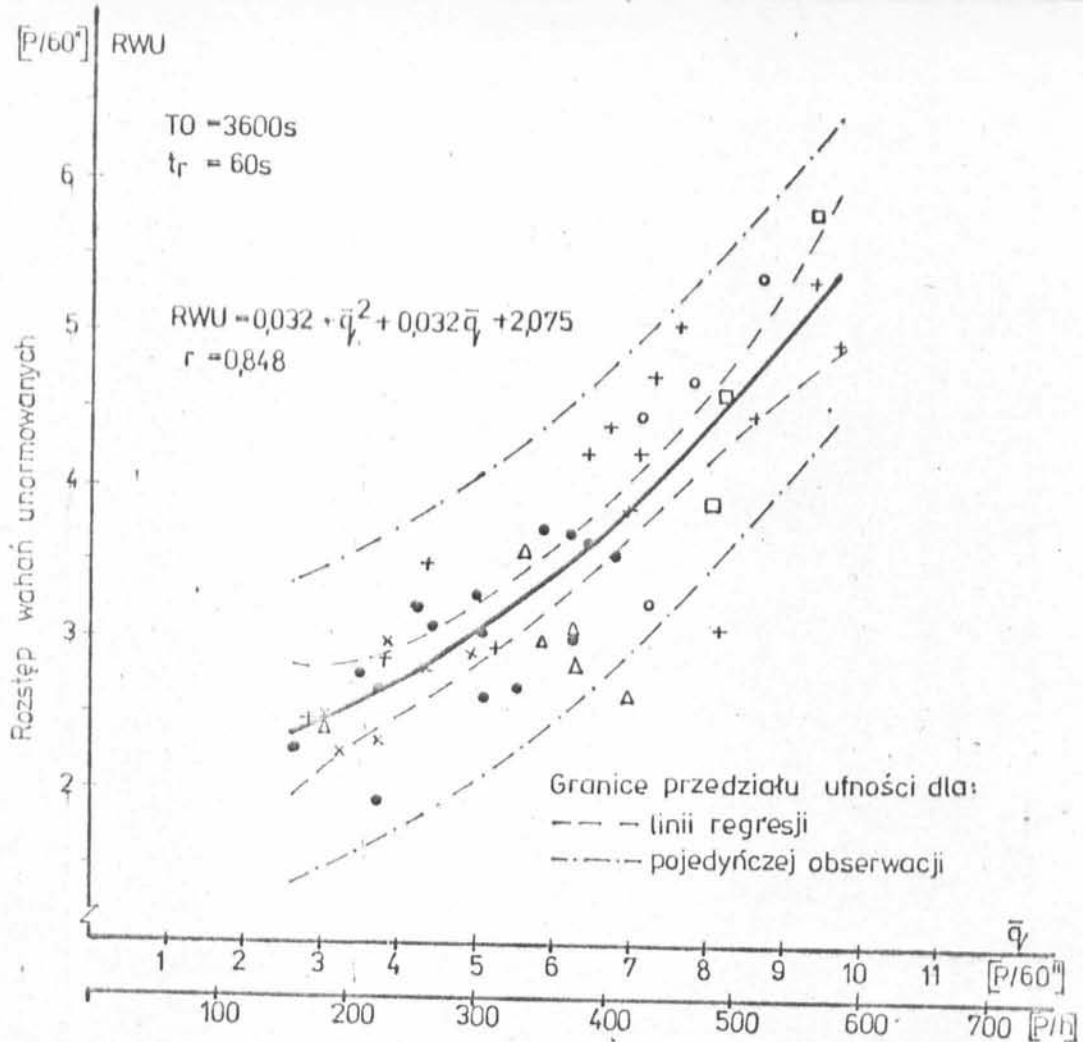
W tej sytuacji nasuwa się pytanie, czy między wprowadzonymi wskaźnikami, pozwalającymi na charakteryzowanie wahań ruchu, a jego natężeniem \bar{q} istnieją jakieś związki. Aby dać odpowiedź na to pytanie zastosowano statystyczną analizę korelacji i regresji.

Wynikowe funkcje /ustalonych wcześniej kształtów/ wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów dla wyznaczonych z próby wartości badanych cech statystycznych /regresja drugiego rodzaju [26], [28]/. Postać funkcji regresji dobierano metodą prób starając się w rezultacie uzyskać taką, dla której wartość statystyki χ^2 jest najmniejsza [9].

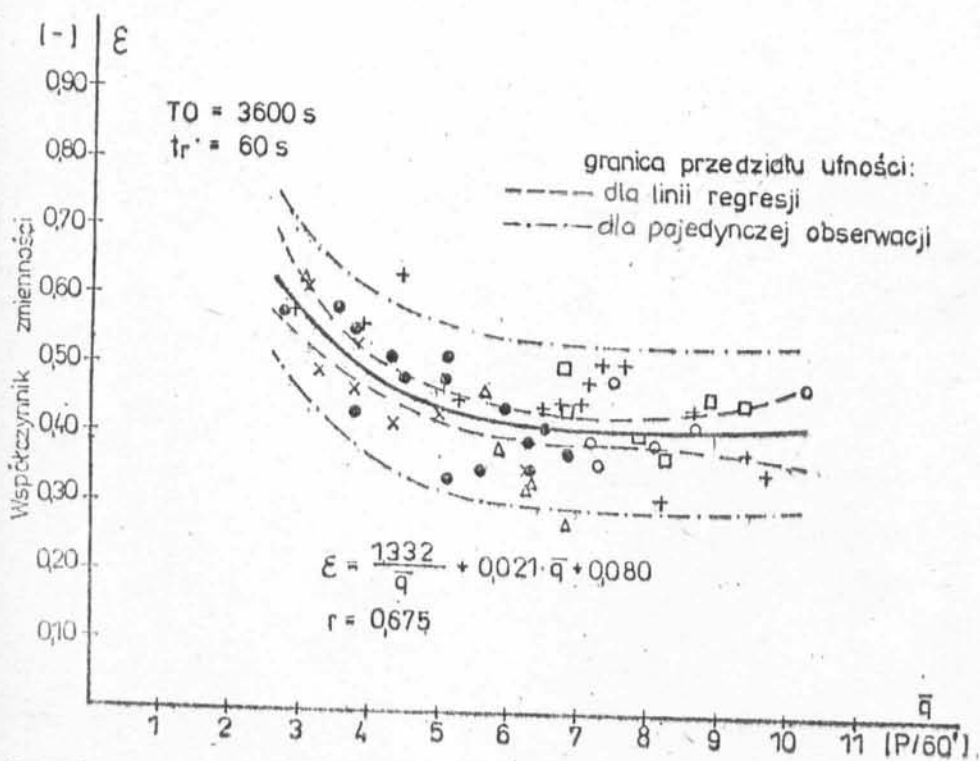
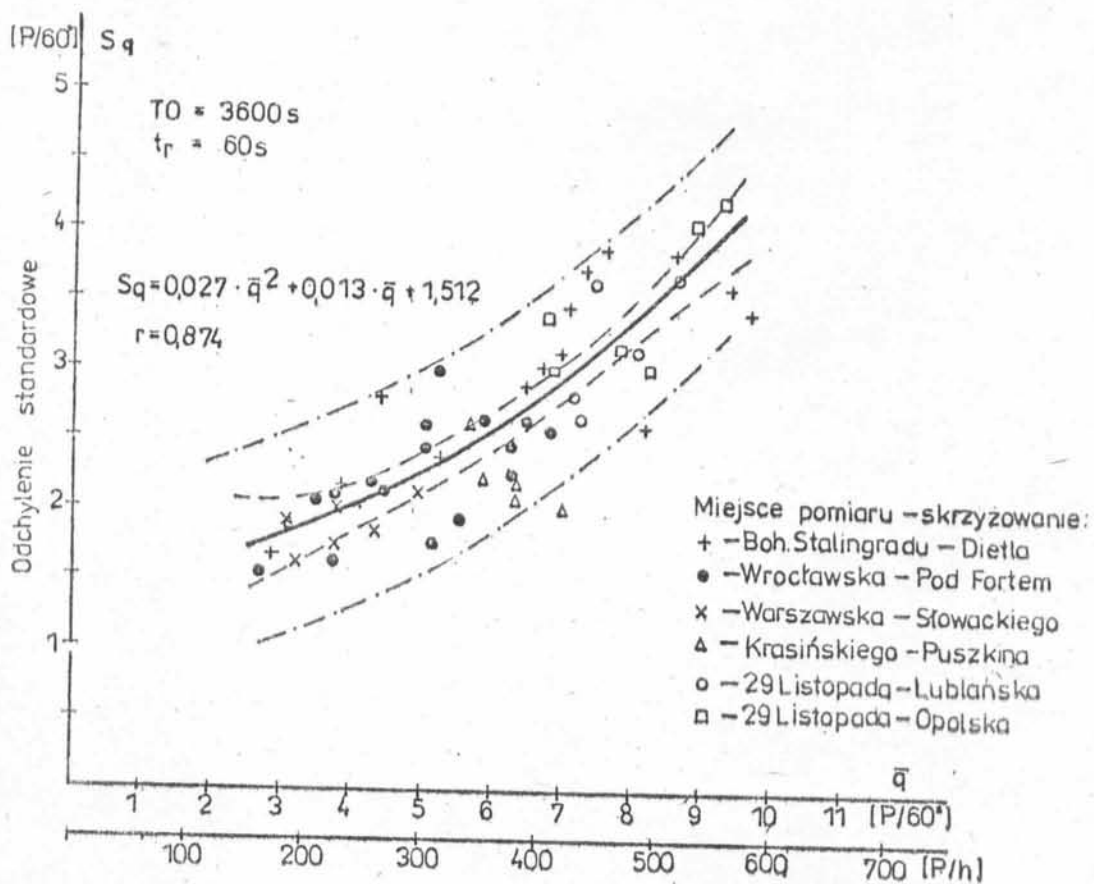
Podstawowe wskaźniki charakteryzujące wahania ruchu rejestrowanego w interwałach $t_r = 1$ min. w funkcji średniej liczby pojazdów przypadającej na interwał rejestracji przedstawiono na rys. 2.4 + 2.6. Wartości rozpatrywanych wskaźników charakteryzują ruch w okresach godzinnych $T_0 = 60$ min./ i zostały obliczone na podstawie 60-cio elementowych zestawów danych wyjściowych /liczb pojazdów w interwałach 1 minutowych/ uzyskanych w pomiarach na 6-ciu skrzyżowaniach. Przedstawione wykresy między innymi pokazują zakres wartości, jakie przyjmują poszczególne wskaźniki charakteryzujące zmienność ruchu w godzinnych okresach obserwacji, na różnych skrzyżowaniach, oraz przy różnych wielkościach natężenia. Dostyć duży zakres wartości poszczególnych wskaźników świadczy o znacznym zróżnicowaniu charakteru wahań ruchu jakie zachodzą podczas godzinnych okresów.



Rys. 2.4. Rozstęp oraz względny zakres wahań w funkcji średniego natężenia ruchu \bar{q} przy interwale rejestracji $t_r = 1$ min



rys. 2.5. Rozstęp wahań unormowanych oraz względny zakres wahań unormowanych w funkcji średniego natężenia ruchu \bar{q} przy interwale rejestracji $t_r = 1$ min.



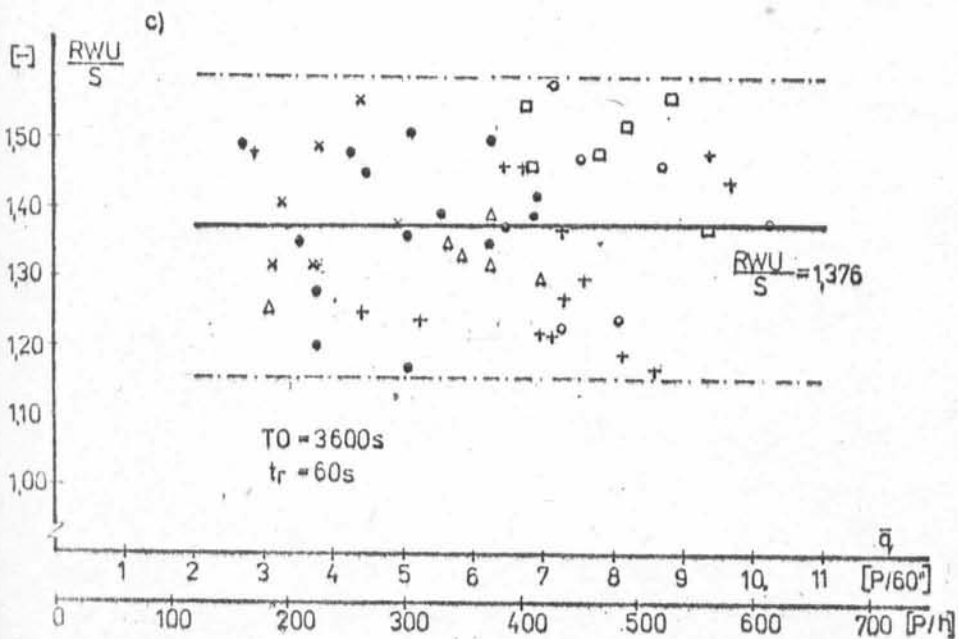
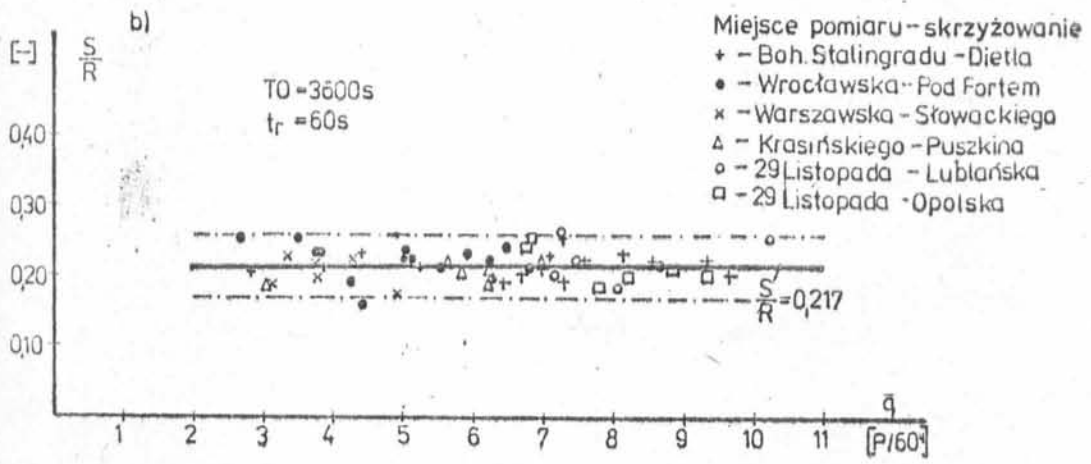
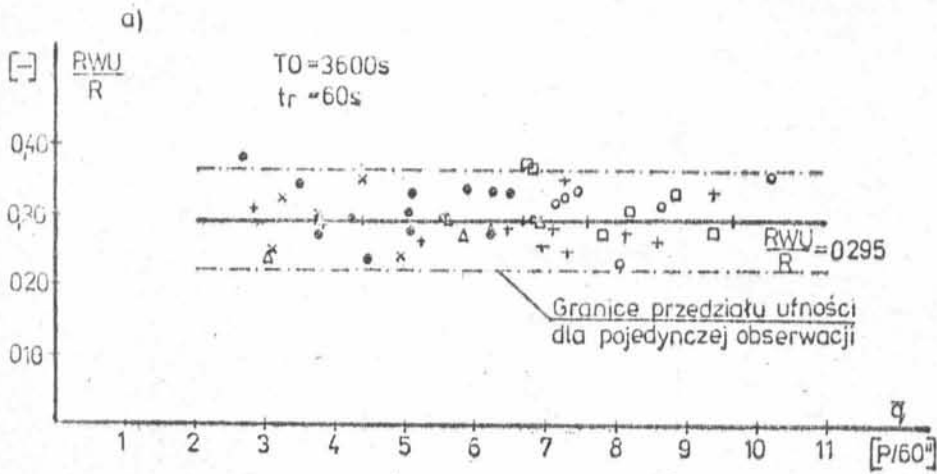
Rys. 2, 6. Odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności w funkcji średniego natężenia \bar{q} przy interwale rejestracji $t_r = 1 \text{ min.}$

Wskaźniki $R/r = 0,836/$, $RWU/r = 0,848/$ oraz $S_q/r = 0,874/$, wg klasyfikacji podanej w [83], są silnie skorelowane $/0,8 < |r| \leq 0,9/$ ze średnią liczbą pojazdów przejeżdżających dany przekrój w czasie 1 min. Względne miary zmienności ruchu w okresach obserwacji $/WZW, WZU, \epsilon/$ wykazują zaś mierną $/0,5 < |r| \leq 0,7/$ lub średnią $/0,7 < |r| \leq 0,8/$ zależność korelacyjną ze średnim natężeniem ruchu \bar{q} . Wyznaczone równania linii regresji przedstawiono na wykresach. Dodatkowo na wykresach zaznaczono przedziały ufności dla linii regresji oraz dla pojedynczych obserwacji ustalone dla poziomu ufności $1 - \alpha = 0,95$.

Analizowane już uprzednio /p. 2.3.2/ stosunki wskaźników RWU/R , S/R i RWU/S przedstawiono tym razem w funkcji średniego natężenia ruchu \bar{q} /rys. 2.7/. Wykresy potwierdzają niezależność rozważanych stosunków od średniego natężenia \bar{q} , wskazując równocześnie na silne zależności między wskaźnikami tworzącymi brane pod uwagę stosunki $/RWU \cong 0,295 \cdot R, S \cong 0,217 \cdot R, RWU \cong 1,376 \cdot S/$

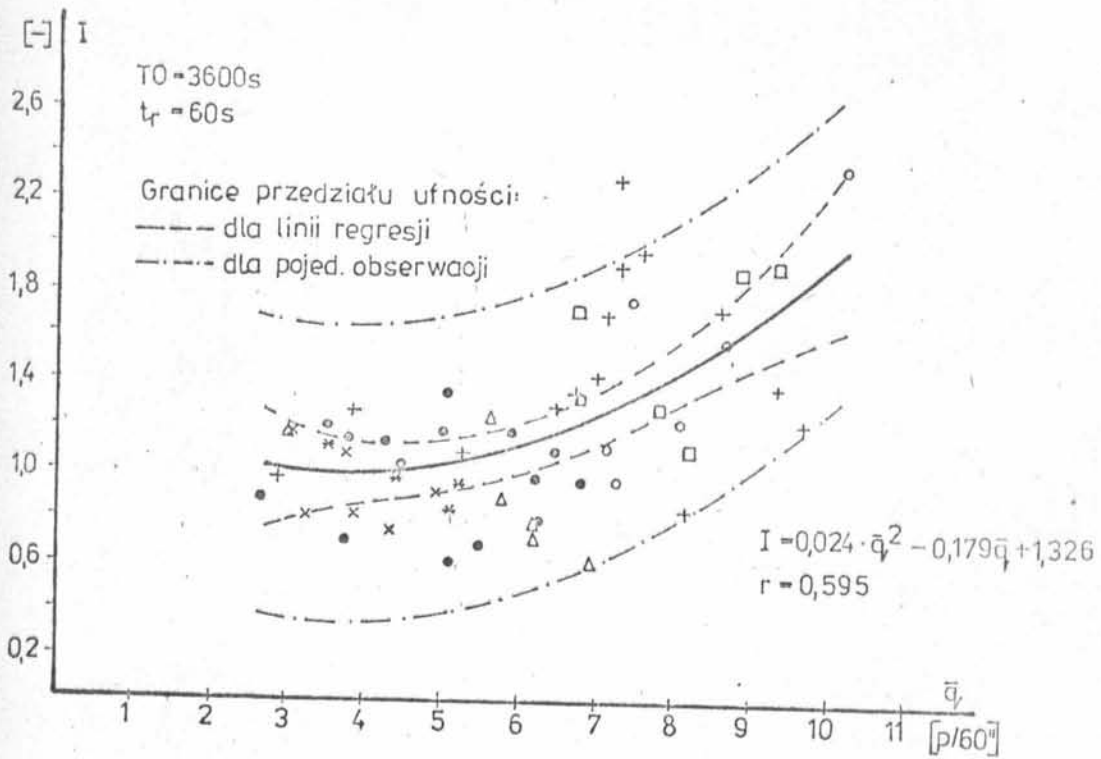
Wskaźnik I /rys. 2.8/ wykazuje mierną zależność $/r = 0,595/$ od średniego natężenia ruchu \bar{q} , zaś jego wartości obliczone dla pomierzonych potoków ruchu mieszczą się w granicach $/0,6 + 2,3/$. Stosując interwał $t_r = 30$ s, Sosin [67] w trakcie badań zarejestrował potoki ruchu o współczynniku I przyjmującym wartości od 0,27 do 2,6, co w przybliżeniu odpowiada w pierwszym przypadku potokom ze stałymi odstępami między pojazdami, a w drugim z pogrupowanymi pojazdami w kolumny, których częstość występowania, jak można wnioskować z rys. 2.8, wzrasta wraz ze zwiększaniem się natężenia ruchu.

Korelację między względnym zakresem wahań WZW i współczynnikiem zmienności ϵ pokazano na rys. 2.9. Związek liniowy między tymi względnymi miarami zmienności ruchu w okresie obserwacji jest silny $/r = 0,847/$, podobnie jak i między odpowiadającymi im

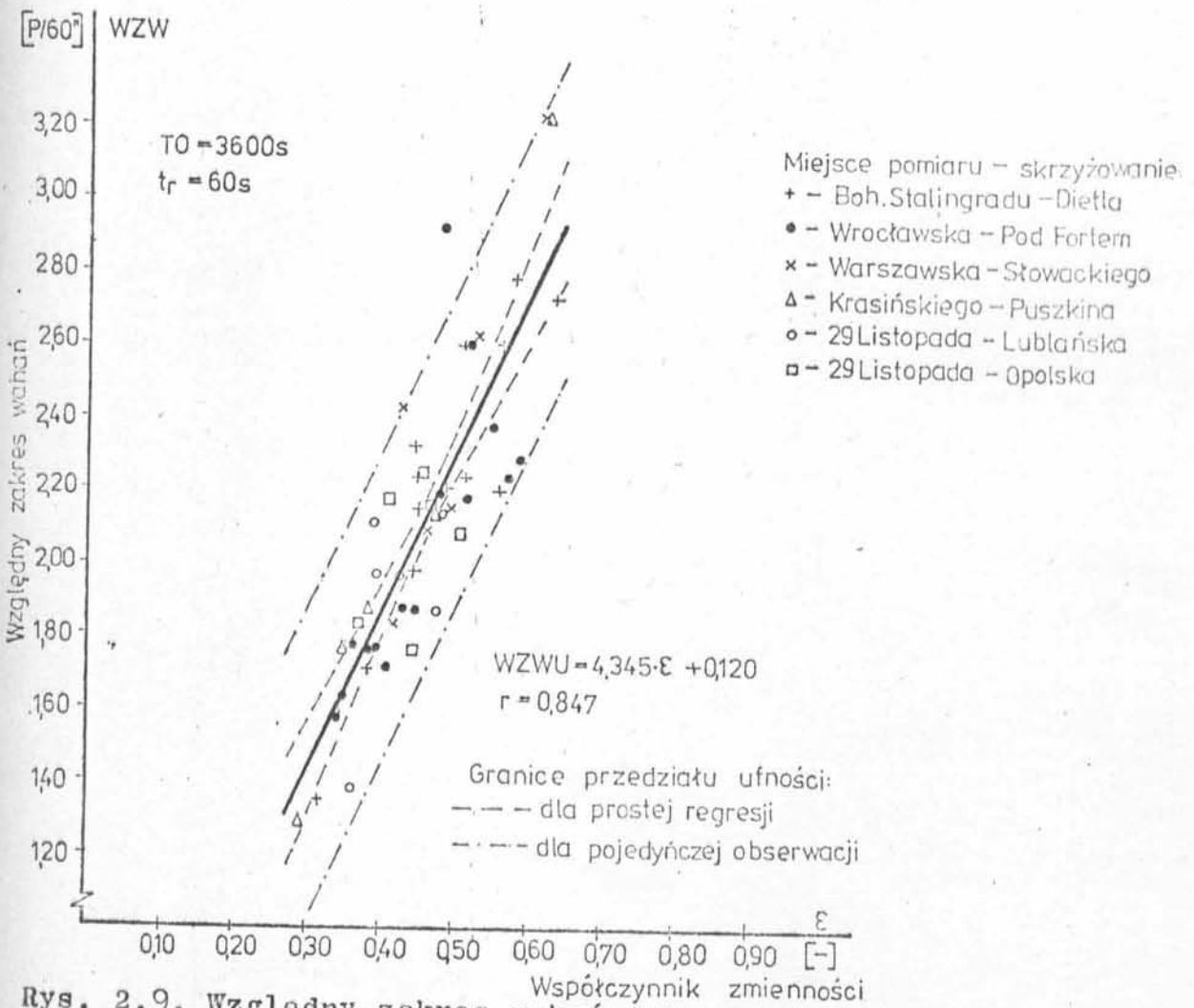


Rys. 2.7. Stosunki wskaźników charakteryzujących wahania ruchu w funkcji średniego natężenia;

- a - stosunek rozstępu wahań unormowanych i rozstępu wahań rzeczywistych,
- b - stosunek odchylenia standardowego i rozstępu wahań rzeczywistych,
- c - stosunek rozstępu wahań unormowanych i odchylenia standardowego wahań rzeczywistych



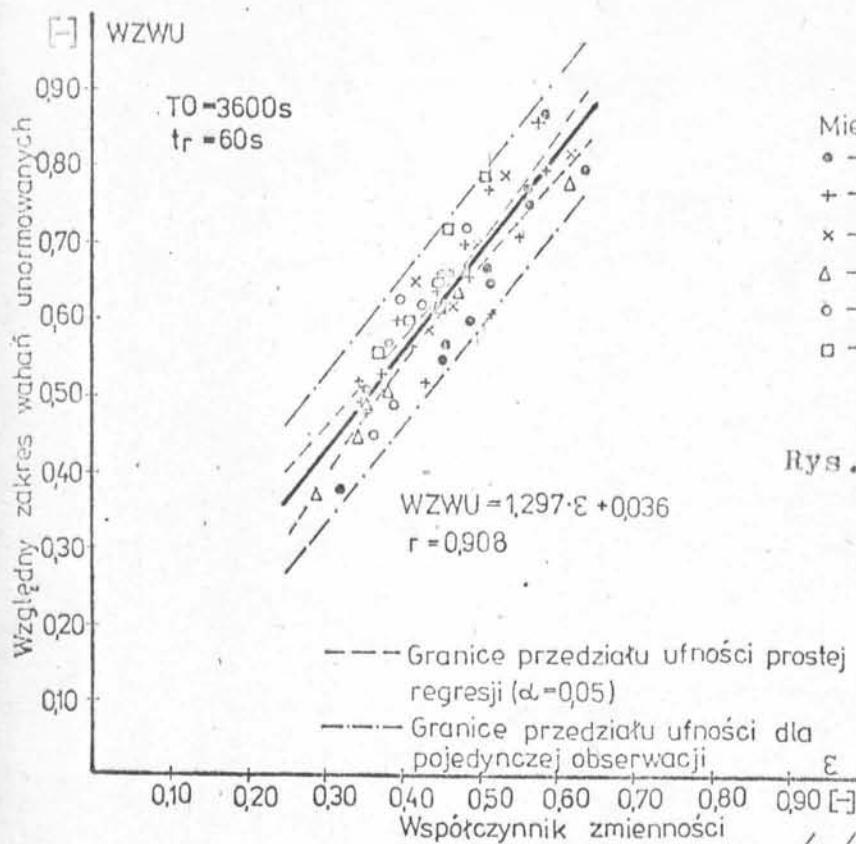
Rys. 2.8. Współczynnik I w funkcji średniego natężenia ruchu



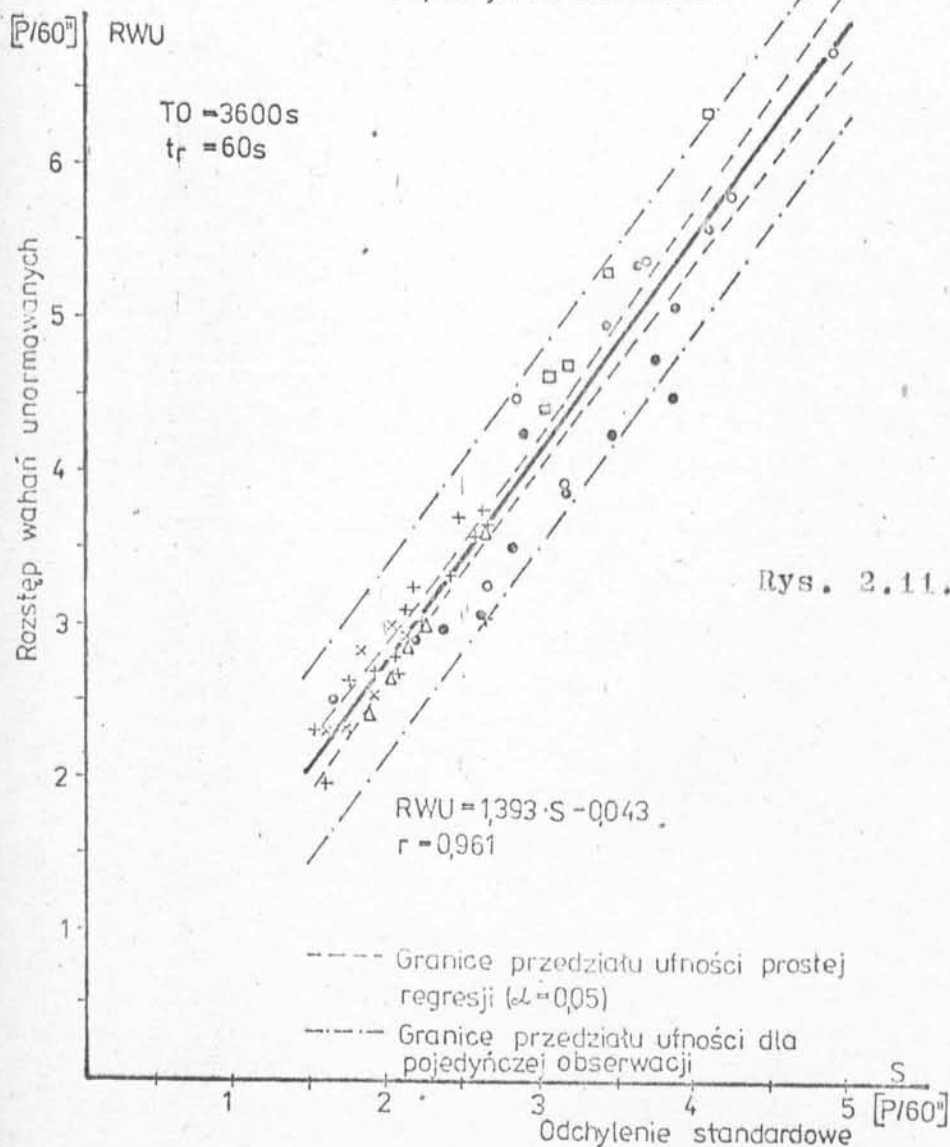
Rys. 2.9. Względny zakres wahań jako funkcja współczynnika zmienności

wskaźnikami R i S /rys. 2.7.b/ charakteryzującymi wahania ruchu w wartościach bezwzględnych. Analogicznie związek względnego zakresu wahań unormowanych WZWU i współczynnika zmienności ξ /rys. 2.10/ opisać można równaniem liniowym. Również w odniesieniu do odpowiednich względem WZW i ξ bezwzględnych mierników RWU i S /rys. 2.11/ zachodzi zależność liniowa. W obu tych przypadkach w zależności są bardzo silne /współczynniki korelacji odpowiednio $r = 0,908$ i $0,961$ /. Najistotniejsze z przedstawionych dotychczas zależności w przypadku interwału rejestracji $t_R = 5$ min. pokazano w aneksie na rys. 2.3 + 2.8.

Wskaźnik nierównomierności ruchu γ_{t_R} , w zależności od przyjętego interwału rejestracji, przyjmował w okresie obserwacji $T_0 = 60$ min. dla badanych potoków wartości w zakresie $0,47 + 0,87$ przy $t_R = 5$ min., $0,55 + 0,95$ przy $t_R = 10$ min. /aneks rys. 2.9/, oraz $0,65 + 0,96$ przy $t_R = 15$ min. /rys. 2.12/. Dla większych natężeń ruchu rozrzut wartości wskaźnika γ , szczególnie przy $t_R = 15$ min. /rys. 2.12/, staje się mniejszy, przy czym wartości wskaźnika γ są przeważnie większe aniżeli przy niższych natężeniach. Świadczy to, biorąc pod uwagę definicję tego wskaźnika, o bardziej równomiernym ruchu w godzinach o wyższych natężeniach. Należy jednak pamiętać, że jest to względna miara nierównomierności ruchu a relacja między bezwzględnymi zmianami natężenia w okresie obserwacji a jego średnią wartością jest zazwyczaj odwrotna. Duży rozrzut punktów na wykresach świadczy o słabej zależności wskaźnika γ_{t_R} od średniej liczby pojazdów w interwale t_R . Potwierdziła to analiza korelacji przy zastosowaniu funkcji regresji w postaci logarytmicznej. Okazuje się natomiast, że wskaźnik nierównomierności ruchu γ_{t_R} w okresie obserwacji posiada dosyć ścisły związek ze współczynnikiem zmienności ξ , co pokazano na rys. 2.13, opisując zależność równaniem wykładniczym.



Rys. 2.10. Względny zakres wahań unormowanych jako funkcja współczynnika zmienności



Rys. 2.11. Rozstęp wahań unormowanych jako funkcja odchylenia standardowego

Zbiorecze zestawienie rezultatów analizy regresji i korelacji wraz z wynikami testów istotności korelacji przedstawiono w aneksie w tabelicy 2.2.

Wyznaczone zależności, zaproponowanych do opisu wahań ruchu wskaźników od natężenia oraz wzajemne zależności między nimi, dają podstawę do dalszej analizy ich praktycznej przydatności oraz wyboru reprezentatywnych wskaźników dla charakterystyki wahań ruchu.

2.3.5. Reprezentatywne charakterystyki wahań natężenia ruchu

Przeprowadzona w poprzednim punkcie analiza zmienności i współzależności wskaźników wahań ruchu w okresach obserwacji wykazała, że wartości poszczególnych wskaźników, i to zarówno bezwzględnych jak i względnych, zmieniają się^W doś^W znacznym zakresie, świadcząc o zróżnicowanym wyraźnie charakterze potoków ruchu. Znalezione zależności regresyjne między poszczególnymi wskaźnikami, stanowiącymi miary zmienności ruchu w okresach jego obserwacji, pozwalają, w przypadku gdy korelacja jest silna lub bardzo silna $/0,9 < |r| \leq 1,0/$, zrezygnować z niektórych wskaźników, pozostawiając jednak możliwość ich określania na podstawie pozostałych.

Rozstęp szeregu czasowego $\{q/t\}_{t=1, \dots, n}$, jaki tworzą liczby pojazdów zarejestrowane w kolejnych interwałach t_p , jest wskaźnikiem, który w bardzo prosty sposób można wyznaczyć dysponując szeregiem czasowym natężenia ruchu. Wskaźnik ten jednak nie jest czułą miarą zmienności, szczególnie gdy ma się do czynienia z licznym $/n > 10/$ zbiorem danych [79], a takim właśnie zbiorem jest szereg czasowy w przypadku krótkich $/np. 1 \text{ minutowych}/$ interwałów rejestracji t_p . Z drugiej jednak strony wskaźnik R, a praktycznie jego względna forma $/WZW/$ stwarza możliwość szybkiego porównywania wyników pomiarów różnych potoków, zwłaszcza gdy interwał rejestracji jest nie mniejszy niż 5 minut.

Rozstęp wahań unormowanych RWU, jakkolwiek istotny z uwagi na możliwość określania przeciętnej zmiany natężenia ruchu q_i z przedziału na przedział, która niewątpliwie ma wpływ na funkcjonowanie skrzyżowania z sygnalizacją, nie ujmuje odchylenia liczb pojazdów w poszczególnych interwałach t_r od liczby średniej \bar{q} . Możliwość taką posiada natomiast odchylenie standardowe S_q , które jak wskazano w [79] jest miarą zmienności najbardziej odpowiednią do analizy statystycznej. Biorąc pod uwagę potrzebę porównywania różnych potoków i fakt, że odchylenie standardowe posiada wymiar taki sam jak dane wyjściowe, wygodniej posługiwać się jest opisem bezwymiarowym, jakim jest, wynikający ze stosunku odchylenia standardowego S_q i średniej liczby pojazdów \bar{q} w interwale t_r , współczynnik zmienności \mathcal{E} . Kolejny wskaźnik - I, posiadający podobny charakter do współczynnika zmienności \mathcal{E} , jest miarą względną, nie jest jednakże wielkością bezwymiarową.

W wyniku przeprowadzonej w p. 2.3.3 analizy oraz wyżej przedstawionego rozumowania wytypowano jako reprezentatywne wskaźniki charakteryzujące wielkość natężenia ruchu oraz jego zmienność w okresie obserwacji; średnią liczbę pojazdów w interwale t_r $/\bar{q}/$ oraz współczynnik zmienności $/\mathcal{E}/$ szeregu czasowego $\{q/t/\}_{t=1, \dots, n}$. Wielkości te, podane równoległe dla rozważanego potoku, w dostatecznym stopniu będą opisywać jego charakter i będą praktycznie przydatne m.in. dla oceny dokładności odwzorowania wahań ruchu w modelu symulacyjnym. W sytuacji, gdyby z jakichś powodów zachodziła konieczność określenia innych wskaźników, to w przybliżony sposób szacować je można na bazie dwóch podstawowych wskaźników tj. \bar{q} i \mathcal{E} , korzystając z przedstawionych na wykresach równań regresji lub w sposób dokładny korzystając z programu EMPIR.

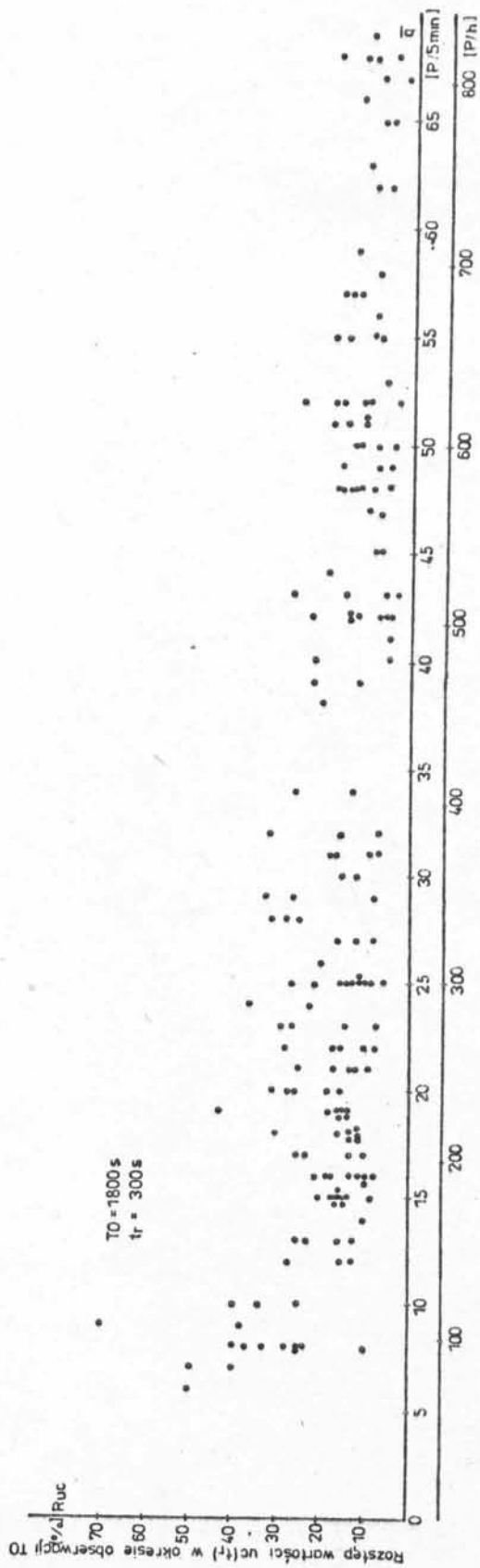
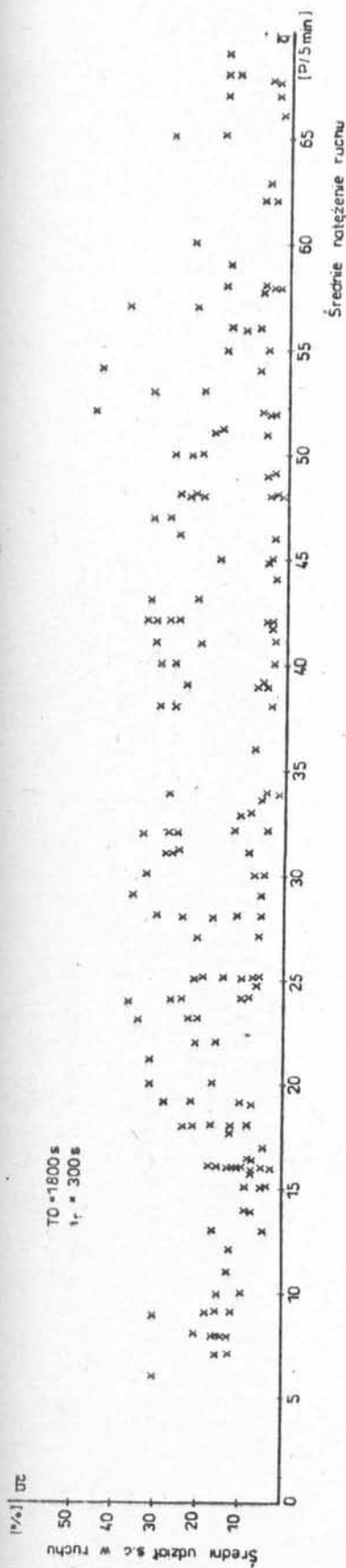
2.3.6. Zmienność struktury rodzajowej w czasie

Struktura rodzajowa ruchu, podobnie jak jego natężenie, ulega zmianom podczas okresu obserwacji. Obraz zmian udziału samochodów ciężarowych w potoku ruchu przy dwóch interwałach rejestracji $t_r = 1$ i 5 min./, uzyskany z $\frac{1}{15}$ godzinowego pomiaru na wlocie skrzyżowania Wrocławska - Pod Fortem, przedstawiono w aneksie na rys. 2.1.b. Wahania wyrażone w procentach udziału samochodów ciężarowych w ruchu, w przypadku interwału rejestracji $t_r = 1$ min. są bardzo duże $/0 + 100\%/$, szczególnie w zakresie małych natężeń. Występują bowiem w rzeczywistości przedziały czasu, w których przejechały wyłącznie samochody osobowe, jak również przedziały w których wszystkie zarejestrowane pojazdy należały do grupy ciężarowych. Wizualna ocena wykresów sporządzonych przy interwale rejestracji $t_r = 1$ min. wskazała, że ocena charakteru zmian udziału samochodów ciężarowych, a przede wszystkim ich zależności od czasu, z uwagi na znaczne "wahania wykresu" jest bardzo trudna. Niewątpliwie znaczny wpływ na taki obraz ma wielkość interwałów, w których udział samochodów ciężarowych w ruchu został określony. Zdecydowano się więc do dalszych rozważań brać pod uwagę interwały $t_r = 5$ min. oraz ruch z okresów szczytowych. Analizę wahań struktury rodzajowej przeprowadzono sporządzając jej zapisy czasowe na bazie pomiarów zrealizowanych na około 30 poligonach pomiarowych w 3-godzinnych okresach rannych i popołudniowych szczytów. Celem podjętej analizy była próba otrzymania odpowiedzi na następujące pytania:

- czy daje się zauważyć jakieś typowe, charakterystyczne przebiegi zmienności udziału samochodów ciężarowych $uc/t/$ w okresach ruchu szczytowego?
- czy istnieje ewentualny związek między zmiennością $uc/t/$ i zmiennością natężenia ruchu $q/t/$?

- w jakim zakresie zmienia się średni udział samochodów ciężarowych \bar{u}_c w interwałach t_r podczas okresów obserwacji w zależności od natężenia ruchu?
- jaki jest zakres wahań udziału samochodów ciężarowych $u_c/t_r/$ podczas okresu ruchu szczytowego?

W odniesieniu do dwóch pierwszych pytań otrzymano odpowiedź negatywną. Stwierdzono bowiem brak typowych form zmienności udziału samochodów ciężarowych $u_c/t/$ w okresach ruchu szczytowego, jak również brak było podstaw do określenia wyraźnego związku między liniami zmienności $u_c/t/$ i $q/t/$. Na pozostałe dwa pytania odpowiedź dają sporządzone wykresy; średniego udziału samochodów ciężarowych \bar{u}_c oraz rozstępu R_{uc} wartości $u_c/t_r/$ w okresie obserwacji $T_0 = 30$ min., w funkcji średniej liczby pojazdów \bar{q} przypadającej na interwał t_r . Zależności te przedstawiono na rys. 2.14. Generalnie można stwierdzić, że średni udział samochodów ciężarowych w półgodzinnych okresach ruchu szczytowego zmienia się w granicach $\pm 44\%$ i nie wykazuje wyraźnej zależności od natężenia ruchu. Rozstęp wartości $u_c/t_r/$ w okresach obserwacji T_0 , określającej zakres zmienności udziałów samochodów ciężarowych w ruchu, wykazuje duży rozrzut jego wartości, praktycznie w całym zakresie natężeń \bar{q} , jednakże daje się zauważyć spadek wartości R_{uc} w miarę wzrostu natężenia ruchu. Z uwagi na mniejszą wagę przywiązywaną w praktyce wpływowi struktury rodzajowej na funkcjonowanie skrzyżowań, pominięto bardziej szczegółowy opis jej zmienności. Przeprowadzona analiza i płynące z niej wnioski umożliwiły jednak przyjęcie założeń do modelowego odwzorowania zmienności struktury rodzajowej w potoku. Proces ten będzie traktowany jako stochastyczny, stacjonarny. Modelowe podejście do tego zagadnienia przedstawione zostanie w następnych rozdziałach.



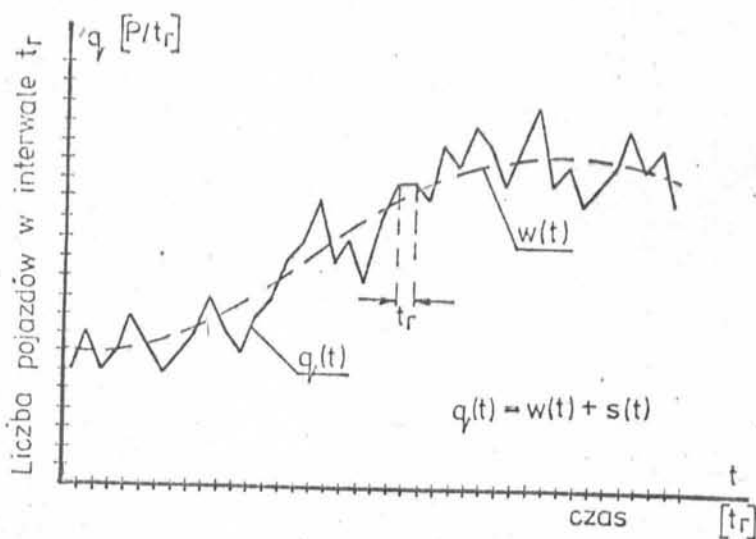
Rys. 2.14. Średni udział s.c. w ruchu oraz rozstęp wartości uc/tr w okresie obserwacji TO w funkcji średniego natężenia ruchu \bar{q}

2.4. Wyglądanie danych empirycznych

Postać szeregu czasowego $\{q/t/\}_{t=1, \dots, n}$, będącego realizacją dyskretnego procesu stochastycznego o czasie dyskretnym, zależy nie tylko od charakteru danego potoku ruchu, ale także od wielkości interwału rejestracji t_r . Przy bardzo krótkim interwale t_r otrzymuje się, wahające się ze znaczną częstotliwością, wartości chwilowych natężeń ruchu, zaś przy dłuższych interwałach tendencje zmian natężenia ruchu. Przyjęcie zbyt długich interwałów rejestracji, np. rzędu 15 minut, powoduje zbyt duże wyglądanie szeregu czasowego, niwelujące rzeczywiste tendencje zmian natężenia ruchu. Rejestracja przejeżdżających pojazdów w bardzo krótkich interwałach daje obraz zmian natężenia ruchu, na podstawie którego dosyć trudno jest ocenić tendencje zmian /trend/. Obraz taki bowiem, oprócz samego trendu, zawiera również losowe zmiany intensywności ruchu wywołane wpływami różnego rodzaju [74]. Te losowe krótkoterminowe wahania nakładając się na dłuższookresowe tendencje zmian ruchu powodują, że wartości szeregu czasowego natężenia ruchu zmieniają się w dość znacznym zakresie /duża amplituda wahań/ w kolejnych dyskretnych momentach czasowych. Można przyjąć, że szereg czasowy natężenia ruchu posiada dwie składowe /rys. 2.15/; składnik stały - trend $w/t/$ oraz składnik stochastyczny $s/t/$ w postaci przypadkowych odchyleń od trendu. Przy określonym interwale rejestracji t_r można więc napisać

$$q/t/ = w/t/ + s/t/ \quad /2.15/$$

Dążenie do dokładnej oceny potoku ruchu powoduje przyjmowanie bardzo krótkich interwałów rejestracji. W tej sytuacji wpływ wysokiej częstotliwości wahań jest jednak duży. Z kolei zwiększenie interwału rejestracji pociąga za sobą utratę dokładności oce-



Rys. 2.15. Składowe szeregu czasowego natężenia ruchu

ny. Stwarza to konieczność stosowania metod statystycznych, które umożliwiają eliminację wahań losowych nie zniekształcając równocześnie zmian stałych /trendu/. Jedną z metod umożliwiających odfiltrowanie składowej stochastycznej w procesie ruchu jest wygładzanie wykładnicze [11], [51], [52], [66]. Metoda wygładzania wykładniczego rozwinięta przez Browna /1959 r./ odpowiada filtracji szeregów czasowych przy użyciu dolnoprzepustowego filtra rekursywnego [53]. Wygładzoną wartość szeregu czasowego $\hat{q}/t/$ w chwili t , oblicza się jako ważoną sumę wartości obserwowanej $q/t/$ i wygładzonej wartości $\hat{q}/t - 1/$ w poprzednim interwale rejestracji $/t - 1/$ wg wzoru:

$$\hat{q}/t/ = a \cdot q/t/ + /1 - a/ \cdot \hat{q}/t - 1/ \quad /2.16/$$

gdzie: a - stała wygładzania, liczba z przedziału $0 \leq a \leq 1$.
W granicznych przypadkach wygładzona wartość w chwili t będzie równa wartości z poprzedniego interwału $/t - 1/$ lub wartości zarejestrowanej bezpośrednio w chwili t :

- jeżeli $a = 0 \rightarrow \hat{q}/t/ = \hat{q}/t - 1/ \quad /2.17/$

- jeżeli $a = 1 \rightarrow \hat{q}/t/ = q/t/ \quad /2.18/$

Jeżeli weźmiemy pod uwagę momenty czasowe $/t - 1/$ lub $/t - 2/$ i zastosujemy równanie $/2.16/$ otrzymamy:

$$\hat{q}/t - 1/ = a \cdot q /t - 1/ + /1 - a/ \cdot \hat{q} /t - 2/ \quad /2.19/$$

lub

$$\hat{q}/t - 2/ = a \cdot q/t - 2/ + /1 - a/ \cdot \hat{q}/t - 3/ \quad /2.20/$$

Przez podstawienie równań $/2.20/$ i $/2.19/$ do wzoru $/2.16/$ mamy:

$$\hat{q}/t/ = aq/t/+/1-a/ \cdot \{a \cdot q/t-1/+/1-a/ [a \cdot q/t-2/+/1-a/ \cdot \hat{q}/t-3/]\}$$

a po wymnożeniu otrzymujemy następującą postać:

$$\hat{q}/t/ = aq/t/+a/1-a/ \cdot q/t-1/+a/1-a/{}^2 \cdot q/t-2/+/1-a/{}^3 \hat{q}/t-3/$$

Biorąc pod uwagę n interwałów czasowych, od t do $/t-n/$, powyższa suma przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} \hat{q}/t/ = & a \cdot q/t/+a/1-a/q/t-1/+a/1-a/{}^2 \cdot q/t-2/ + \dots + a/1-a/{}^n \cdot q/t-n/+ \\ & +/1-a/{}^{n+1} \cdot \hat{q} [t-/n+1/] \end{aligned} \quad /2.21/$$

którą, podstawiając $n \cdot t_r = T$, można zapisać:

$$\hat{q}/t/ = a \cdot \left[\sum_{i=0}^T /1-a/{}^i \cdot q/t-1/ \right] + /1-a/{}^{T+1} \cdot \hat{q}/t-T-1/ \quad a \neq 1 \quad /2.22/$$

Dla dużej wartości T ostatni składnik sumy we wzorze $/2.22/$ może być pominięty, gdyż,

$$\lim_{T \rightarrow \infty} /1 - a/{}^{T+1} \cdot \hat{q}/t - T - 1/ = 0$$

Jak wynika ze wzoru $/2.21/$ informacja pochodząca z i -tego interwału, poprzedzającego aktualnie rozważany, ważona jest za pomocą współczynnika

$$w_i = a/1 - a/{}^i \quad /2.23/$$

Taka postać równania /2.23/ oznacza, że wagi informacji są funkcją wykładniczą wieku informacji "i" /stąd nazwa metody wygładzania/. Wagi informacji w_i w funkcji czasu poprzedzającego rozważany interwał /wieku informacji/ oraz stałej wygładzania "a" przedstawiono na rys. 2.16. Jak widać wagi pojedynczych, historycznych informacji maleją wraz z wiekiem informacji oraz w miarę wzrostu wartości stałej wygładzania. Przy $a = 0,40$ informacje pochodzące sprzed więcej niż 10 interwałów są praktycznie pomijane [$w_i = 0$]. Na rys. 2.17 pokazano efekty wygładzania wykładniczego dla różnych wartości stałej wygładzania / $a = 0,7, 0,3, 0,1$ /. Przy zastosowaniu $a = 0,7$ wygładzony szereg czasowy niewiele odbiega od wyjściowego, zaś przy $a = 0,10$, kiedy to aktualna wartość szeregu czasowego wpływa na wartość wygładzoną tylko w 10%, wahania przypadkowe w dużym stopniu zostają stłumione. W sytuacji, gdy nie znamy liczby pojazdów w interwale / $t = 0$ / poprzedzającym pierwszy interwał / $t = 1$ / rozważanego szeregu czasowego, zachodzi potrzeba doboru odpowiedniej wartości wyjściowej. W praktyce przyjmuje się wartość wyjściową równą pierwszej wartości szeregu czasowego;

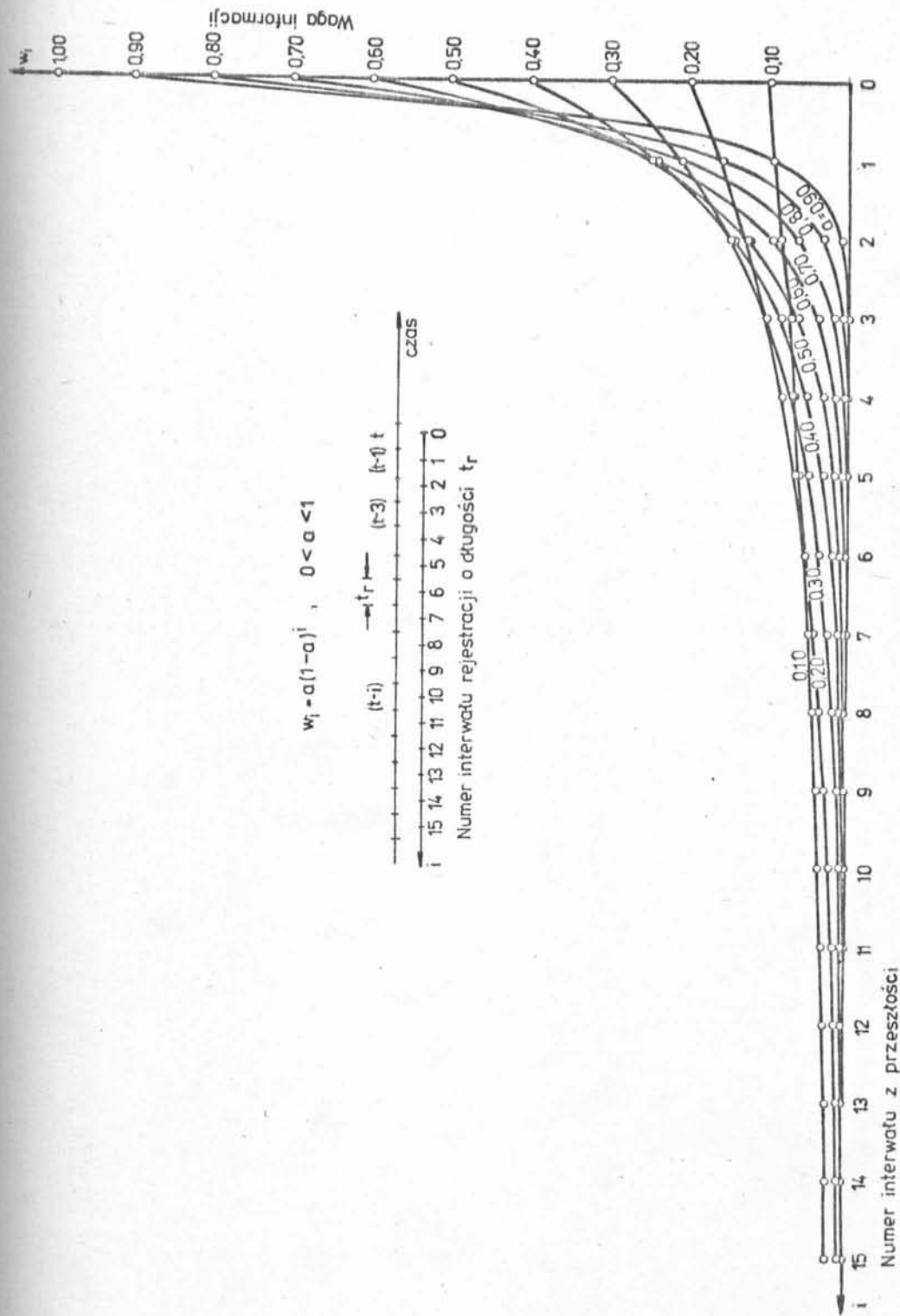
$$\hat{q} / t = 0 / = q / t = 1 /$$

lub średniej ogólnej szeregu czasowego:

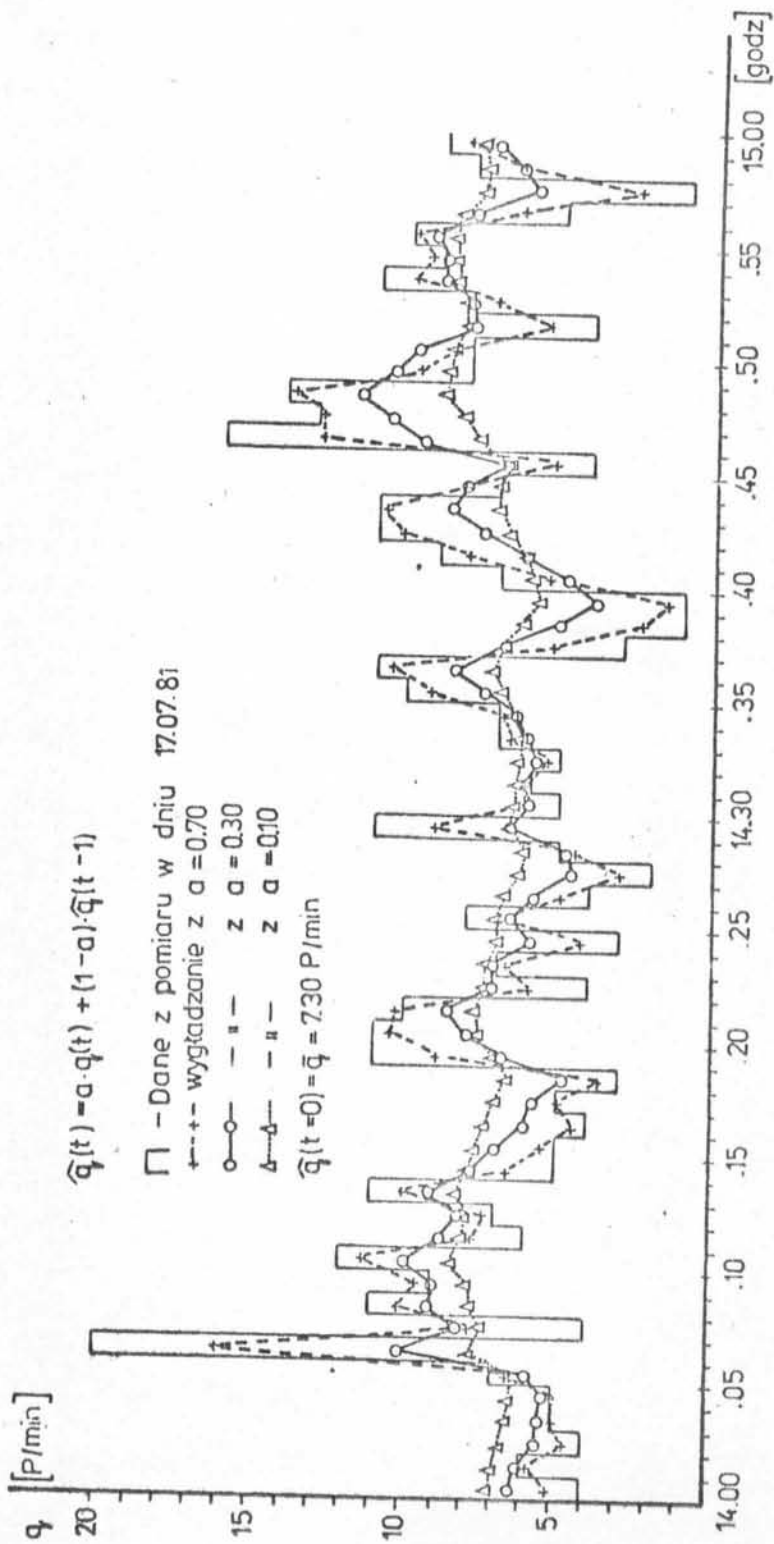
$$\hat{q} / t = 0 / = \bar{q}$$

Drugie podstawienie jest możliwe, jeżeli mamy zarejestrowany cały szereg czasowy, pierwsze zaś jeżeli proces wygładzania prowadzimy na bieżąco w czasie rejestracji natężeń ruchu.

Wrażliwość wygładzania wykładniczego można oceniać stosując tzw. średni wiek informacji \bar{t}_{wi} , który jest średnim, ważonym czasem jaki upływa od poszczególnych informacji pochodzących z kolejnych, branych z przeszłości interwałów czasu. Wychodząc z równania /2.21/ i przyjmując jednostkowy interwał rejestracji / $t_r = 1$ /,



Rys. 2.16. Wagi informacji pochodzących z interwałów poprzedzających aktualnie rozważany



Rys. 2.17. Wygładzanie wykładnicze danych z pomiaru na wlocie ulicy Bohaterów Stalingradu Stalingradu skrzyżowania Bohaterów Stalingradu - Dietla

można zapisać:

$$t_{wi} = 0,5 \cdot a + 1,5 \cdot a / 1-a + 2,5 \cdot a / 1-a^2 + \dots + (n+0,5) \cdot a / 1-a^n$$

lub ogólnie /na podstawie równania 2.22/:

$$t_{wi} = a \cdot \sum_{i=0}^{\infty} (i + 0,5) / 1 - a^i \tag{2.24}$$

Rozkładając sumę w wyrażeniu /2.24/ na sumy częściowe otrzymuje się:

$$t_{wi} = a \left[\sum_{i=0}^{\infty} i / 1 - a^i + 0,5 \sum_{i=0}^{\infty} 1 / 1 - a^i \right] \tag{2.25}$$

Pierwszy składnik po prawej stronie równania można przekształcić wprowadzając zmienną $z = 1 - a$:

$$\sum_{i=0}^{\infty} i / 1 - a^i = \sum_{i=0}^{\infty} (i + 1) \cdot z^i - \sum_{i=0}^{\infty} z^i$$

Korzystając z zależności:

$$z^{i+1} / i = (i + 1) \cdot z^i$$

oraz traktując $\sum_{i=0}^{\infty} z^i$ jako szereg geometryczny, którego pierwszy wyraz wynosi; $z^0=1$, iloraz; z , a granica; $\frac{1}{1-z}$ można zapisać:

$$\sum_{i=0}^{\infty} (i + 1) \cdot z^i - \sum_{i=0}^{\infty} z^i = \sum_{i=0}^{\infty} z^{i+1} / i - \frac{1}{1-z}$$

Na podstawie twierdzenia o różniczkowaniu szeregu funkcyjnego wyraz po wyrazie mamy:

$$\sum_{i=0}^{\infty} z^{i+1} / i - \frac{1}{1-z} = \sum_{i=0}^{\infty} z^{i+1} / i - \frac{1}{1-z} = \sum_{i=1}^{\infty} z^i / i - \frac{1}{1-z}$$

gdzie: $\sum_{i=1}^{\infty} z^i$ - jest szeregiem geometrycznym o pierwszym wyrazie; $z^1=z$, ilorazie; z i granicy; $\frac{z}{1-z}$

Przekształcając dalej otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{\infty} z^i / i - \frac{1}{1-z} &= \frac{z}{1-z} - \frac{1}{1-z} = \frac{z / 1-z - z / 1-z}{1-z} - \frac{1}{1-z} = \\ &= \frac{1}{1-z} - \frac{1}{1-z} = \frac{z}{1-z} \end{aligned}$$

Podstawiając z powrotem $1 - a/z$ za zmienną z ostatecznie mamy:

$$\sum_{i=0}^{\infty} i / 1 - a/z^i = \frac{1 - a}{a^2} \quad /2.26/$$

Drugi składnik po prawej stronie równania /2.25/ $\sum_{i=0}^{\infty} /1-a/z^i$ potraktować możemy jako szereg geometryczny, którego pierwszy wyraz wynosi; $1/a^0 = 1$, iloraz; $1-a$, granica zaś; $1/a$.

Tak więc:

$$\sum_{i=0}^{\infty} /1-a/z^i = \frac{1}{a} \quad /2.27/$$

Podstawiając wyrażenia /2.26/ i /2.27/ do równania /2.25/ dostajemy

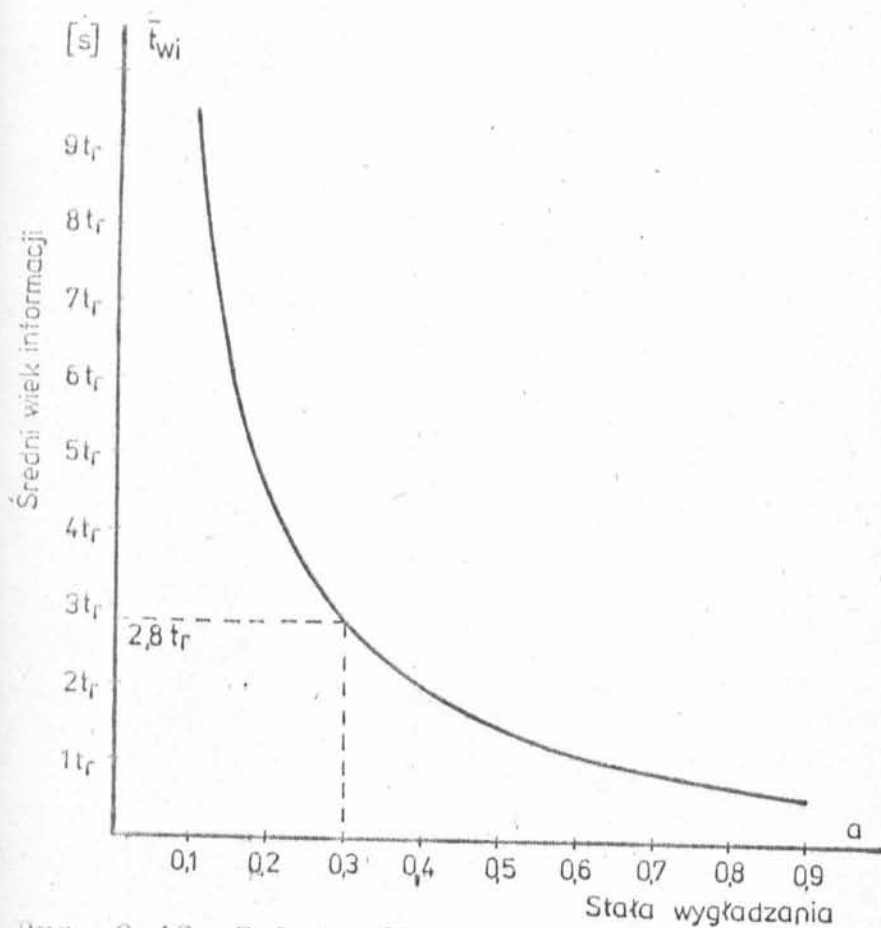
$$\bar{t}_{wi} = a/\frac{1-a}{a^2} + 0,5 \frac{1}{a} = \frac{1}{a} - 0,5 \quad /2.28/$$

Biorąc pod uwagę interwał rejestracji różny od jednostkowego otrzymujemy ostatecznie wzór na średni wiek informacji:

$$\bar{t}_{wi} = t_r/\frac{1}{a} - 0,5/ \quad /2.29/$$

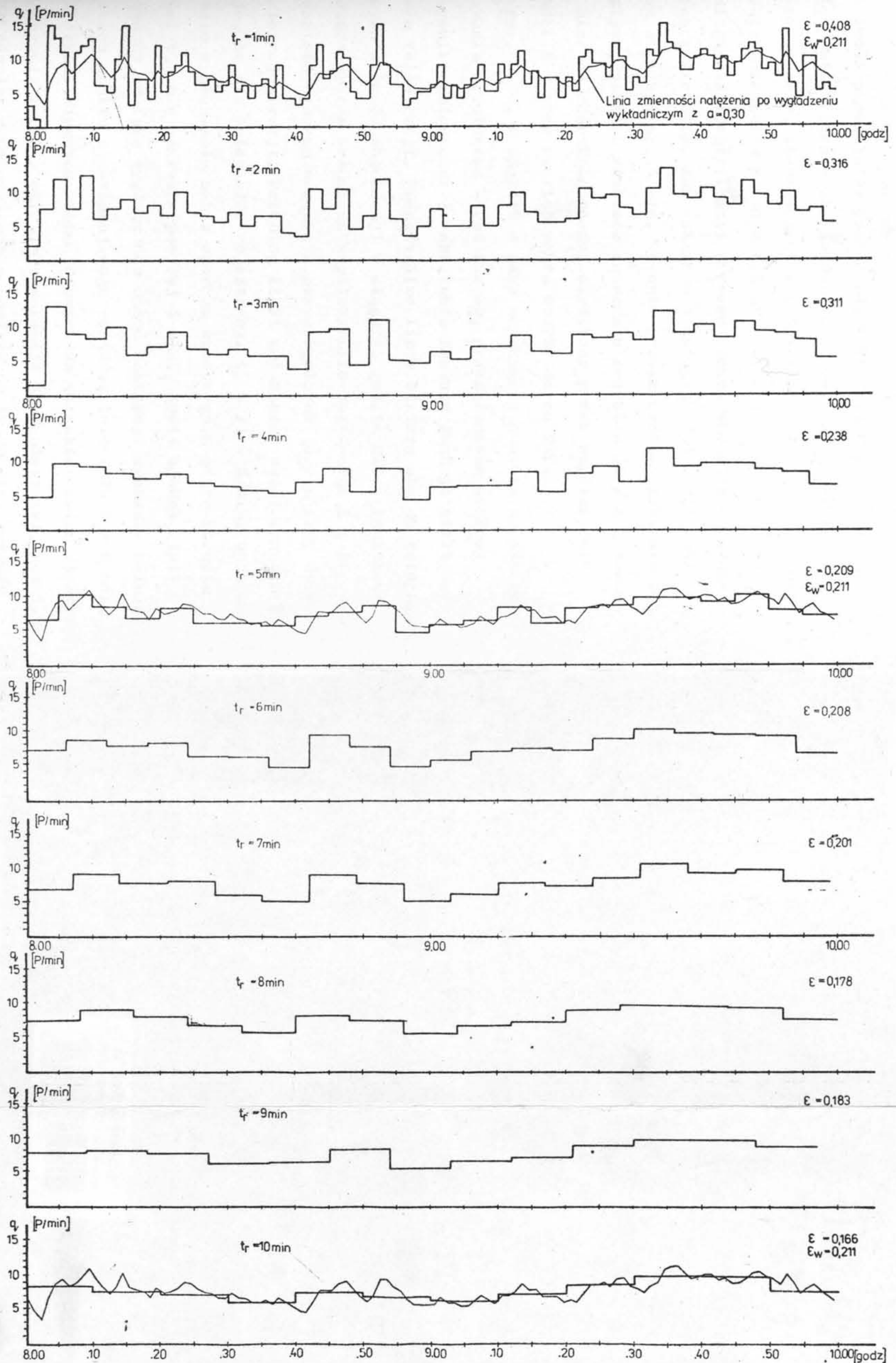
Korzystając z równania /2.29/ można określić stałą wygładzania a dla określonego średniego wieku informacji. Zależność między nimi pokazano na rys. 2.18. Analiza w zakresie predykcji natężenia ruchu [52] wykazała, że najbardziej odpowiednią wartością stałej wygładzania jest $a = 0,3$, gdyż przy tej wartości współczynnik autokorelacji [28] procesu $s/t/$ osiąga wartość zerową, praktycznie w całym zakresie natężeń, z jakimi mamy do czynienia na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją. Również analiza wielkości błędów predykcji /średni błąd bezwzględny i średni błąd kwadratowy/ w zależności od stałej wygładzania a [51] wskazuje, że praktycznie począwszy od $a = 0,3$ błędy zmieniają się w minimalnym zakresie. Dla takiej wartości stałej wygładzania $/a = 0,3/$, średni wiek informacji wynosi $2,8 t_r$ /rys. 2.18/.

Biorąc pod uwagę, że długość interwału rejestracji również



Rys. 2.18. Zależność między średnim wiekiem informacji i wielkością stałej wygładzania a

wplywa na samoistne wygładzanie się krótkoterminowych wahań losowych, dokonano porównania /rys. 2.19/ efektów wygładzania wynikających z różnych długości interwałów rejestracji t_r z liniami zmienności natężenia w dwugodzinnym okresie obserwacji, otrzymanymi po wygładzeniu wykładniczym z $a = 0,30$. Obliczone wartości współczynnika zmienności ξ dla każdego z przypadków wskazują, że zmienność szeregu czasowego po wygładzeniu wykładniczym praktycznie pokrywa się, ze zmiennością szeregu czasowego uzyskanego przy zastosowaniu interwału rejestracji $5 + 6$ min.



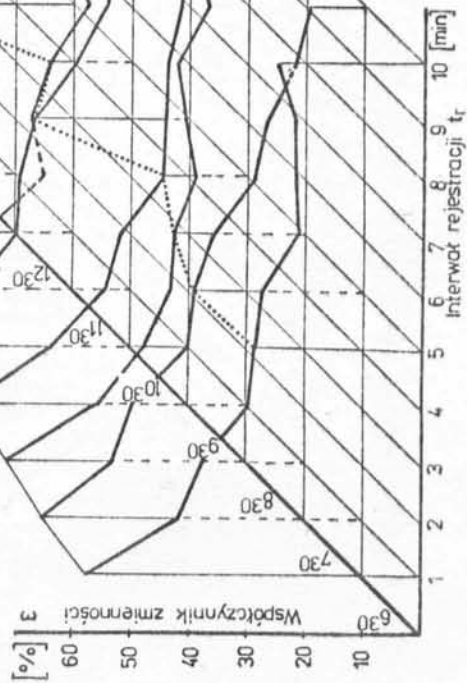
Rys. 2.19. Wpływ długości interwału rejestracji t_r na wygładzanie wahań natężenia ruchu

2.5. Ocena wielkości interwału dla rejestracji natężeń

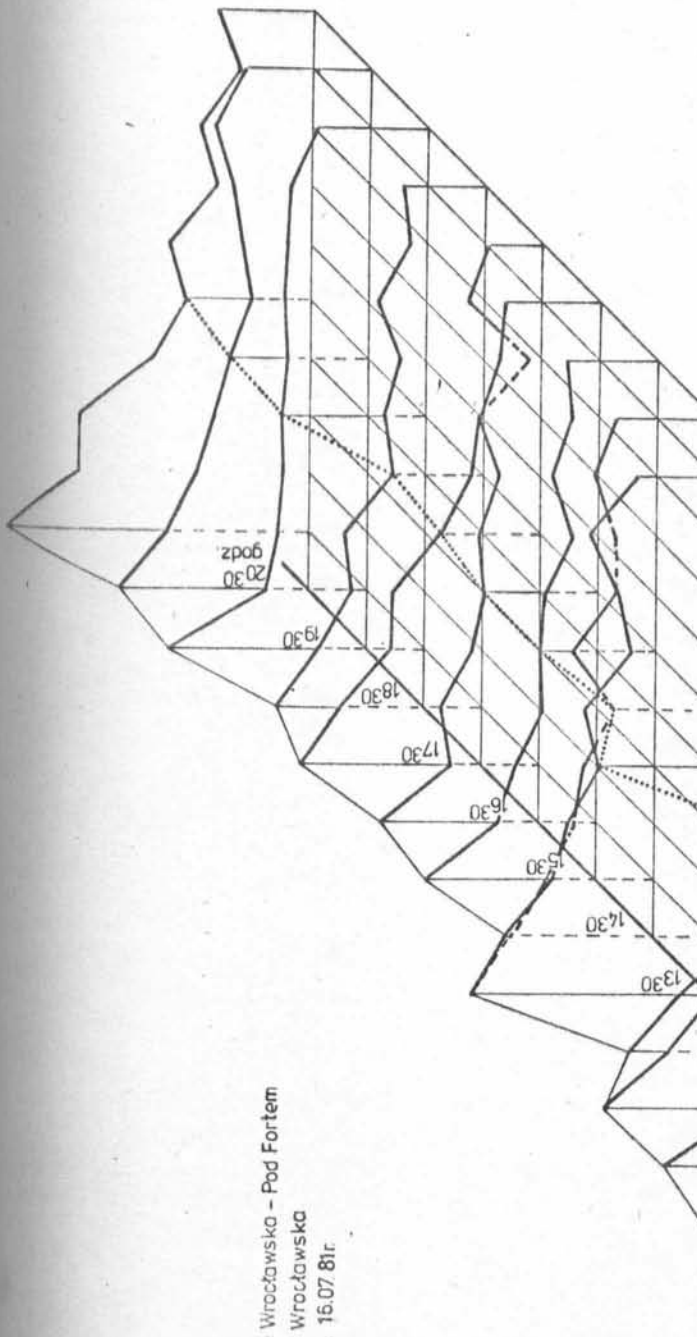
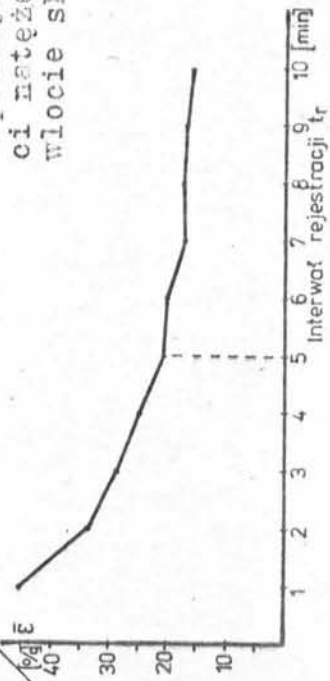
Wielkość przedziałów czasowych, w których rejestruje się w czasie pomiaru liczby przejeżdżających pojazdów, zależy niewątpliwie od celu, któremu wyniki pomiaru mają służyć. Potrzeba określenia charakteru zmian natężenia ruchu w jakimś okresie lub konieczność identyfikacji procesu ruchu, wymagają stosunkowo małych interwałów. Jak wskazano w ustępach 2.3 i 2.4 takim interwałem może być np. 5 min. Obecnie przeprowadzona zostanie analiza wpływu, jaki ma wielkość interwału rejestracji / z zakresu 1 + 10 min/ na charakter ruchu, określony przez współczynnik zmienności ξ , oraz rozstęp wahań unormowanych RWU.

Na rys. 2.20, w oparciu o dane uzyskane z pomiaru na wlocie skrzyżowania Wrocławska - Pod Fortem, przedstawiono wykresy współczynnika zmienności ξ natężenia ruchu w funkcji wielkości interwału rejestracji. Poszczególne linie odnoszą się do kolejnych godzinnych okresów obserwacji w ciągu 15 godzin dnia. Dodatkowo sporządzono wykres średniego współczynnika zmienności $\bar{\xi}$, którego każda wartość oznacza średnią z poszczególnych godzin przy danym interwale rejestracji. Przebieg linii zmienności współczynnika $\bar{\xi}$ wskazuje, że dla interwałów rejestracji $t_r = 1 + 5/\text{min}$. następuje szybkie wygładzanie wahań szeregu czasowego w miarę wzrostu wielkości t_r , a w zakresie powyżej 5 min., gdzie spadek linii jest łagodny, dalsze wygładzanie wahań następuje znacznie wolniej. W okolicach punktu odpowiadającego wartości interwału $t_r = 5 \text{ min}$., wpływ krótkoterminowych wahań losowych na charakter zmian /tendencje/ natężenia ruchu w okresie obserwacji jest niewielki. Potwierdzają to również dane uzyskane z pomiaru na innym skrzyżowaniu /aneks - rys. 2.10/.

s : Wrocławska - Pod Fortem
 w : Wrocławska
 D : 16.07.81r.



rys. 2.20. Wpływ długości inter-
 wału rejestracji na
 współczynnik zmienności
 i natężenia ruchu na
 wlocie skrzyżowania



Obliczając wartości współczynnika zmienności ξ_w po wykładniczym wygładzeniu szeregów czasowych natężenia ruchu w poszczególnych godzinach przy $t_r^0 = 1$ min., dokonano porównania ich z wartościami współczynników zmienności ξ , obliczonymi dla linii przebiegu natężenia otrzymanych przy interwałach rejestracji $t_r = 2 + 10$ min. Wykres różnic: $\Delta\xi = \xi/t_r - \xi_w/t_r^0$ pokazano na rys. 2.21. Zerowa izolinia oznaczająca zrównanie się efektów wygładzania wykładniczego z $a = 0,30$ i wynikającego z wielkości interwału t_r przebiega w zakresie $t_r = 5 + 7$ min. /a nawet $4 + 7$ min, jak na rys. 2.11 w aneksie/.

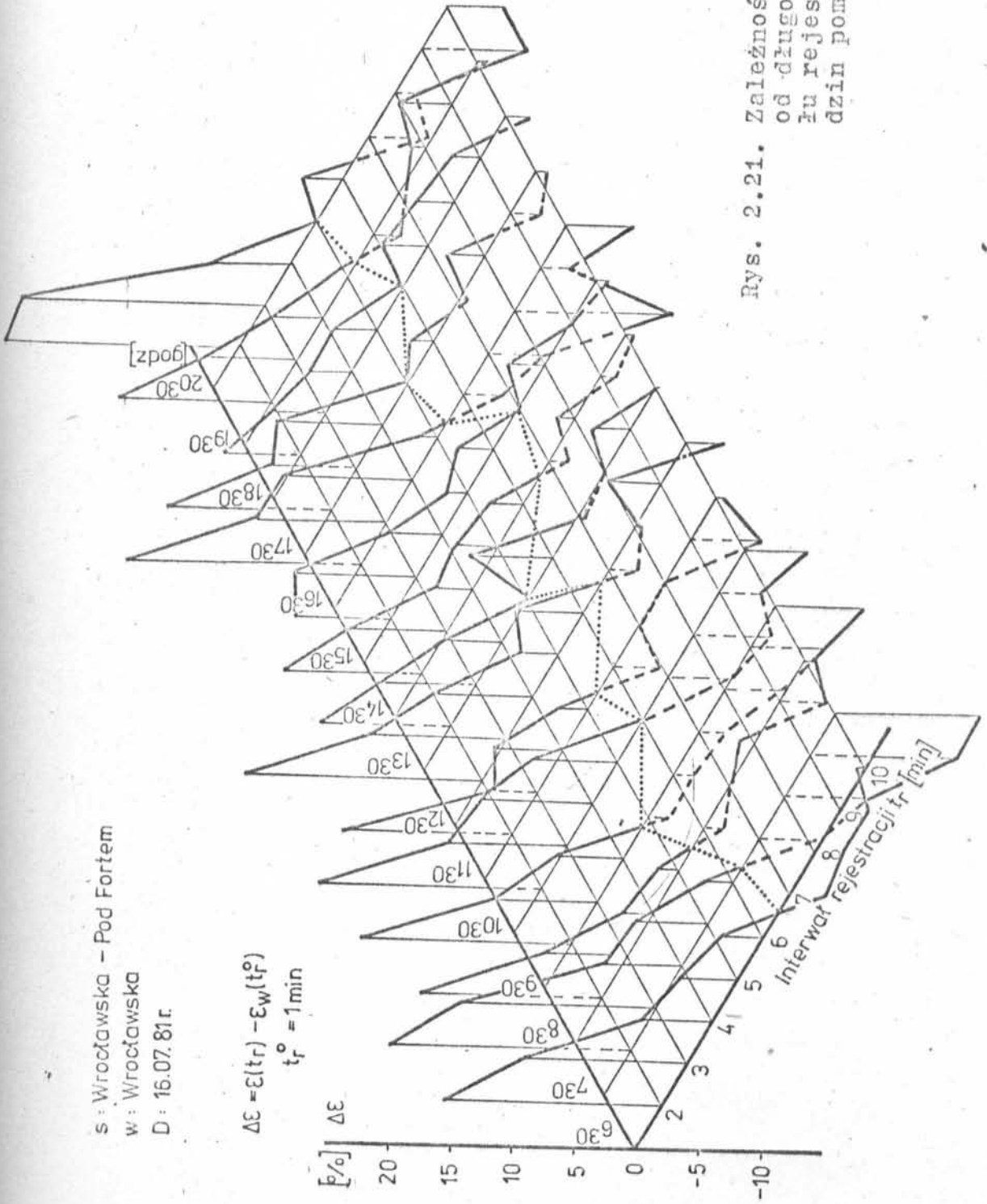
Rozstęp wahań unormowanych RWU, określający średnią zmianę natężenia ruchu z przedziału na przedział, rozważany w zależności od wielkości interwału rejestracji t_r /rys. 2.22/ zachowuje się podobnie jak współczynnik zmienności ξ . W miarę wzrostu wielkości interwału rejestracji t_r , następuje zasadniczo zmniejszanie się wahań przy przejściach z przedziału do przedziału, przy czym występują sytuacje; że dla t_r większego o 1 min rozstęp wahań unormowanych może być większy /do ok. 1 P/min/. Analiza średniego rozstępu wahań unormowanych \overline{RWU} w funkcji wielkości interwału rejestracji t_r /rys. 2.22 oraz w aneksie 2.12/ potwierdza wnioski wynikające z analizy zmienności współczynnika $\bar{\xi}$.

Synteza rezultatów przeprowadzonych analiz daje pozytywną ocenę przyjętej wcześniej wielkości interwału rejestracji natężeń $t_r = 5$ min. Interwał ten wydaje się być wystarczająco dokładnym dla celów identyfikacji ruchu w procesie modelowania numerycznego, jak również dla oceny tendencji zmian natężenia ruchu w okresie obserwacji. Umożliwia również, po zrelatywizowaniu linii przebiegu natężenia, łatwe porównywanie zmienności ruchu w okresie obserwacji dla różnych potoków. W celu określania dokładnej charakterystyki potoków, uwzględniającej losowe, krótkoterminowe

s: Wrocławska - Pod Fortem
 w: Wrocławska
 D: 16.07.81r.

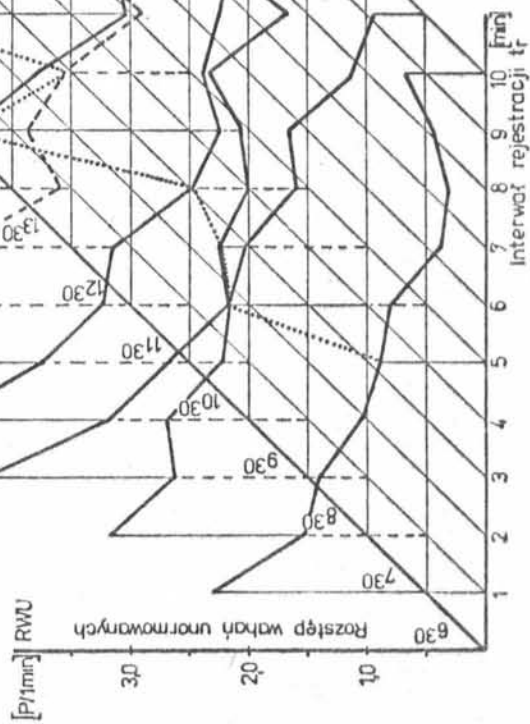
$$\Delta \varepsilon = \varepsilon(t_r) - \varepsilon_w(t_r^0)$$

$$t_r^0 = 1 \text{ min}$$

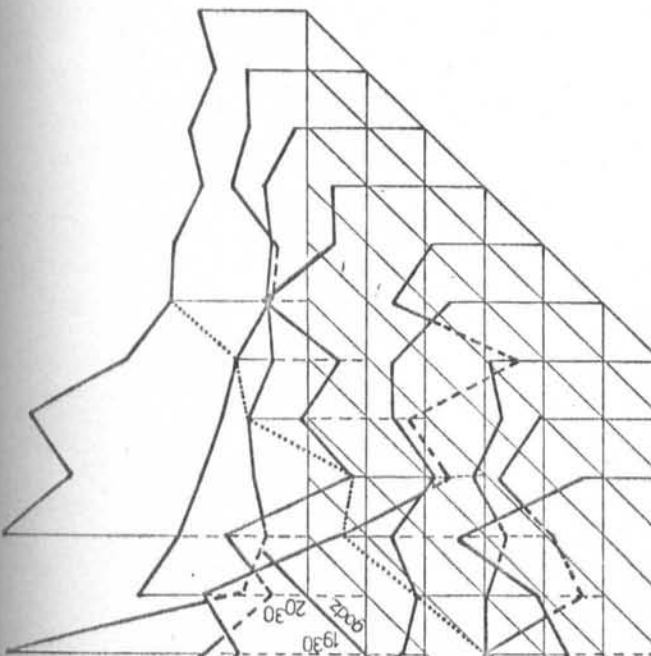
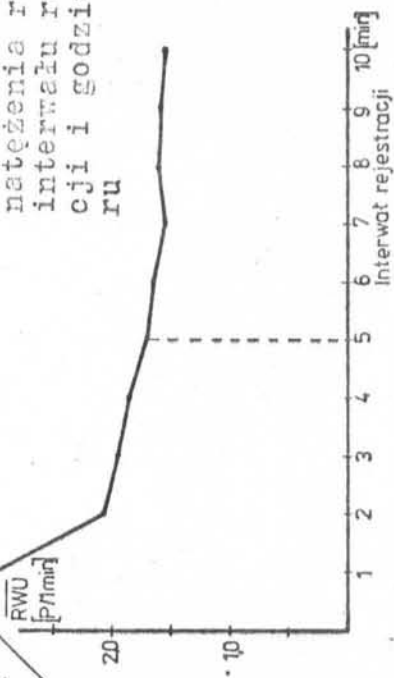


Rys. 2.21. Zależność różnic $\Delta \varepsilon$ od długości interwału rejestracji i go-dzin pomiaru

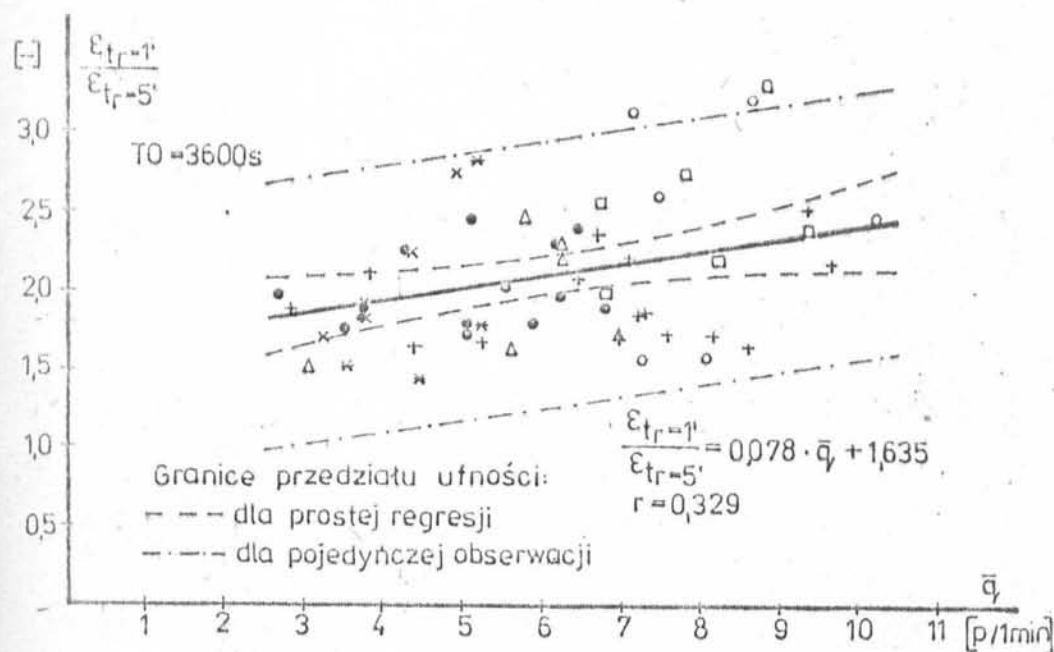
s: Wrocławska - Pod Fortem
 w: Wrocławska
 D: 16.07.81r.



Rys. 2.22. Zależność rozstępu wahań unormowanych natężenia ruchu od interwału rejestracji i godzin pomiaru



wahania natężenia, celem jest przyjmowanie interwału rejestracji $t_R = 1$ min. Współczynnik zmienności ξ szeregu czasowego uzyskanego przy $t_R = 5$ min jest mniejszy około dwukrotnie w porównaniu ze współczynnikiem ξ odnoszącym się do tego samego potoku ale przy $t_R = 1$ min. Zależność ilorazu współczynników zmienności $\xi_{t_R = 1 \text{ min}} / \xi_{t_R = 5 \text{ min}}$ od wielkości średniego natężenia \bar{q} /rys. 2.23/ jest bardzo słaba $r = 0,329$.



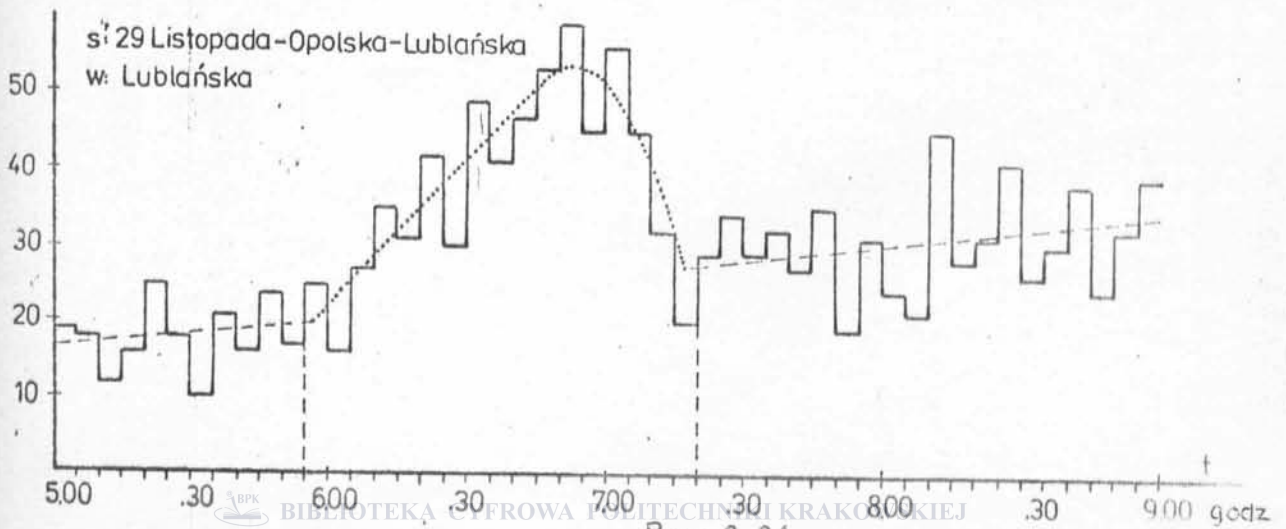
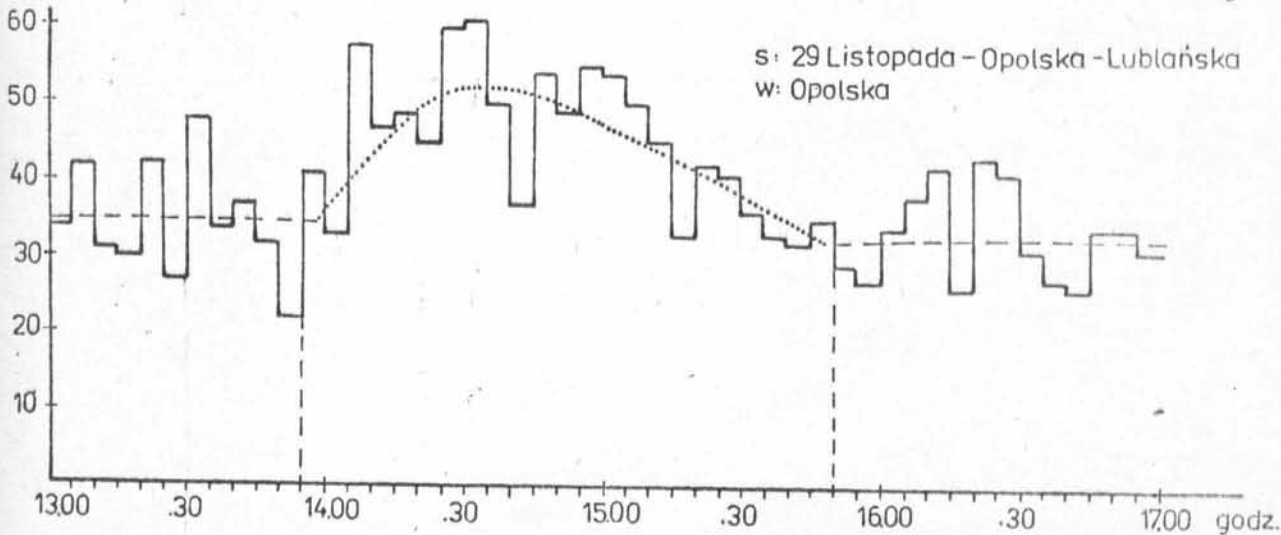
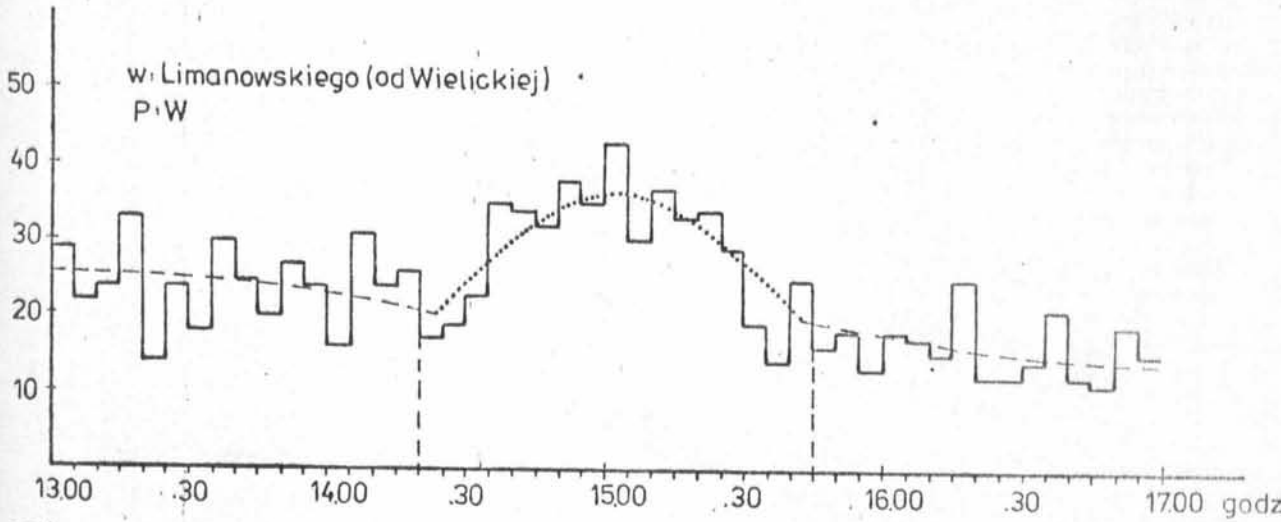
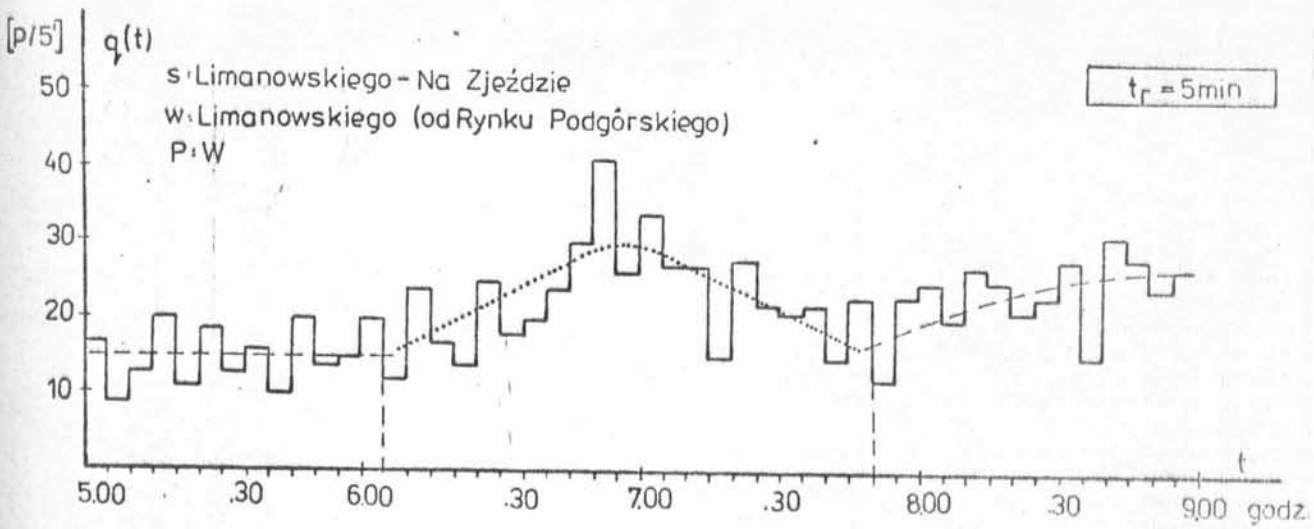
Rys. 2.23. Stosunek współczynników zmienności przy interwałach rejestracji 1 i 5 min w funkcji średniego natężenia ruchu

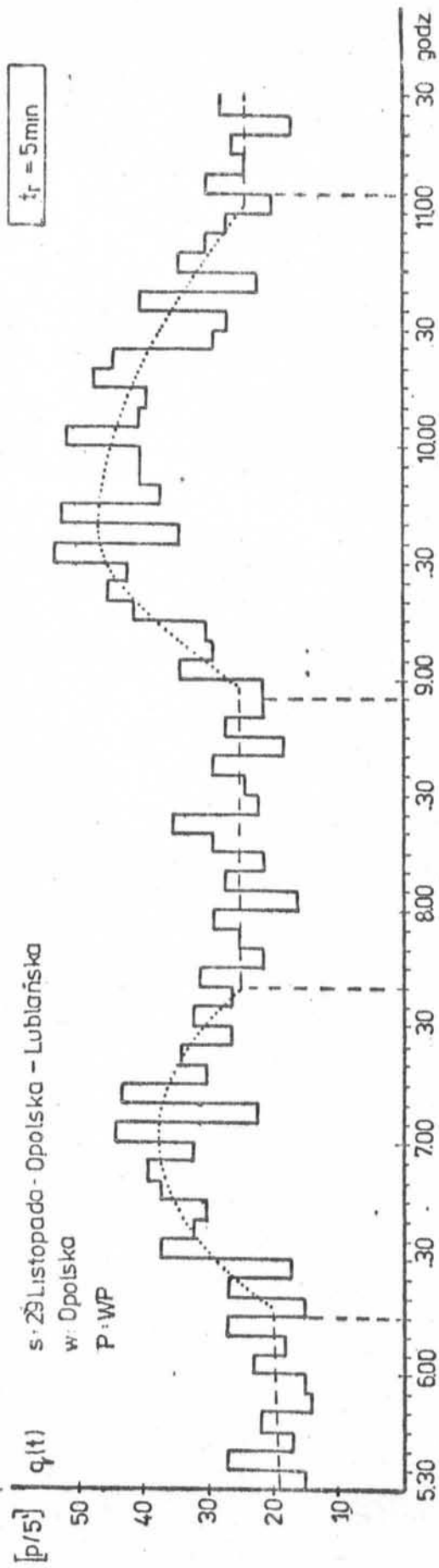
2.6. Analiza wahań ruchu dla określenia typowych profili zmienności natężenia w czasie

Rozrzut wartości poszczególnych wskaźników wahań ruchu /rys. 2.4 + 2.13/ wskazuje m.in., że dla różnych potoków ruchu można otrzymywać identyczne lub bardzo zbliżone wartości wskaźników. Świadczy to o tym, że różne potoki, z uwagi na charakter zmienności natężenia, mogą różnić się nieznacznie. Potwierdzają to

wizualne oceny linii zmienności natężenia w wybranych okresach obserwacji /jak np. okresy szczytowego ruchu/. Powstaje więc pytanie czy można wyodrębnić jakieś typowe profile natężenia ruchu reprezentujące różne potoki, z myślą o praktycznym wykorzystaniu w modelowaniu niestacjonarnych potoków oraz badaniach ich wpływu na efektywność sterowania? W tym wypadku bowiem znajomość wskaźników charakteryzujących wahania ruchu służyć może do oceny modelowanych potoków ruchu zależnych od czasu ale nie wystarczy do ich budowy.

Wybór charakterystycznych profili ruchu rejestrowanego w interwałach t_r wiąże się z problemem określenia przedziałów czasowych /czasokresów/ będących podstawą danych profili, czyli przedziałów, w których będą zaczynać się i kończyć charakterystyczne linie przebiegu natężenia ruchu. Innymi słowy będą to przedziały, w których wyraźnie widoczna jest zależność natężenia ruchu od czasu. Zasadę wyboru przedziałów czasowych z charakterystycznymi wyróżniającymi się szczytową formą, profilami natężenia ruchu ilustruje rys. 2.24. W celu dokonania uogólnień w zakresie formy charakterystycznych profili, kształt ich aproksymowano ciągłymi krzywymi zaznaczonymi na rysunku linią kropkowaną. Wstępna analiza kształtów tych linii wykazała, że mogą one być symetryczne /1 grupa/ lub niesymetryczne. W przypadku profili niesymetrycznych ich asymetria wyraża dysproporcję w tempie powstawania i zaniku szczytów; występują bowiem profile z większym tempem powstawania szczytu niż zaniku /2 grupa/, jak również profile z mniejszym tempem powstawania szczytu niż jego zaniku /3 grupa/. Taki opisowy podział spotykanych w rzeczywistości kształtów profili był podstawą pogrupowania profili natężenia ruchu uzyskanych z pomiarów na różnych poligonach, przy interwale rejestracji $t_r = 5$ min. Profile te w postaci zrelatywizowanej przedstawiono na rys.



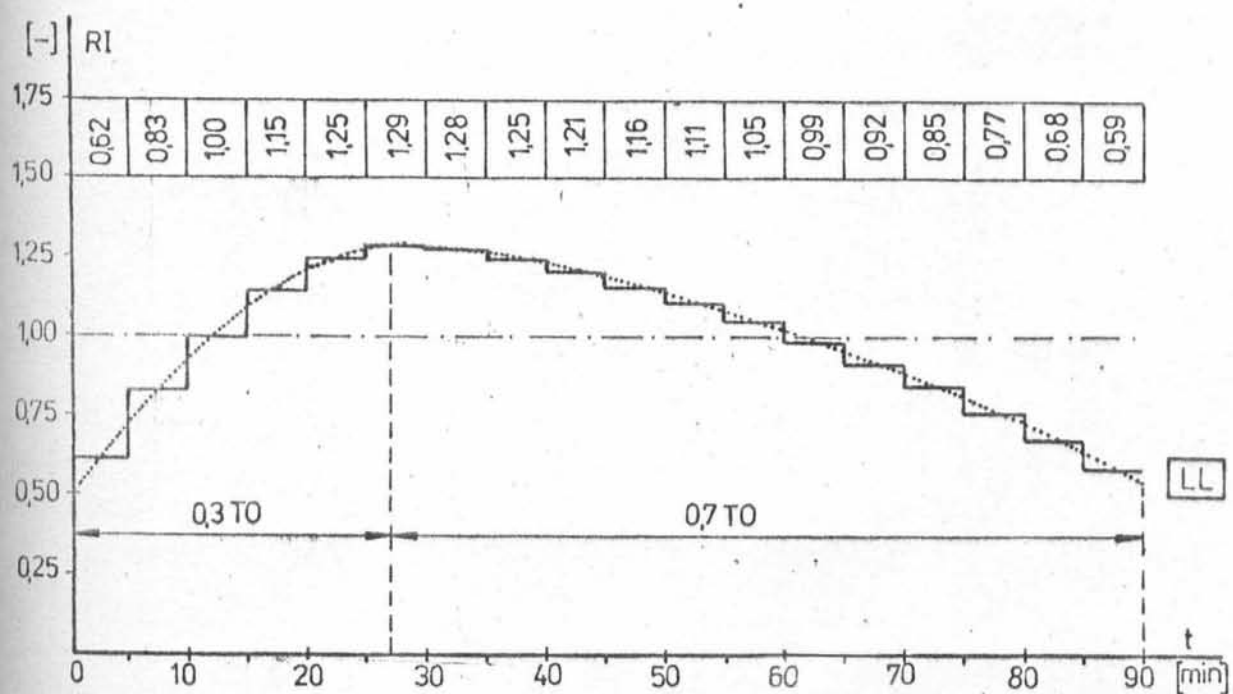
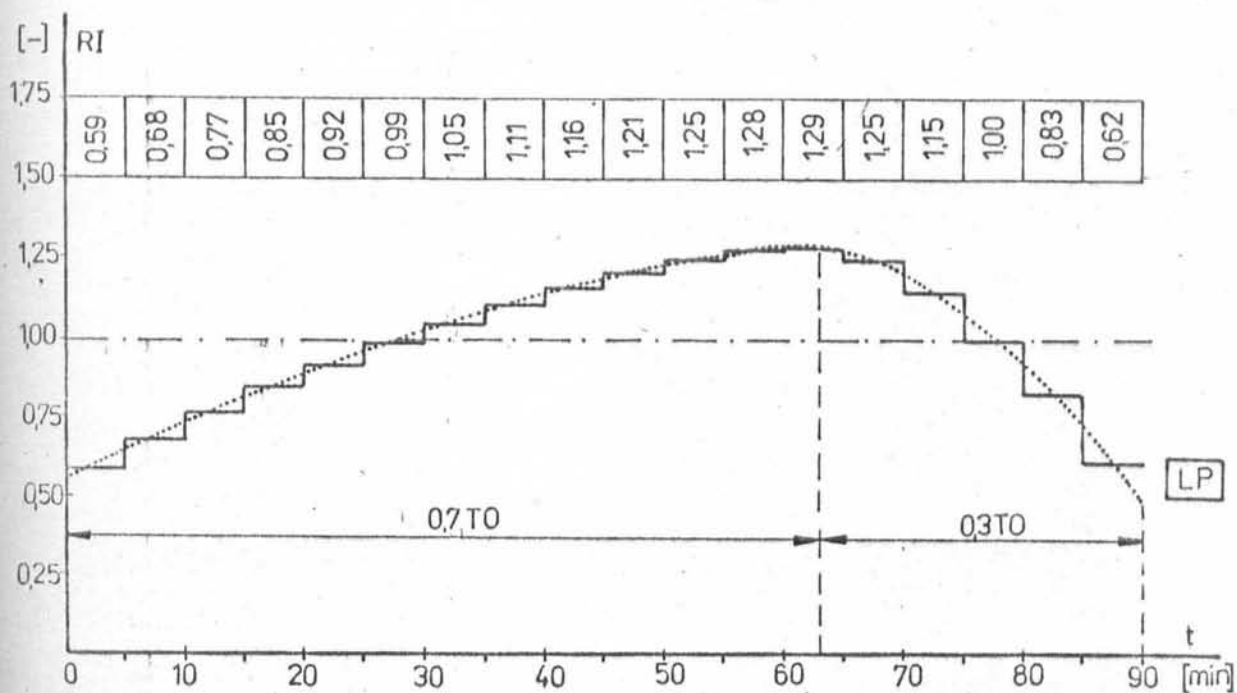
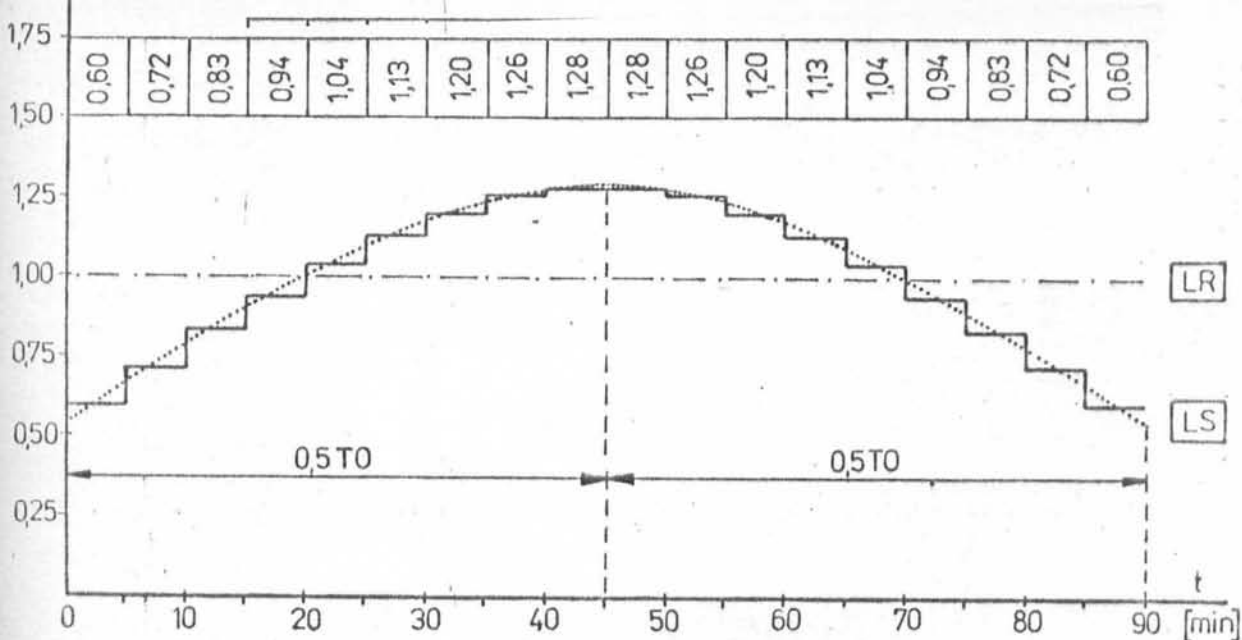


Rys. 2.24 - cd. Wybór przedziałów czasowych z charakterystycznymi profilami natężenia ruchu w formie "szczytów"

2.13.a + c zamieszczonym w aneksie. Dla każdej z linii przebiegu natężenia obliczono podstawowe wskaźniki charakteryzujące jej zmienność / ξ i WZWU/. Dalsze analizy w odniesieniu do każdej z trzech grup form profili natężenia, prowadzono w zakresie długości bazy czasowej profili jak również ich kształtu, wyrażonego odległością końców i wierzchołka krzywych aproksymujących od linii odniesienia /RI = 0/. Okazało się, że średnio można przyjąć:

- długość bazy czasowej profili - 90 min.,
- zakres wartości RI - od 0,6 + 1,3,
- odległość wierzchołka od jednego z końców krzywej w przypadku profili niesymetrycznych - 0,3 bazy czasowej.

Na tej podstawie opracowano w formie zrelatywizowanej unormowane profile zmienności natężenia w czasie, które przedstawiono na rys. 2.25. Poszczególne profile oznaczono symbolami; LS - dla profilu o kształcie symetrycznym, LP - dla profilu z mniejszym tempem powstawania szczytu niż zaniku, oraz LL - dla profilu z większym tempem powstawania szczytu niż jego zaniku. Dodatkowo symbol LR przewidziano dla potoku stacjonarnego. Wyznaczone profile zmienności natężenia ruchu w czasie były podstawą badań symulacyjnych wpływu wahań ruchu na efektywność sterowania sygnalizacją, przedstawionych w dalszej części pracy.



Rys. 2.25. Unormowane profile zmienności natężenia w czasie do badań symulacyjnych

3. BADANIA ORAZ ANALIZA STATYSTYCZNA PARAMETRÓW PROCESU RUCHU NA WŁOCIE SKRZYŻOWANIA Z SYGNALIZACJĄ

Jednym z wstępnych etapów modelowania numerycznego, wchodzących w zakres identyfikacji procesu ruchu na skrzyżowaniu, jest określenie parametrów i zmiennych drogą badań empirycznych. Szereg parametrów procesu ruchu zachodzącego na skrzyżowaniu, który jest złożonym procesem stochastycznym, ma - z matematycznego punktu widzenia - charakter zmiennych losowych. Dla dokładnego odwzorowania subprocesów ruchu niewystarczająca jest znajomość ich wartości przeciętnych, ale konieczne jest poznanie również postaci rozkładów. Niezbędne jest więc przeprowadzenie badań empirycznych i odpowiednich analiz statystycznych z zakresu estymacji parametrów, weryfikacji hipotez statystycznych oraz analizy regresji. Zakresem tych badań postanowiono objąć szczególnie te elementy procesu ruchu, które są słabo rozeznane a ich opis w literaturze jest niewystarczający.

3.1. Probabilistyczne ujęcie struktury rodzajowej ruchu

Jak wykazano w p.p. 1.5 i 2.3.5 struktura rodzajowa ruchu na wlocie skrzyżowania ulega zmianom w czasie. Jakkolwiek nie stwierdzono ścisłych zależności tych zmian od czasu, to bliższe poznanie charakteru losowości tego procesu jest jednak niezbędne. W modelu ruchu, bowiem odtworzyć trzeba nie tylko przeciętny udział samochodów ciężarowych, ale także obserwowane w rzeczywistości przy krótkich interwałach rejestracji jego wahania. Z uwagi na odmienną charakterystykę przejazdu przez skrzyżowanie samochodów ciężarowych i osobowych oraz zróżnicowanie czasu obsługi pojazdu w zależności od jego pozycji w kolejce, istotna jest również

kolejność występujących po sobie rodzajów pojazdów w potoku ruchu. W związku z tym postanowiono przeprowadzić badania właściwości potoków w zakresie kolejności występowania rodzajów pojazdów reprezentowanych, zgodnie z przyjętym założeniem /p. 1.9/, przez samochody osobowe i ciężarowe. Przeprowadzono 83 pomiary na 34 poligonach pomiarowych uzyskując próby o liczebności od 426 do 2494 pojazdów. Pomiarami objęto potoki, w których udział samochodów ciężarowych w okresie obserwacji wynosił od 0 do 37%. Dane rejestrowano w formularzu /Sk - 2/, którego wzór zamieszczono w aneksie rys. 3.1. Specjalny układ rubryk umożliwiał łatwe zestawianie pojazdów według czterech możliwych przypadków kolejności występowania:

- samochód osobowy za osobowym /O - O/,
- samochód ciężarowy za osobowym /O - C/,
- samochód osobowy za ciężarowym /C - O/,
- samochód ciężarowy za ciężarowym /C - C/.

Liczby poszczególnych przypadków zarejestrowanych w czasie pomiaru oznaczono odpowiednio symbolami n_{O-O} , n_{O-C} , n_{C-O} , n_{C-C} . Ogólna liczba zarejestrowanych zdarzeń wynosiła więc:

$$N = n_{O-O} + n_{O-C} + n_{C-O} + n_{C-C} \quad /3.1/$$

Relatywne liczby poszczególnych przypadków kolejności występowania samochodów osobowych i ciężarowych określono następująco:

$$POO = \frac{n_{O-O}}{N} \quad /3.2/$$

$$POC = \frac{n_{O-C}}{N} \quad /3.3/$$

$$PCO = \frac{n_{C-O}}{N} \quad /3.4/$$

$$PCC = \frac{n_{C-C}}{N} \quad /3.5/$$

Zatem

$$POO + POC + PCO + PCC = 1$$

oraz z uwagi na zależność $n_{o-c} = n_{c-o}$

$$POC = PCO \quad /3.6/$$

Udział samochodów ciężarowych uc w potoku, korzystając z powyższych określeń, można obliczyć w następujący sposób:

$$uc = \frac{n_{c-o} + n_{e-c}}{N} \quad /3.7/$$

lub

$$uc = PCO + PCC \quad /3.8/$$

Analiza poszczególnych przypadków kolejności występowania samochodów osobowych i ciężarowych w potoku, w ujęciu relatywnym, w świetle udziału samochodów ciężarowych w ruchu wykazała, że istnieje ścisły związek między liczbą przypadków, kiedy samochód ciężarowy jedzie za samochodem ciężarowym a udziałem pojazdów ciężkich w ruchu, potwierdzając tym samym rezultaty badań przeprowadzonych w RFN [13]. Zależność tę pokazano na rys. 3.1. Analiza regresji wykazała, że można ją opisać w następujący sposób:

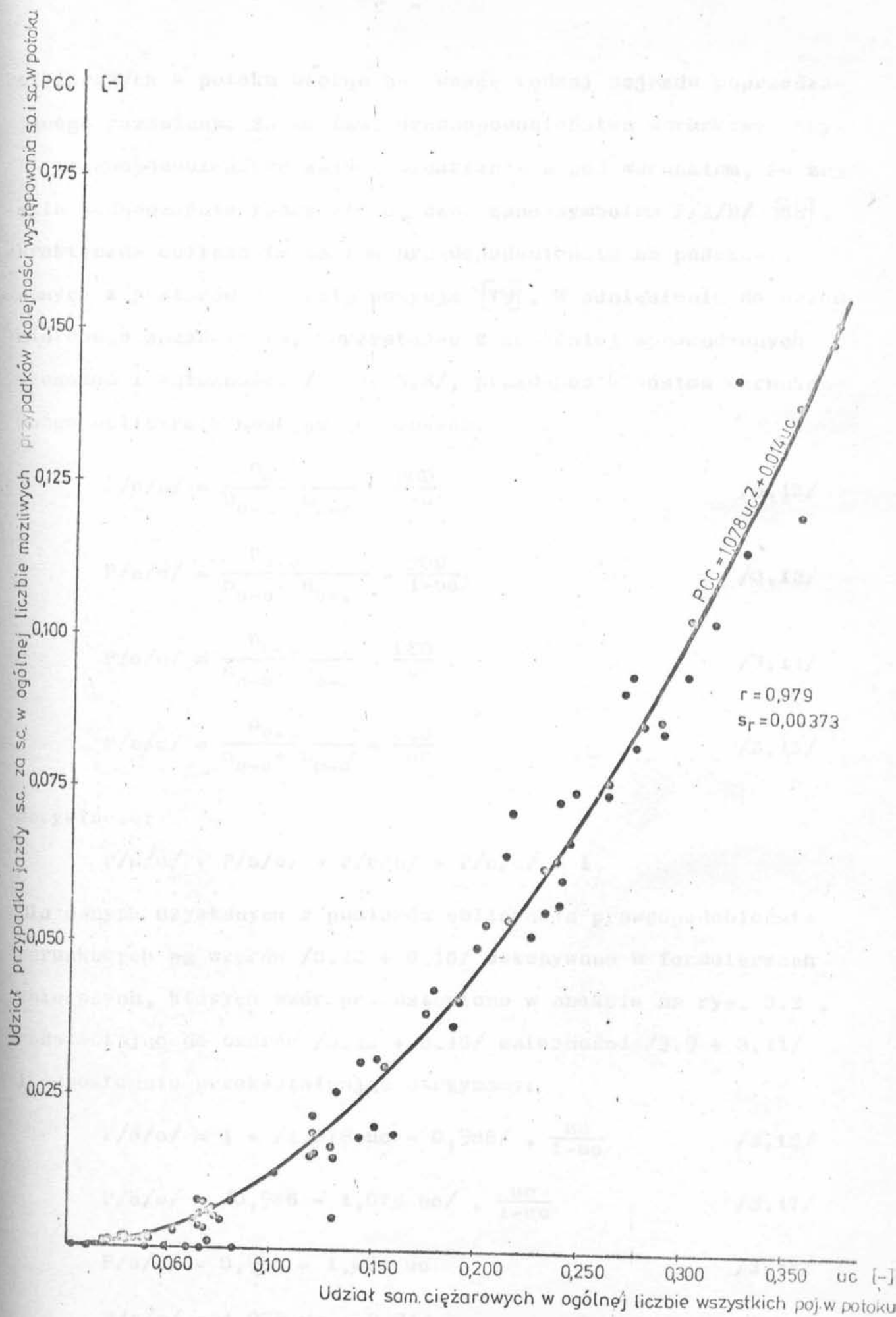
$$PCC = 1,078 uc^2 + 0,014 uc \quad /3.9/$$

przy współczynniku korelacji $r = 0,979$. Korzystając z zależności /3.9/ oraz równań /3.1 + 3.8/ można relacje między poszczególnymi przypadkami kolejności występowania pojazdów zapisać w następującej postaci:

$$POC = PCO = uc - PCC = - 1,078 uc^2 + 0,986 uc \quad /3.10/$$

$$POO = /1-uc/ - POC = 1 + 1,078 uc^2 - 1,986 uc \quad /3.11/$$

Opierając się na określonych, na podstawie danych z pomiarów częstościach występowania poszczególnych przypadków, można określić prawdopodobieństwa występowania samochodów osobowych bądź



Rys. 3.1. Zależność występowania przypadku jazdy samochodu ciężarowego za samochodem ciężarowym od udziału samochodów ciężarowych w potoku ruchu

ciężarowych w potoku biorąc pod uwagę rodzaj pojazdu poprzedzającego rozważany. Są to tzw. prawdopodobieństwa warunkowe, czyli prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia A pod warunkiem, że zaszło jednocześnie zdarzenie B, oznaczane symbolem P/A/B/ [58]. Praktyczne obliczanie takich prawdopodobieństw na podstawie danych z pomiarów wyjaśnia pozycja [79]. W odniesieniu do przedmiotowego zagadnienia, korzystając z wcześniej wprowadzonych oznaczeń i zależności /3.1 + 3.8/, prawdopodobieństwa warunkowe można obliczyć w następujący sposób:

$$P/o/o/ = \frac{n_{o-o}}{n_{o-o} + n_{o-c}} = \frac{POO}{1-uc} \quad /3.12/$$

$$P/c/o/ = \frac{n_{o-c}}{n_{o-o} + n_{o-c}} = \frac{POC}{1-uc} \quad /3.13/$$

$$P/o/c/ = \frac{n_{c-o}}{n_{c-o} + n_{c-c}} = \frac{PCO}{uc} \quad /3.14/$$

$$P/c/c/ = \frac{n_{c-c}}{n_{c-o} + n_{c-c}} = \frac{PCC}{uc} \quad /3.15/$$

Oczywiście:

$$P/o/o/ + P/c/o/ = P/o/c/ + P/c/c/ = 1$$

Dla danych uzyskanych z pomiarów obliczenia prawdopodobieństw warunkowych wg wzorów /3.12 + 3.15/ dokonywano w formularzach zbiorczych, których wzór przedstawiono w aneksie na rys. 3.2. Podstawiając do wzorów /3.12 + 3.15/ zależności /3.9 + 3.11/ i odpowiednio przekształcając otrzymamy:

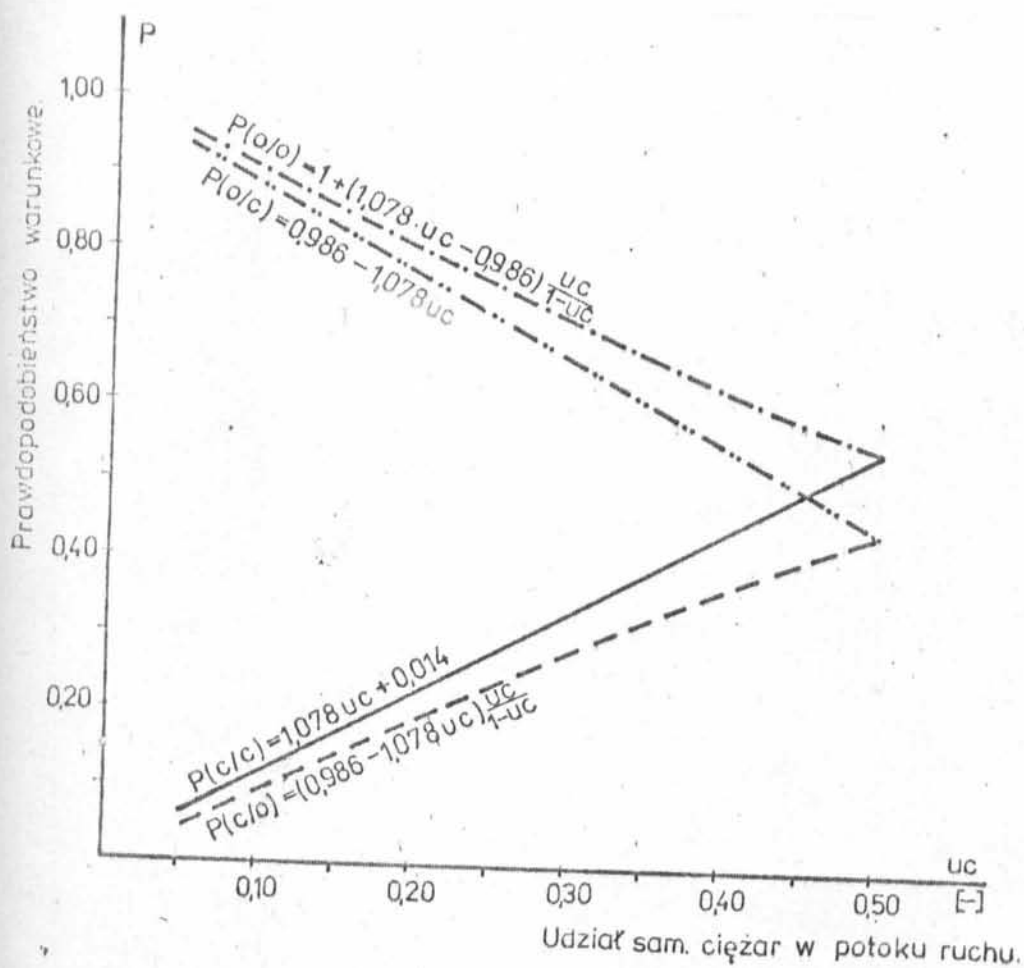
$$P/o/o/ = 1 + /1,078 uc - 0,986/ \cdot \frac{uc}{1-uc} \quad /3.16/$$

$$P/c/o/ = /0,986 - 1,078 uc/ \cdot \frac{uc}{1-uc} \quad /3.17/$$

$$P/o/c/ = 0,986 - 1,078 uc \quad /3.18/$$

$$P/c/c/ = 1,078 uc + 0,014 \quad /3.19/$$

Dysponując tak określonymi prawdopodobieństwami można, rejestrując dany pojazd w potoku o znanym uc określić np. prawdopodobieństwo, że kolejnym po nim będzie samochód ciężarowy. Prawdopodobieństwa warunkowe kolejności występowania samochodów osobowych i ciężarowych w potoku ruchu w funkcji uc pokazano na rys. 3.2.



rys. 3.2. Prawdopodobieństwa warunkowe kolejności występowania s.o. i s.c. w potoku ruchu

3.2. Czas przejazdu odcinka wlotowego

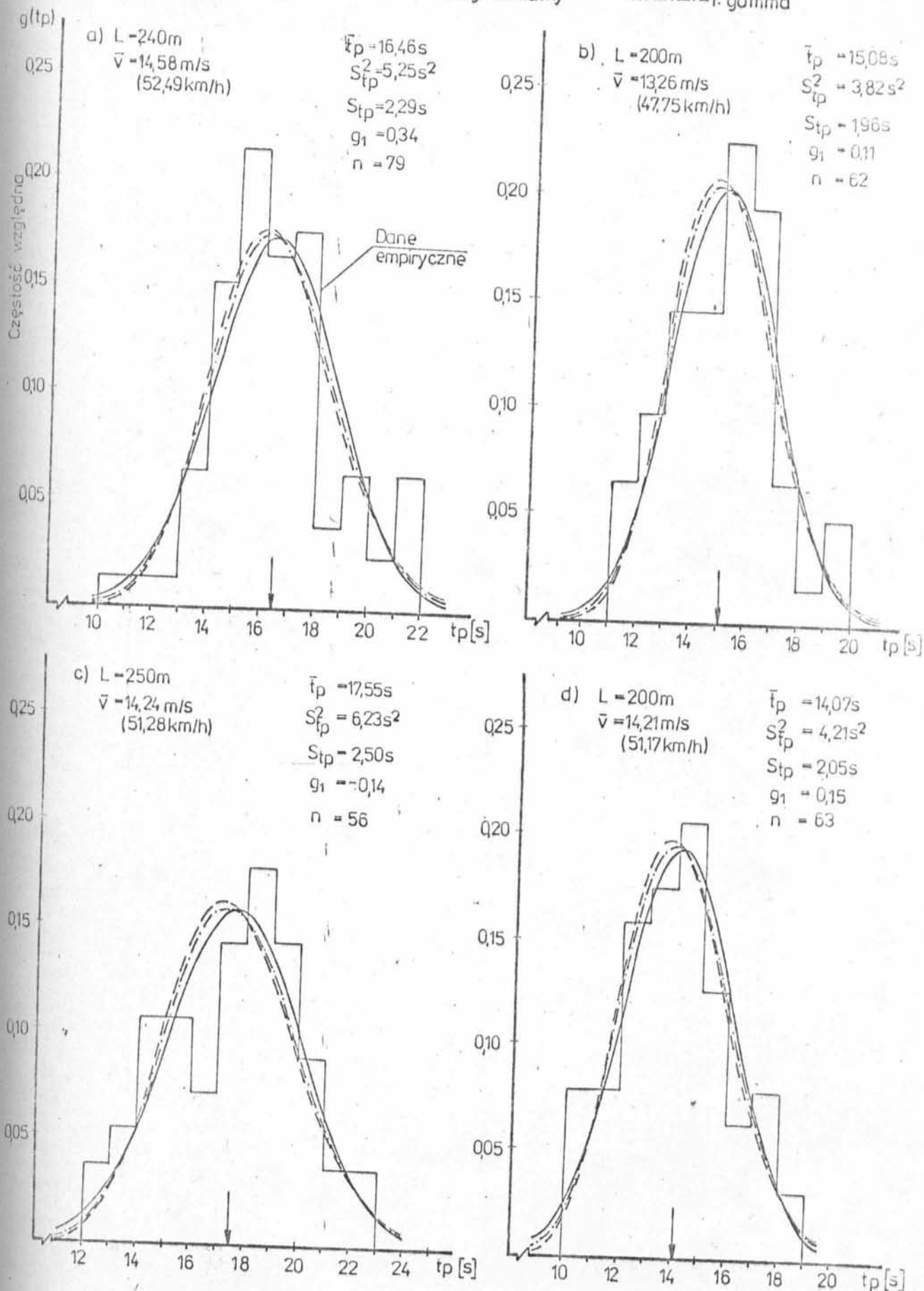
Czynnikami, które wpływają niewątpliwie na prędkości pojazdów i ich zróżnicowanie [36] na dojeździe do skrzyżowania, są m.in.: rodzaj pojazdu, obecność kolejki przed linią stop, stan sygnałów świetlnych. Zależność prędkości od rodzaju pojazdu /osobowy czy ciężarowy/ wynika ze zróżnicowanych właściwości dynamicznych /przyspieszenie, hamowanie/, jak również samych gabarytów pojazdów /łatwość manewrowania/. Obecność kolejki sprawia, iż dojeżdżający kierowca odpowiednio dostosowuje do sytuacji swoją prędkość. Podobnie stan sygnałów na sygnalizatorach, lub ich zmiana podczas dojeżdżania do wlotu skrzyżowania, powodować będą różne reakcje i zachowania kierowców. Także sama specyfika warunków ruchu w obrębie skrzyżowania sprawia, że prędkości poszczególnych pojazdów będą odmienne niż na odcinkach międzywęzłowych.

Prędkości pojazdów na dojazdach do skrzyżowania i związane z nimi czasy przejazdu w istotny sposób rzutują na tworzenie się kolejek /ich wielkość/ na wlocie skrzyżowania a przede wszystkim na straty czasu, określane jako różnica między rzeczywistym czasem przejazdu a czasem wirtualnym, odnoszącym się do przejazdu bez zakłóceń. Dlatego też, mając na uwadze powyższe względy oraz w perspektywie opracowanie w miarę wiernego modelu ruchu, postanowiono zbadać czasy przejazdu odcinka wlotowego na skrzyżowaniach dla określenia ich statystyk oraz rozkładów. Odpowiednie pomiary wykonano na wlotach 8 skrzyżowań przy użyciu radiotelefonów, stoperów oraz specjalnie przygotowanych formularzy. Rejestracji czasów przejazdu dokonywano w sposób umożliwiający uwzględnienie najistotniejszych wpływów determinujących zachowanie się pojazdów na wlocie. Długość odcinka, na którym dokonywano pomiaru przyjęto $200 + 250$ m, kierując się praktyczną odległość-

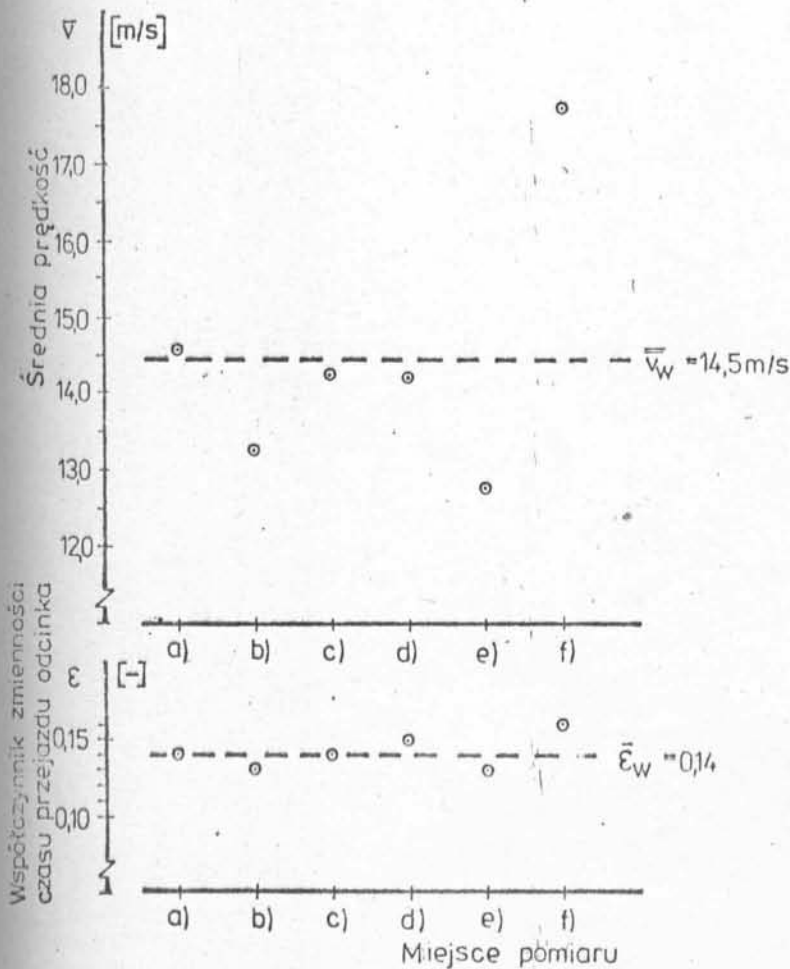
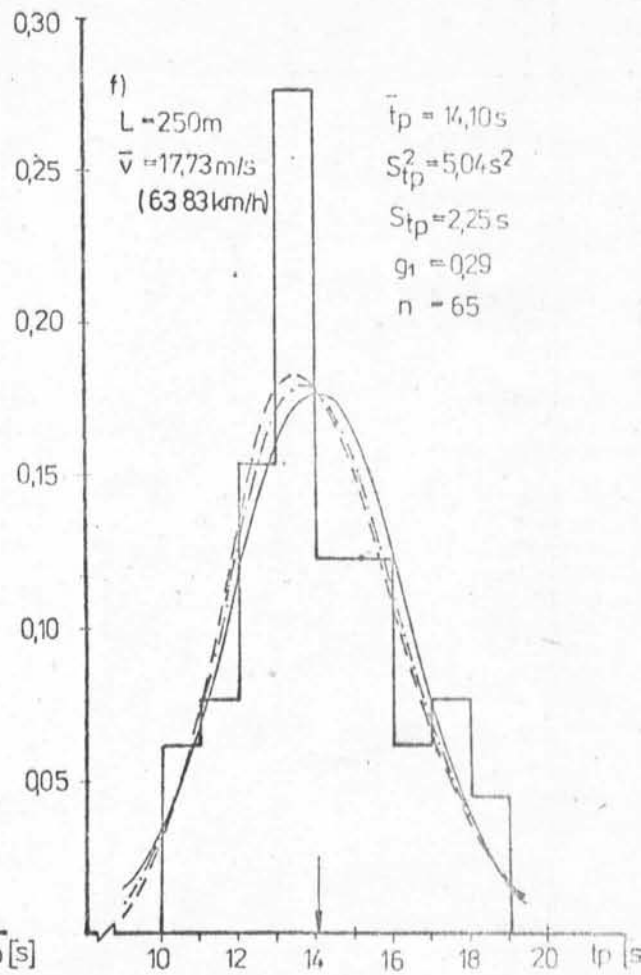
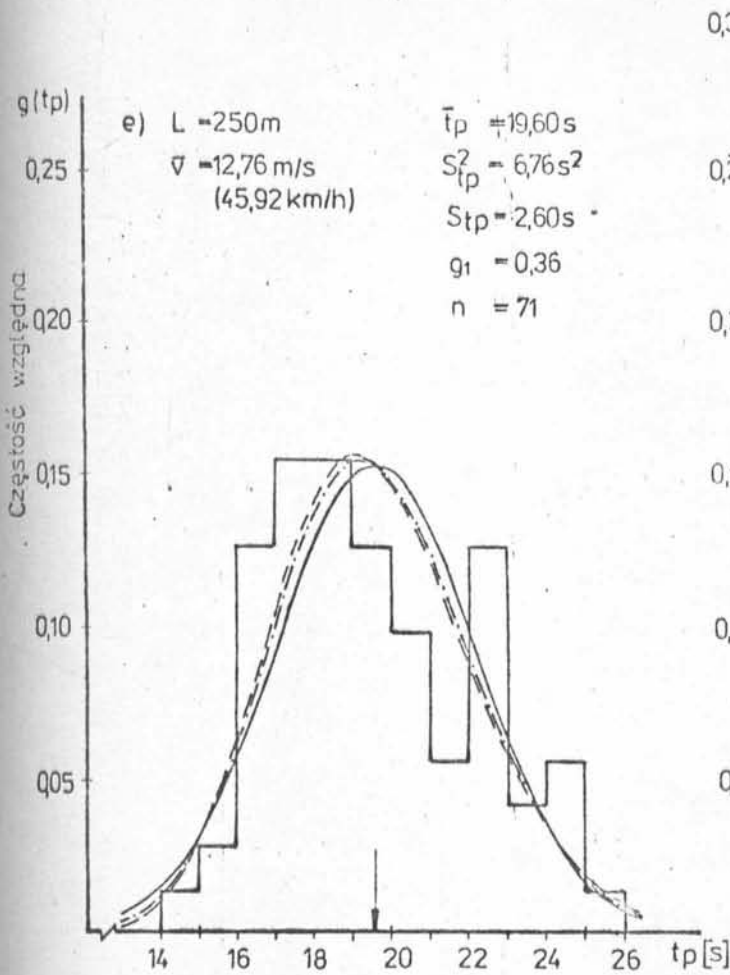
cią wpływu sygnalizacji przy dojeździe do skrzyżowania. Koniec odcinka pomiarowego stanowiła linia stop. Rejestrowano tylko czasy przejazdu tych pojazdów, które dojeżdżały do wlotu w sytuacji, gdy na nim nie było kolejki oczekujących pojazdów. Na etapie statystycznego opracowania rezultatów pomiarów oddzielnie traktowano pojazdy dojeżdżające do linii stop podczas sygnałów; zielonego oraz czerwonego w rozbięciu, w każdym z tych przypadków, na samochody osobowe i ciężarowe. W toku opracowania wyników odrzucono te próby, których liczebność była niewystarczająca [26] dla dokonania szacunku wartości średniej z ustaloną dokładnością /współczynnik ufności $1 - \alpha = 0,05$, maksymalny błąd szacunku średniej 5%/. Rozkłady częstości występowania czasów przejazdu t_p przedstawiono na rys. 3.3 i 3.4. Dotyczą one pojazdów dojeżdżających do linii stop w czasie trwania sygnału zielonego, czyli realizujących przejazd skrzyżowania bez zatrzymań. Odpowiednie wykresy dotyczące pojazdów dojeżdżających do linii stop podczas sygnału czerwonego /zatrzymanie pojazdów/ zamieszczono w aneksie rys. 3.3. i 3.4. Na rysunkach podano wartości takich parametrów rozkładów, jak; średnia \bar{t}_p , wariancja $S_{t_p}^2$, odchylenie standardowe S_{t_p} , współczynnik skośności g_1 , liczebność próby n . Z uwagi na niemożliwość bezpośredniego porównywania średnich czasów przejazdu z różnych pomiarów z powodu różnej długości odcinków bazowych, obliczono średnie prędkości pojazdów \bar{v} . Okazało się, że rozrzut wartości \bar{v} , uzyskanych z różnych skrzyżowań, jest dosyć duży, szczególnie w przypadku pojazdów dojeżdżających do linii stop podczas sygnału zielonego /rys. 3.3, 3.4/.

Poszukiwanie zależności między lokalizacją skrzyżowania a wartością \bar{v} nie przyniosło pozytywnych rezultatów. Dla orientacyjnego oszacowania wpływu rodzaju pojazdu na prędkość na

— r. normalny - - - - r. log. normalny - · - · - r. gamma



Rys. 3.3. Rozkłady częstości występowania czasów przejazdu odcinka wlotowego na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną



- a/ s: Koniewa-Nawojki-Piastowska
w: Koniewa 3 i 4.06.81
- b/ s: Kijowska-Dzierżyńskiego
w: Kijowska /od Nawojk 6.07.81
- c/ s: Kijowska-Kazimierza Wielkiego
w: Kijowska /od Wrocławskiej/ 4.07.81
- d/ s: Koniewa-Nawojki-Piastowska
w: Piastowska /od Dzierżyńskiego/ 9.07.81
- e/ s: Koniewa-Nawojki-Piastowska
w: Nawojki 8.07.81.
- f/ s: Kamińskiego-Gwardii Ludowej
w: Kamińskiego /od Włocławskiej/ 8.07.81

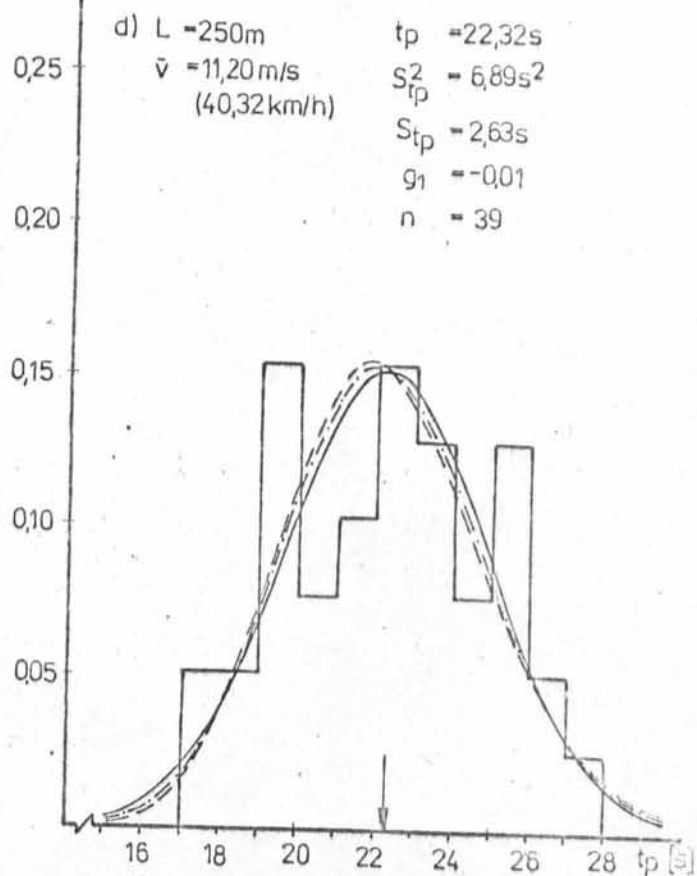
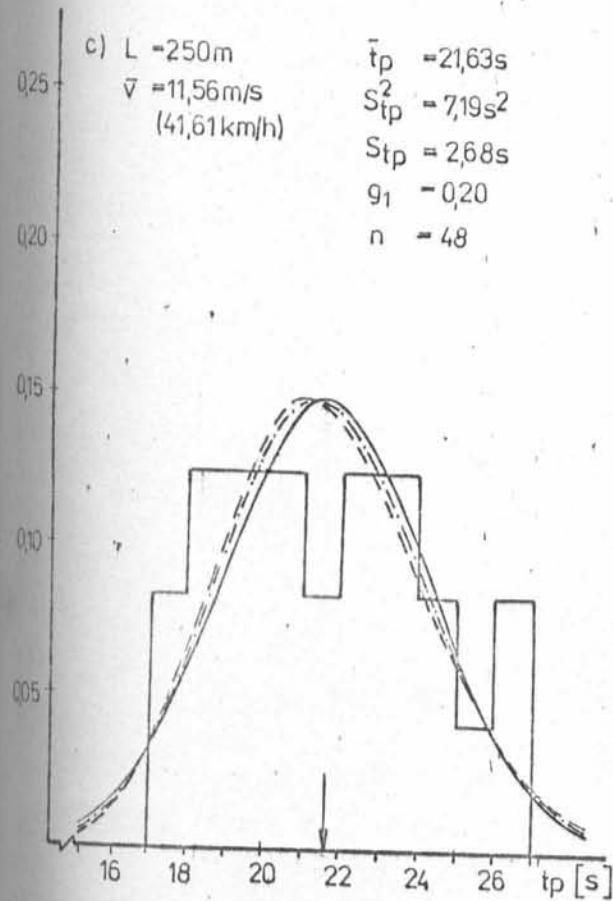
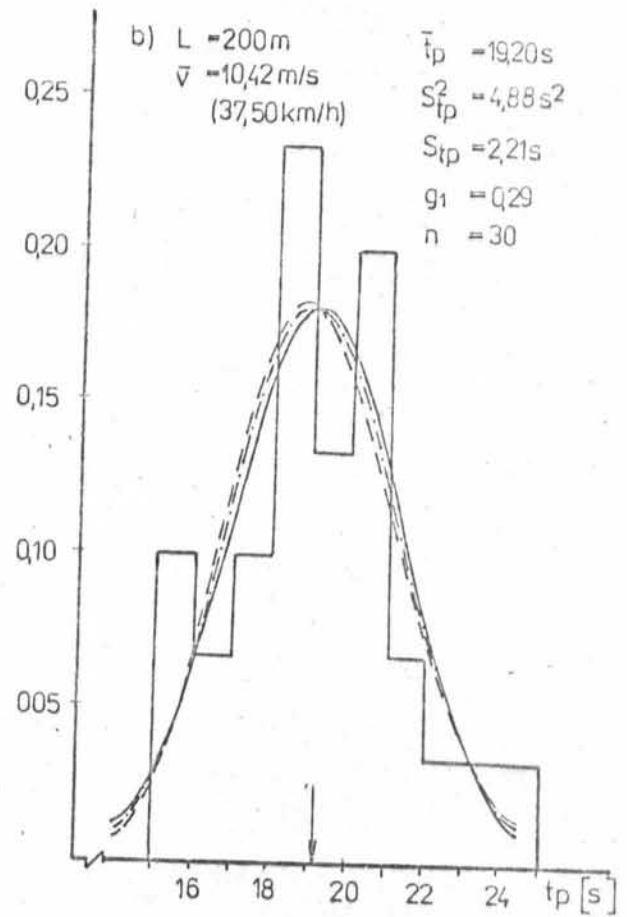
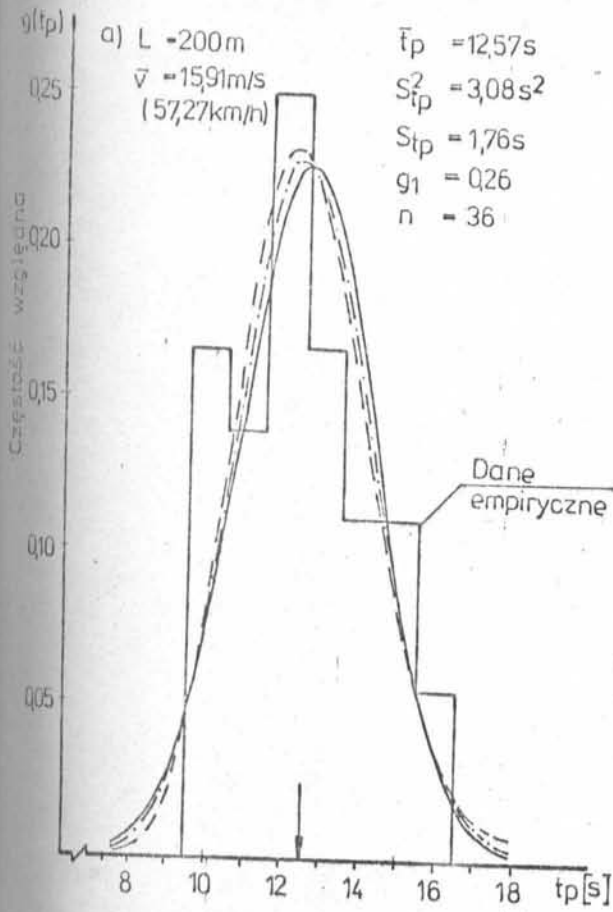
Rys. 3.3. - cd.

Samochody ciężarowe dojeżdżające do linii stop podczas światła zielonego.

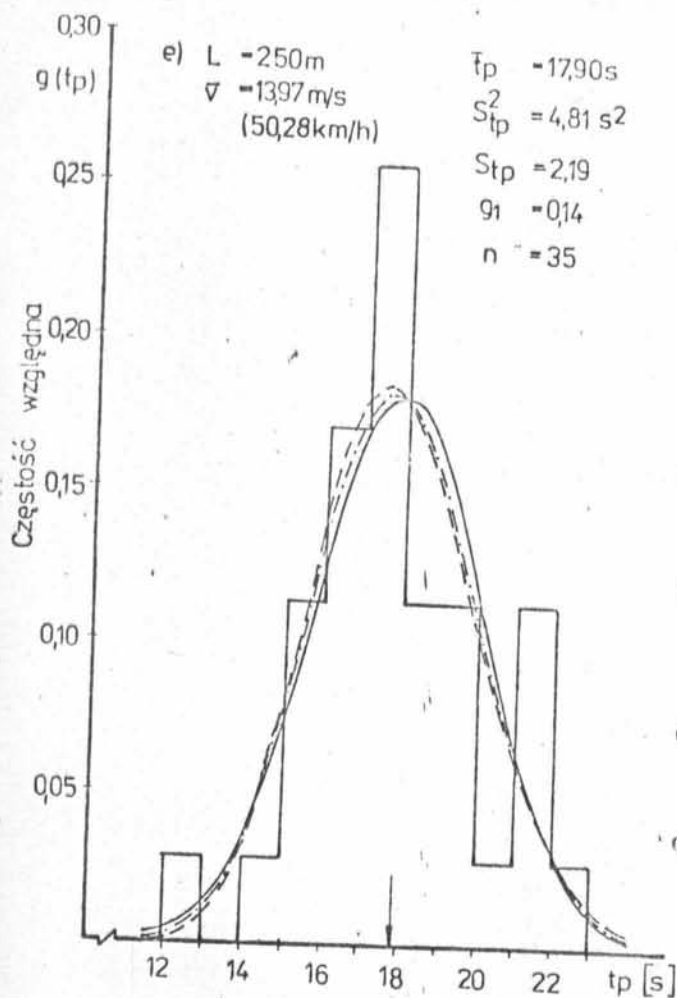
— r. normalny

- - - r. log. normalny

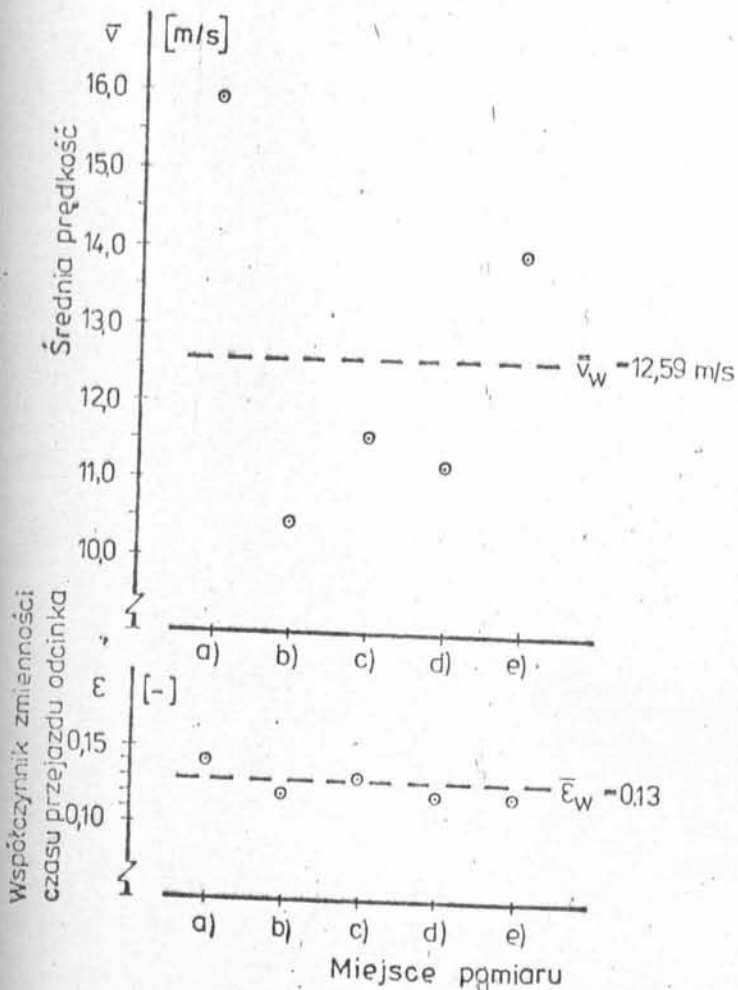
- · - · r. gamma



rys. 3.4. Rozkłady częstości występowania czasów przejazdu odcinka wlotowego na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną



- a/ s: Opolska-Wyki-Wolasa
w: Opolska /od Lokietka/
4.06.81
- b/ s: Kijowska-Dzierżyńskiego
w: Kijowska /od Nawojki/
6.07.81
- c/ s: Kijowska-Kazimierza
Wielkiego
w: Kijowska /od Wrocławskiej
4.07.81
- d/ s: Koniewa-Nawojki-Plastow
ska
w: Nawojki 8.07.81
- e/ s: Kamińskiego-Gwardii Lu
dowej
w: Kamińskiego /od Wielic
kiej/ 8.07.81



Rys. 3.4. - cd.

wlocie, obliczono średnie ważone prędkości \bar{v}_w biorąc pod uwagę \bar{v} z różnych skrzyżowań. Okazało się, że w grupie pojazdów dojeżdżających do linii stop podczas sygnału zielonego samochody osobowe posiadały \bar{v}_w większą o ok. 2 m/s od samochodów ciężarowych, a przy dojeździe do linii stop podczas sygnału czerwonego o ok. 1,7 m/s. Wartości współczynnika zmienności $\bar{\epsilon}$ czasów przejazdu odcinka zarejestrowanych na różnych skrzyżowaniach były bardzo zbliżone /rys. 3.3 i 3.4/. Średni ważony współczynnik zmienności $\bar{\epsilon}_w$ otrzymano praktycznie taki sam w odniesieniu do samochodów osobowych / $\bar{\epsilon}_w = 0,14$ / i ciężarowych / $\bar{\epsilon}_w = 0,13$ /, co wskazuje na podobny rozrzut względem średniej czasów przejazdu w obu tych grupach pojazdów.

Dla określenia postaci rozkładu czasów przejazdu t_p odcinka wlotowego wstępnie jako hipotetyczne rozkłady, przyjęto; rozkład normalny, rozkład logarytmo-normalny i rozkład gamma. Sprawdzenia zgodności rozkładów empirycznych z każdym z przyjętych rozkładów hipotetycznych dokonano za pomocą testu zgodności λ - Kołmogorowa [6], [47], wykonując obliczenia statystyczne na maszynie cyfrowej. Wyniki testów zgodności zestawiono w tablicach 3.1 + 3.4 zamieszczonych w aneksie. We wszystkich rozważanych przypadkach, dla hipotetycznych rozkładów; normalnego, logarytmo-normalnego i gamma otrzymane wyniki wskazują, że nie ma podstaw do odrzucenia postawionych hipotez. Z uwagi na nieznaczne różnice między tymi rozkładami, określonymi dla każdej z prób /rys. 3.3 i 3.4 oraz w aneksie rys. 3.3 i 3.4/, ostatecznie do opisu czasu przejazdu odcinka wlotowego przyjęto rozkład normalny o funkcji gęstości prawdopodobieństwa danej wzorem:

$$f_{T_p} / t_p / = \frac{1}{\sigma_{t_p} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \frac{1}{2} \left[\frac{t_p - \bar{t}_p}{\sigma_{t_p}} \right]^2 \right\} \quad /3.20/$$

gdzie: \bar{t}_p - wartość oczekiwana zmiennej losowej t_p ,
 σ_{t_p} - odchylenie standardowe zmiennej losowej t_p .

Za przyjęciem tego rozkładu przemawiała nie tylko stosunkowo duża łatwość posługiwania się nim, ale także duża symetria rozkładów danych empirycznych /małe wartości współczynnika skośności g_1 /.

Istniejący związek między zmiennymi losowymi czasu przejazdu odcinka drogi i prędkości jazdy, umożliwia określenie również postaci rozkładu prędkości na odcinku wlotowym skrzyżowania o długości L .

Przyjmijmy oznaczenia:

T_p - zmienna losowa czasu przejazdu odcinka o rozkładzie normalnym $N/\bar{t}_p, \sigma_{t_p}$ / o funkcji gęstości danej równaniem /3.20/,

$L = \text{const}$ - długość odcinka wlotowego,

$V = \frac{L}{T_p}$ - zmienna losowa prędkości pojazdów v .

Związek między V i T_p jest wzajemnie jednoznaczny - określony za pomocą funkcji malejącej $V = L/T_p$, stąd, jeżeli V przyjmie wartości mniejsze od pewnego określonego v , to T_p przyjmie z kolei wartości większe od odpowiedniej wartości czasu przejazdu $t_p = \frac{L}{v}$.

Na podstawie związków dotyczących dystrybuanty rozkładu mamy:

$$F_{V/v} = P/V \leq v = P/T_p \geq t_p = \frac{L}{v} = 1 - P/T_p \leq \frac{L}{v} =$$

$$= 1 - F_{T_p} / \frac{L}{v} - P/T_p = \frac{L}{v} = 1 - F_{T_p} / \frac{L}{v}$$

gdzie: $F_{V/v}$ - dystrybuanta zmiennej losowej V ,

F_{T_p} / t_p - dystrybuanta zmiennej losowej T_p ,

$P/T_p = \frac{L}{v}$ - prawdopodobieństwo, że zmienna losowa T_p przyjmie wartość $\frac{L}{v}$ /ponieważ T_p jest zmienną losową typu ciągłego, to $P/T_p = \frac{L}{v} = 0$ /.

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej V będzie:

$$\begin{aligned}
 f_{V/v} &= \left| \frac{d}{dv} F_{V/v} \right| = \left| \frac{d}{dv} /1 - F_{T_p} / \frac{L}{v} / \right| = \\
 &= \left| - \frac{d}{dv} F_{T_p} / \frac{L}{v} / \right| = \left| \frac{d}{dv} F_{T_p} / \frac{L}{v} / \cdot \frac{d}{dv} / \frac{L}{v} / \right| = \\
 &= \frac{d}{dv} F_{T_p} / \frac{L}{v} / \cdot \left| \frac{d}{dv} / \frac{L}{v} / \right| = f_{T_p} / \frac{L}{v} / \cdot \left| \frac{d}{dv} / \frac{L}{v} / \right| \quad /3.21/
 \end{aligned}$$

Na podstawie /3.20/ mamy:

$$f_{T_p} / \frac{L}{v} / = \frac{1}{\sigma_{t_p} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left\{ - \frac{1}{2} \left[\frac{\frac{L}{v} - \bar{t}_p}{\sigma_{t_p}} \right]^2 \right\} \quad /3.22/$$

Obliczając; $\frac{d}{dv} / \frac{L}{v} / = - \frac{L}{v^2}$ i podstawiając razem z /3.22/ do /3.21/ ostatecznie otrzymamy:

$$f_{V/v} = \frac{L}{v^2 \sigma_{t_p} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left\{ - \frac{1}{2} \left[\frac{\frac{L}{v} - \bar{t}_p}{\sigma_{t_p}} \right]^2 \right\} \quad /3.23/$$

gdzie: $f_{V/v}$ - funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej V /prędkości jazdy na odcinku wlotowym do skrzyżowania/ w sytuacji, gdy czas przejazdu odcinka wlotowego opisano rozkładem normalnym $N/\bar{t}_p, \sigma_{t_p} /$,

L - długość rozważanego odcinka wlotowego,

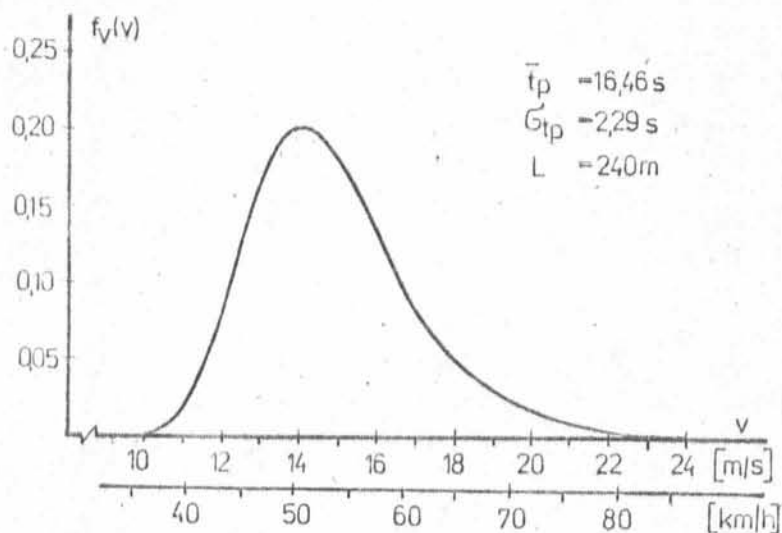
\bar{t}_p - średni czas przejazdu odcinka L ,

σ_{t_p} - odchylenie standardowe czasów przejazdu odcinka L .

Wykres funkcji gęstości prawdopodobieństwa prędkości na odcinku wlotowym, danej równaniem /3.23/ przedstawiono na rys. 3.5.

Maksimum przyjmuje ona dla:

$$v^* = \frac{L / \sqrt{t_p^2 + 8 \sigma_{t_p}^2} - \bar{t}_p}{4 \cdot \sigma_{t_p}^2}$$



Rys. 3.5. Rozkład prędkości na odcinku wlotowym skrzyżowania w sytuacji gdy czas przejazdu tego odcinka opisano rozkładem normalnym $N/\bar{t}_p, \sigma_{t_p}/$

Kształt rozkładu prędkości jest charakterystyczny dla kierowcy, przy pokonywaniu których kierowcy odczuwają respekt - są mniej niebezpieczne niż się wydaje, a kierowcy znający skrzyżowanie przejeżdżają je szybciej.

3.3. Długości statyczne pojazdów na wlocie skrzyżowania

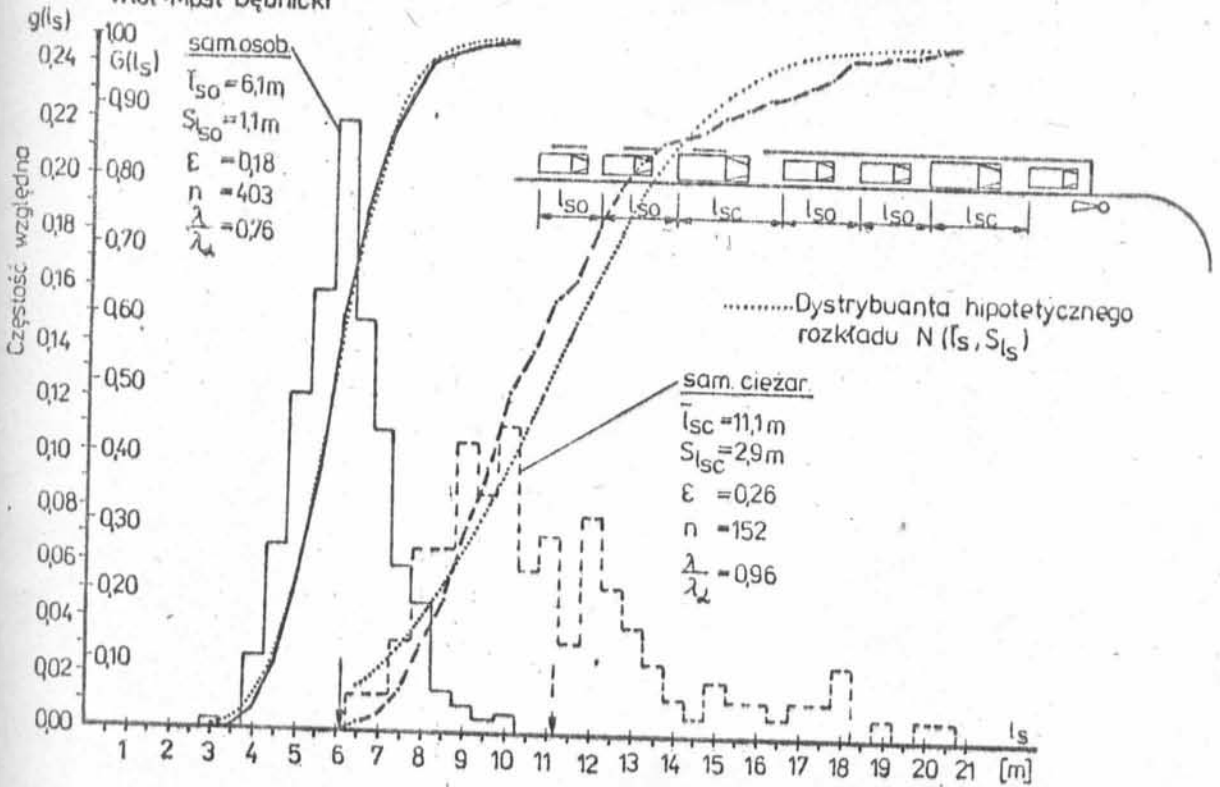
Dla prawidłowego modelowego odwzorowania procesu tworzenia się na wlocie skrzyżowania kolejek potrzebna jest znajomość również parametrów określających kolejkę. Jednym z takich parametrów jest długość statyczna pojazdu oczekującego w kolejce podczas trwania sygnału czerwonego, ujęta jako odległość między tyłami kolejnych pojazdów pozostających w bezruchu. Długości statyczne poszczególnych pojazdów bezpośrednio rzutują na wielkość kolejki wyrażoną w jednostkach długości, a ta z kolei stanowi w modelu podstawę ustalenia, czy kolejny pojazd dojedzie do kolejki czy

też nie. Długość kolejki wyrażona w metrach, również w toku projektowania skrzyżowań, w decydujący sposób wpływa na obliczenie wymaganej długości strefy akumulacji. Przyjmowana zaś w projektowaniu, wg Wytycznych projektowania ulic /1982 r./, długość stanowiska pojazdu umownego w kolejce na wlocie skrzyżowania 5,6 m wydaje się być zbyt mała w stosunku do obserwowanych w rzeczywistości. W związku z tym na wlotach dwóch skrzyżowań w Krakowie przeprowadzono pomiary długości statycznych pojazdów w kolejce z rozbięciem na stanowiska zajmowane przez samochody osobowe i samochody ciężarowe. Oddzielnie rozważano stanowisko pierwszego pojazdu w kolejce rejestrując usytuowanie przodu pojazdu względem linii stop oraz odległość jego tyłu od tej linii.

Rozkłady częstości występowania długości stanowisk l_s pojazdów w kolejce oraz dystrybuanty zmiennej losowej l_s przedstawiono na rys. 3.6, 3.7 i 3.8. W odniesieniu do samochodów osobowych średnia długość stanowiska w kolejce, z wyłączeniem pierwszego pojazdu, wynosiła $\bar{l}_{so} = 6,1$ m na obu skrzyżowaniach /rys. 3.6/, zaś dla samochodów ciężarowych $\bar{l}_{sc} = 11,1$ i $10,7$ m. Współczynnik zmienności ξ długości stanowisk przyjmował przy tym wartości; dla samochodów osobowych $\xi = 0,18$ i $0,15$ a dla samochodów ciężarowych $\xi = 0,26$ i $0,23$. Średnie odległości tyłu pierwszego pojazdu w kolejce od linii stop /rys. 3.7/ w przypadku samochodów osobowych wynosiły $\bar{l}_{so}^o = 5,3$ i $5,0$ m / $\xi = 0,24$ i $0,21$ / a w przypadku samochodów ciężarowych $\bar{l}_{sc}^o = 10,6$ i $10,2$ m / $\xi = 0,29$ i $0,22$ /.

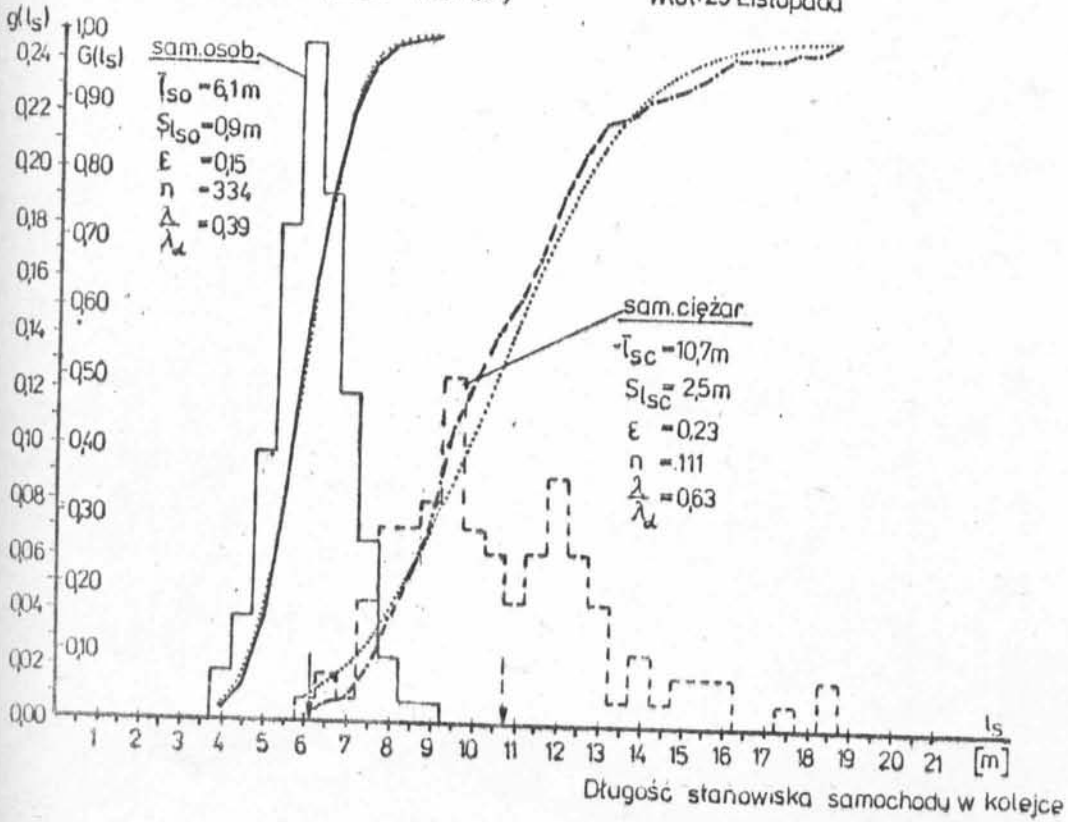
Odnosnie usytuowania przodu pierwszego pojazdu w kolejce względem linii stop /rys. 3.8/ stwierdzono, że średnio pojazdy zatrzymywały się w odległości $\bar{x}_o = 1,0$ m przed linią stop / $\xi = 1,25$ /, przy czym w ok. 25% przypadków obserwowano przekraczanie linii stop przodem pojazdu /do ok. 2,5 m/.

Skrzyżowanie Krasńskiego - Zwierzyniecka - Most Dębnicki - Kościuszki
 Włot: Most Dębnicki

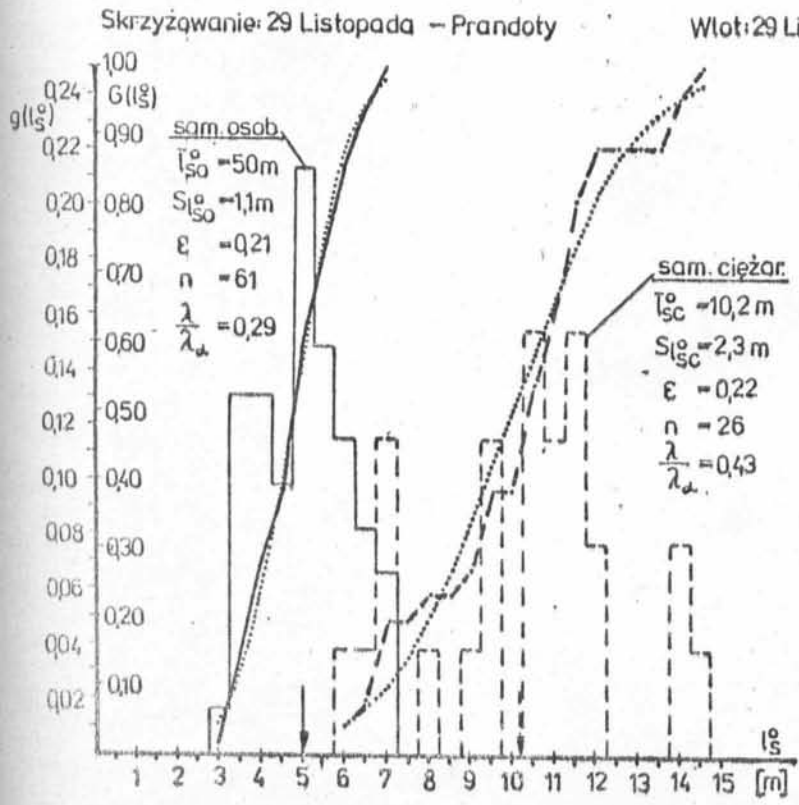
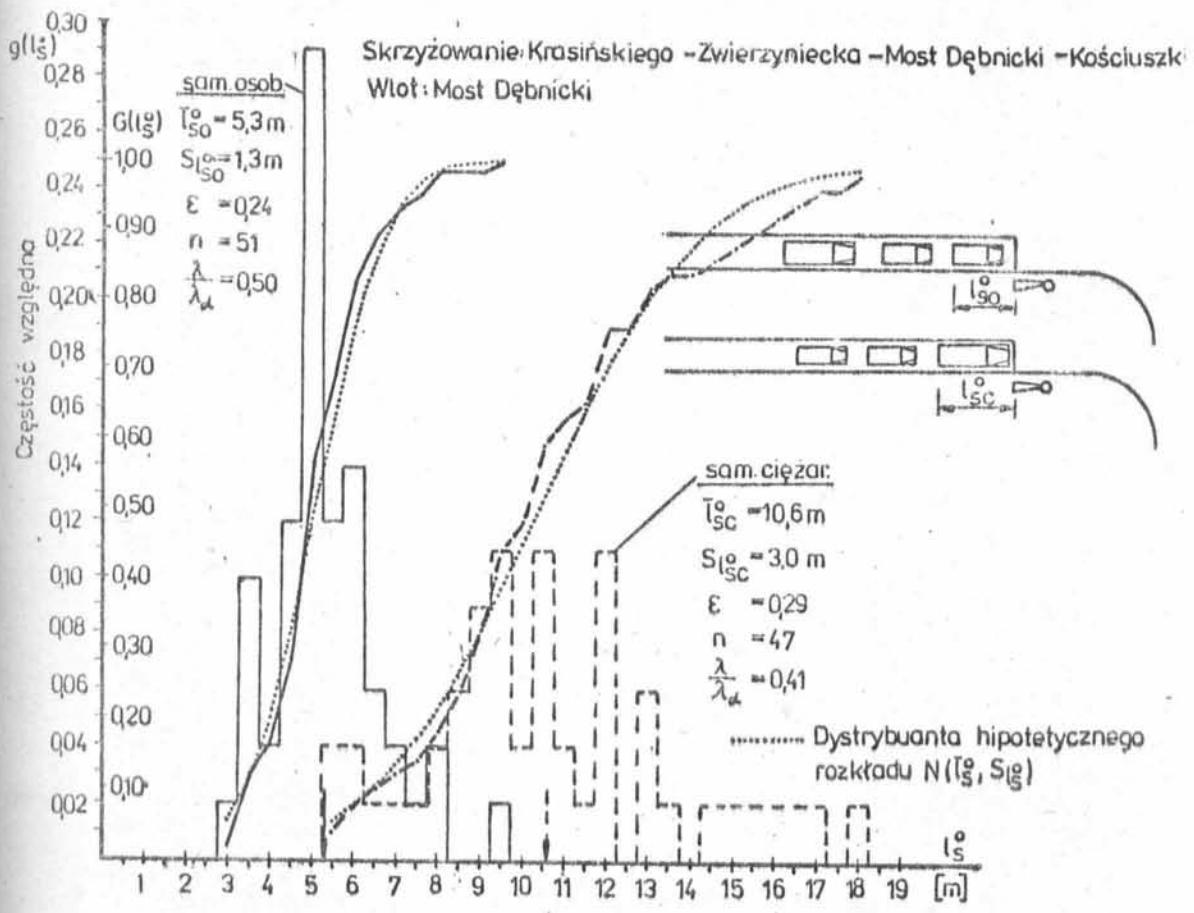


Skrzyżowanie 29 Listopada - Prandoty

Włot: 29 Listopada



Rys. 3.6. Rozkłady częstości względnych obserwowanych długości stanowisk samochodów w kolejce na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją



Rys. 3.7. Rozkłady częstości względnych obserwowanych odległości tyłu pierwszego samochodu w kolejce od linii stop

5,6 m jest niewłaściwe. Wielkość ta dla samochodu osobowego wynosi średnio 6,1 m a dla samochodu ciężarowego 10,9 m. Dla pierwszego stanowiska wartości te są mniejsze odpowiednio o ok. 0,9 m i 0,5 m.

3.4. Ruszanie pojazdów w kolejce po zapaleniu się sygnału zielonego

Przestrzenna analiza startu pojazdów w kolejce po zapaleniu się sygnału zielonego wykazała, że kolejne pojazdy w miarę oddalania się od linii stop ruszają z coraz większym opóźnieniem w stosunku do momentu zmiany sygnałów. Spowodowane to jest tym, że kierowcy, szczególnie ci na dalszych pozycjach w kolejce, reagują nie tylko na samą zmianę sygnałów ale także na zachowanie się ich poprzedników. Fakt ten sprawia, że faktyczny, bezwzględny czas reakcji na zapalenie się sygnału zielonego wzrasta wraz z pozycją pojazdu w kolejce. Problem opóźnienia ruszających pojazdów względem poprzedników jest istotny dla modelowego ujęcia przebiegu ruchu na skrzyżowaniu. Jego znajomość umożliwia bowiem określanie każdorazowo po zmianie sygnałów, czasu w jakim cała kolejka znajdzie się w ruchu. Jest to ważne dla ustalenia, czy pojazd dojeżdżający do skrzyżowania dołączy do powstałej z kolejki kolumny pojazdów czy też powiększy stan kolejki.

Pomiary czasów ruszenia kolejnych pojazdów przy rozładowywaniu się kolejek na wlotach przeprowadzono na 4-ch skrzyżowaniach. Rejestrowano, przy użyciu stoperów i formularzy pomiarowych, czasy ruszenia kolejnych pojazdów względem pojazdu pierwszego. Reakcję pierwszego pojazdu w kolejce na zmianę sygnałów z czerwonego na zielony rozważano oddzielnie. Pojazd znajdujący się na pierwszej pozycji reaguje nie tylko na moment zmiany sygnałów. Wpływ na jego decyzję ruszenia ma również długość czasu przejściowego między zakończoną fazą i aktualnie rozpoczynającą się, oraz

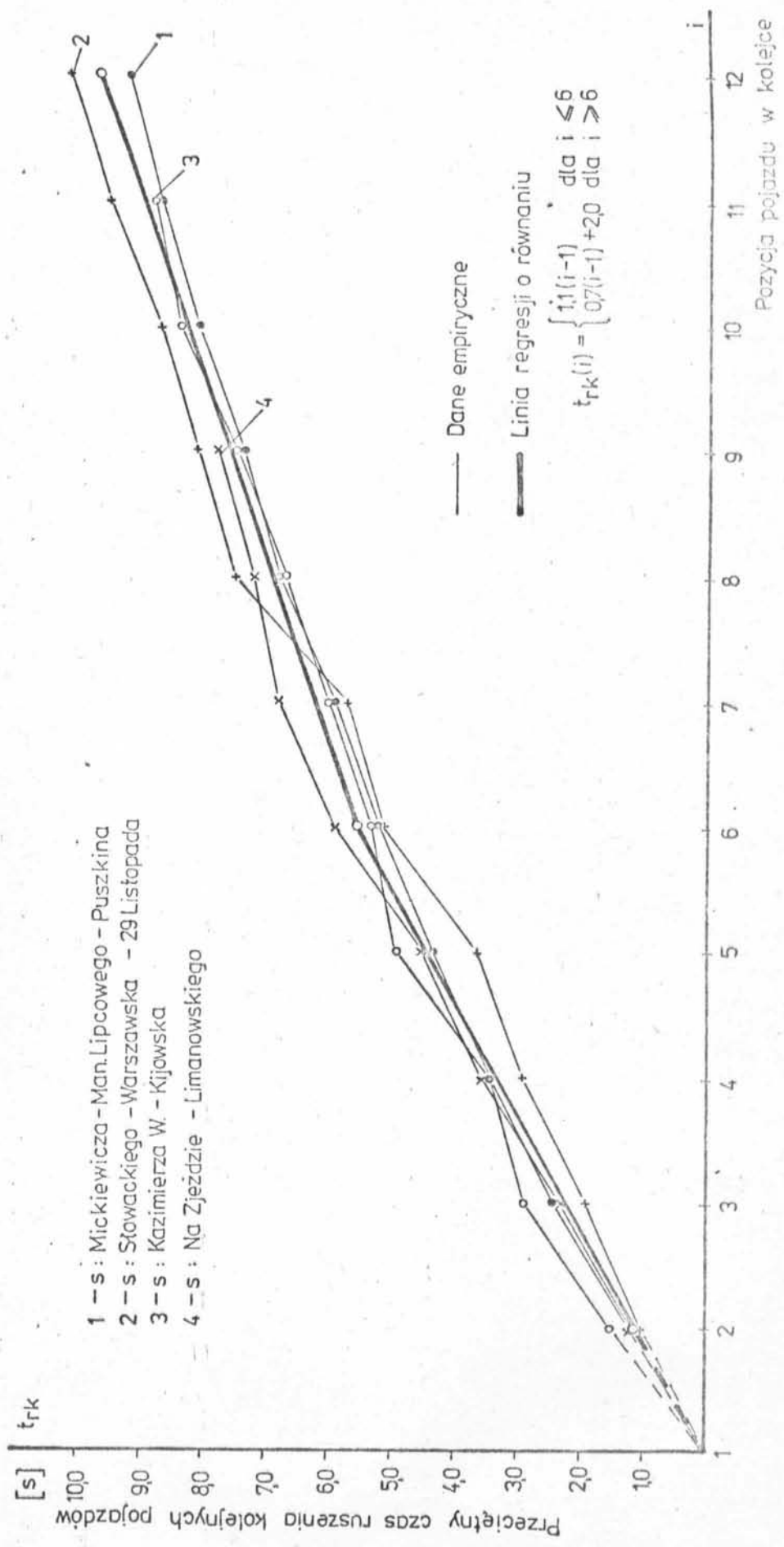
czas trwania sygnału czerwono-żółtego. Okazuje się bowiem [4], [21], że częstotliwość ruszeń pojazdów, zanim zapali się sygnał zielony /przedczesnych startów/, rośnie szybko wraz ze zwiększającymi się czasami trwania okresu przejściowego jak i sygnału czerwono-żółtego. Przy trwającym 2 sekundy sygnale czerwono-żółtym na skrzyżowaniach, na których przeprowadzono pomiary, pojazd ruszał średnio 0,8 sekundy po zapaleniu się sygnału zielonego. Przeciętne czasy ruszania kolejnych pojazdów względem pierwszego naniesiono na wykres /rys. 3.9/. Dane te, mimo, że uzyskane z różnych skrzyżowań, wykazują niewielki rozrzut. Poza tym daje się zauważyć, że pierwsze pojazdy /do 6-tego/ potrzebują więcej czasu na ruszenie niż dalsze. Odstępy czasowe między momentami ruszeń kolejnych pojazdów, biorąc pod uwagę dwa zakresy kolejki do 6-tego stanowiska i powyżej, pozostają praktycznie stałe. Oporając się na powyższych spostrzeżeniach wyznaczono równanie regresji dla przeciętnego czasu ruszenia kolejnych pojazdów w funkcji pozycji zajmowanej przez te pojazdy w kolejce:

$$t_{rk}/i/ = \begin{cases} 1,1 /i-1/ & \text{dla } i \leq 6 \\ 0,7 /i-1/ + 2,0 & \text{dla } i \geq 6 \end{cases} \quad /3.24/$$

Czas ruszenia i -tego pojazdu w kolejce obliczony z równania /3.24/ oznacza moment ruszenia tego pojazdu z zajmowanej pozycji względem ruszenia pojazdu na stanowisku pierwszym. Z uwagi na znaczne trudności z precyzyjnym określeniem w czasie pomiaru samego momentu ruszenia pojazdu, wyznaczone tu zależności mają charakter przybliżony.

3.5. Odstępy czasowe między pojazdami na linii stop

Odstępy czasowe, w jakich pojazdy z kolejki na wlocie skrzyżowania przekraczają linię stop mają decydujący wpływ na przepu-



Rys. 3.9. Przeciętne czasy ruszenia kolejnych pojazdów względem pierwszego pojazdu przy rozładowaniu kolejki w czasie swątku zielonego

stowość wlotu. Wartości tych odstępów, będących jednym z najważniejszych parametrów ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją, podaje szereg prac [12], [22], [37], [43], [49], [69], [76], [77], [81], wskazując równocześnie czynniki, które mogą decydować o ich wielkości. Z uwagi na prowadzenie pomiarów /których wyniki przytaczają w.wym. prace/ w różnych warunkach, wartości odstępów różnią się w pewnym zakresie; szczególnie dotyczy to czasu, jaki potrzebuje do przejechania linii stop pierwszy pojazd. W tym przypadku niektórzy autorzy wykazują, że przeciętny czas przekroczenia linii stop przez pierwszy pojazd jest zawsze większy od dowolnego następnego odstępu między pojazdami [43], inni zaś, że znacznie mniejszy [49]. Poza tym ujmowanie przez jednych autorów niektórych czynników, a przez innych nie, jak również zachodzące w czasie zmiany ruchu powodują, że bezpośrednie opieranie się na publikowanych wynikach badań - w przeważającej mierze zagranicznych - bez potwierdzenia ich przydatności do danego celu, może prowadzić do błędnych rezultatów. Z uwagi na pierwszoplanowe znaczenie w modelu ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją odstępów czasowych między pojazdami na linii stop, determinujących reżim obsługi pojazdów, postanowiono przeprowadzić pomiary w tym zakresie.

Pomiary wykonano na 9 poligonach, wg zestawienia na rys. 3.10.a starając się dobrać skrzyżowania o zróżnicowanym charakterze ruchu. Pomiary realizowane były zasadniczo dwiema metodami:

- przy zastosowaniu aparatury filmowej, oraz
- przy użyciu stoperów dwuwskażówkowych.

Pomiary filmowe wykonywane były kamerą elektryczną ADMIRA 16 A - ELECTRIC, której pracą sterował elektroniczny generator impulsów, /tzw. technika fotografii poklatkowej/ umożliwiającą przesuw taśmy z prędkością $v = 3, 2, 1, 0.2, 0.5$ kl/s. Odstęp czasowy Δt

między kolejnymi pojazdami obliczano przy tym ze wzoru:

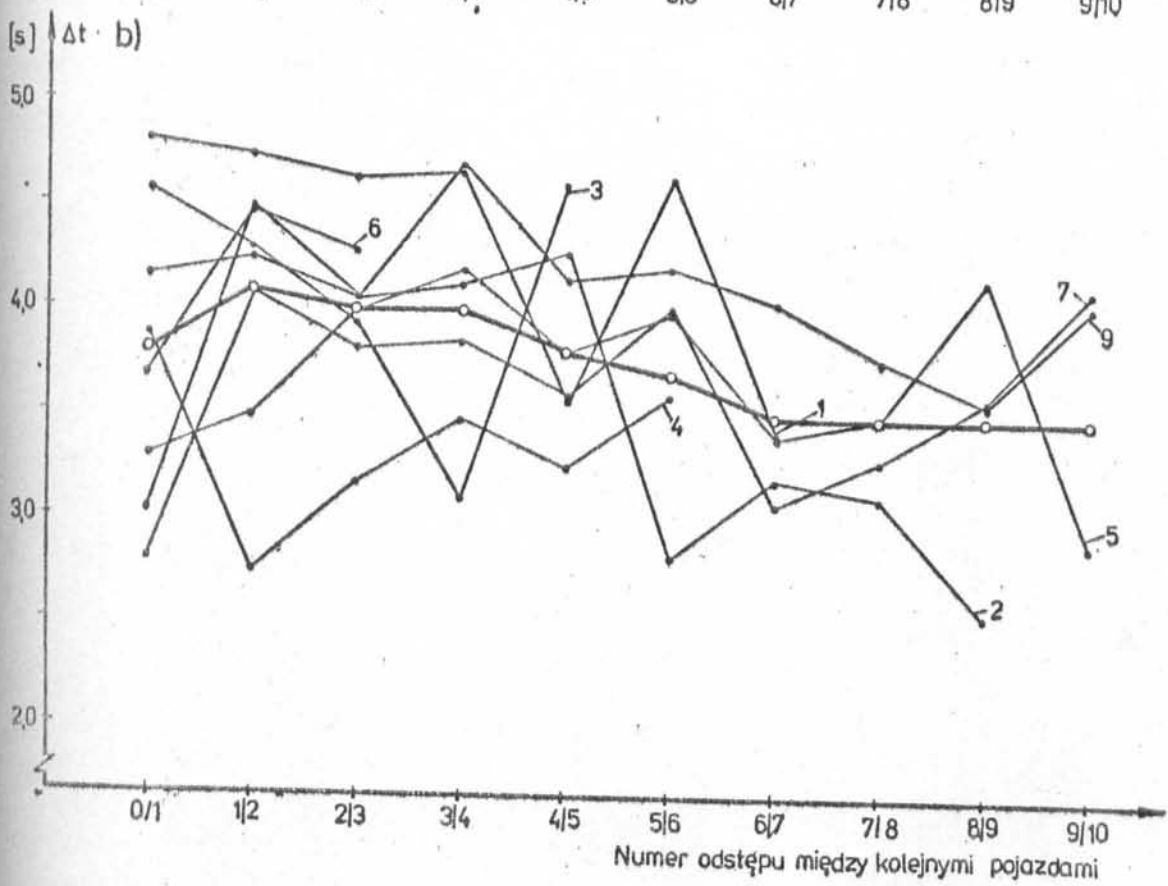
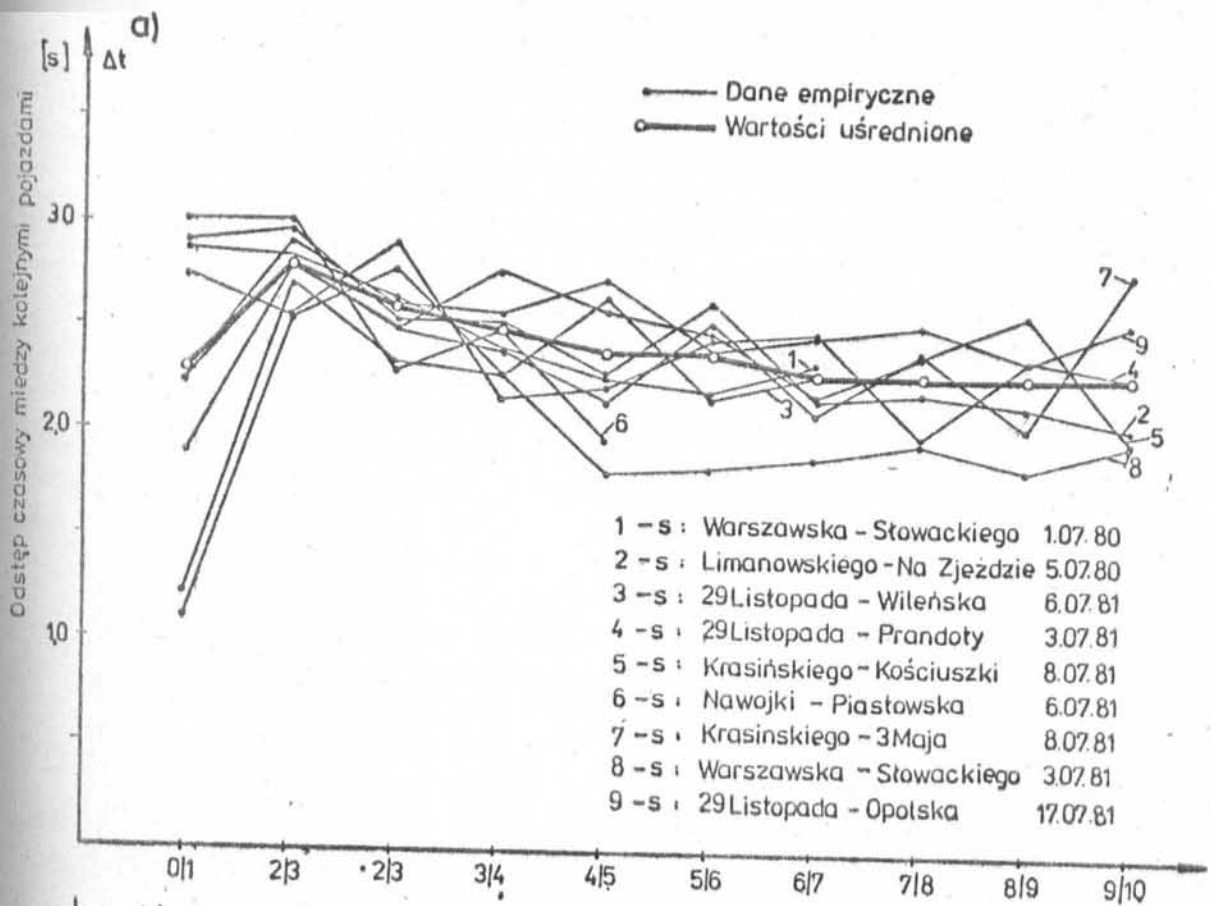
$$\Delta t = (N_{i+1} - N_i) \cdot v^{-1} \quad /3.25/$$

- gdzie: N_{i+1} - numer klatki filmu z utrwalonym momentem przejazdu pojazdu $i + 1$ przez linię stop,
 N_i - numer klatki filmu z utrwalonym momentem przekroczenia linii stop przez i -ty pojazd,
 v - prędkość przesuwu taśmy filmowej [kl/s].

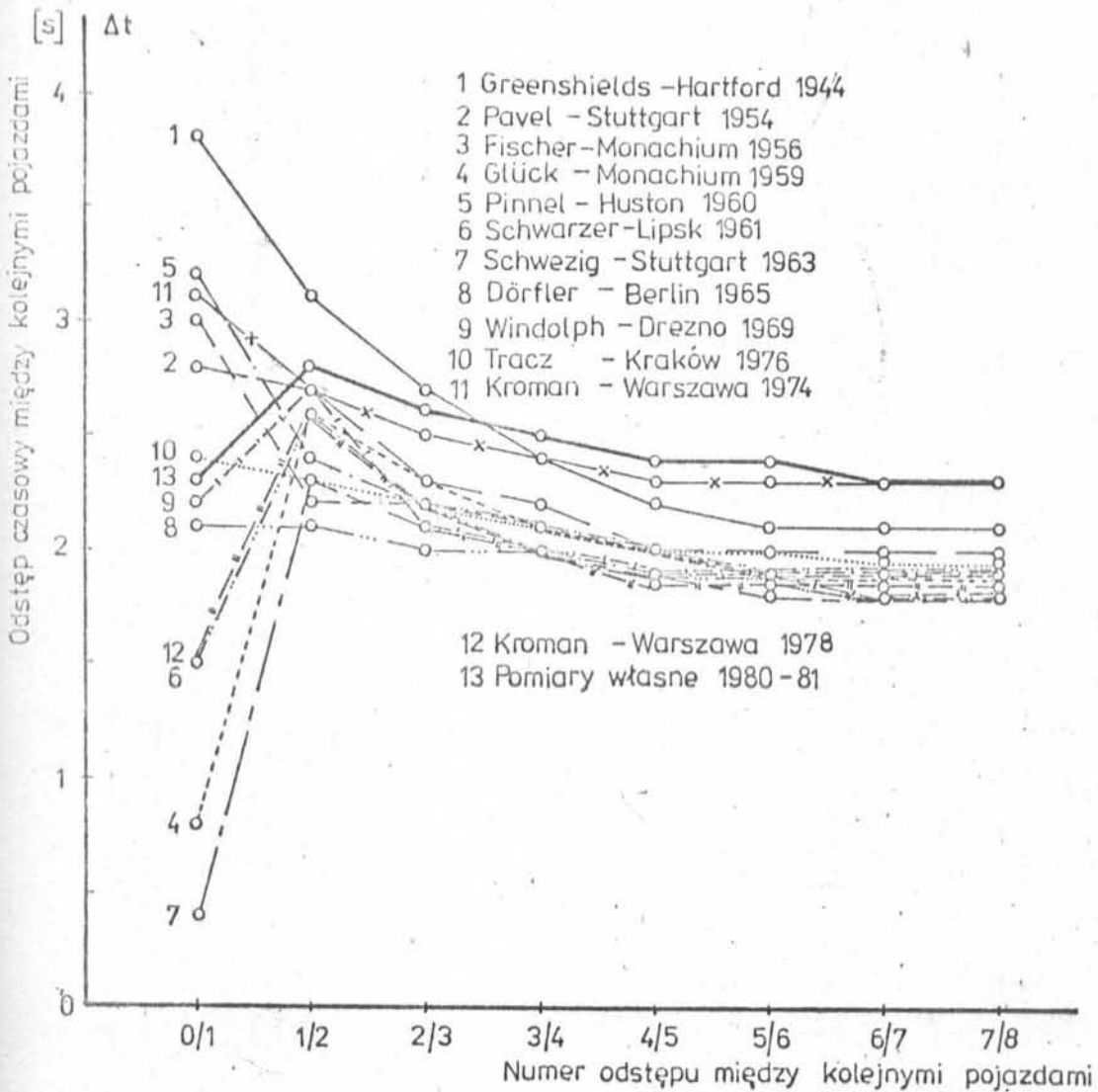
Za czas przekroczenia linii stop przez dany pojazd z kolejki uznawano w trakcie pomiarów lub analizy filmów moment, w którym tył pojazdu znalazł się nad linią zatrzymań. Odrębnie rejestrowano odstępy, po których linię stop przejeżdżały samochody osobowe a odrębnie ciężarowe. Nie uwzględniano wpływu rodzaju pojazdu poprzedzającego dany odstęp na wielkość tego odstępu. Przeciętne odstępy czasowe między pojazdami znajdującymi się na kolejnych pozycjach w kolejce przedstawiono na rys. 3.10. Opracowaniem objęto kolumny pojazdów do 10-tego włącznie. Dane dotyczące dalszych odstępow odrzucono z uwagi na zbyt małe liczebności prób lub zbyt dużą wariancję pojedynczych danych w próbie. Praktycznie zresztą średnie odstępy, począwszy od 6-tego pojazdu, są stałe.

Dla porównania uzyskanych rezultatów dotyczących samochodów osobowych z wynikami pomiarów innych badaczy, sporządzono wykres zbiorczy, który przedstawiono na rys. 3.11. Stosunkowo duże wartości odstępow czasowych / w porównaniu z innymi/ jakie uzyskano w pomiarach własnych, można tłumaczyć faktem nieuwzględniania wpływu rodzaju pojazdu poprzedzającego dany odstęp /o zakwalifikowaniu odstępu czasowego do grupy samochodów osobowych decydował rodzaj pojazdu zamykającego dany odstęp/.

Przeprowadzono również analizę rozkładów odstępow czasowych oddzielnie dla każdej pary kolejnych pojazdów w kolumnie. Rezultaty uzyskane dla wybranych skrzyżowań przedstawiono w aneksie na



Rys. 3.10. Odstępy czasowe na linii stop zmierzone w Krakowie /1980-1981/;
a/ dla samochodów osobowych,
b/ dla samochodów ciężarowych



Rys. 3.11. Porównanie odstępów czasowych dla samochodów osobowych pomierzonych w różnych miastach

rys. 3.5 i 3.6. Jak okazuje się odstępów czasowe rozważane dla poszczególnych par pojazdów są zmiennymi o rozkładach zbliżonych do rozkładu normalnego. Zestawienie wykresów współczynników zmienności ξ z różnych skrzyżowań wskazuje, że największy rozrzut wartości odstępów czasowych, względem wartości średniej, występuje dla pierwszego pojazdu w kolejce. Odstępy między kolejnymi pojazdami na dalszych pozycjach wahają się w mniejszym zakresie /dla s.o. - $\xi = 0,28 + 0,42/$. W sumie jednak analiza ta wskazuje

na zmienność wartości odstępów czasowych dla każdej z par kolejnych pojazdów w dość znacznym zakresie. Tym samym i przepustowość pasa ruchu /wlotu/, zdeterminowana w głównej mierze przez odstępy czasowe między pojazdami w kolumnach powstałych z kolejek, będzie ulegać zmianom. Przepustowość nie przyjmuje więc, nawet w konkretnie określonych warunkach ruchowo-geometrycznych, stałej wartości.

Opierając się na średnich wartościach odstępów czasowych między pojazdami można określić przeciętny czas potrzebny do wjazdu n pojazdów z kolejki. Można to zrobić korzystając z wartości średnich odstępów czasowych podanych na rys. 3.10, lub idąc na dalsze uproszczenia, określić zależności regresyjne między czasem potrzebnym do wjazdu i-tego pojazdu z kolejki a jego pozycją w kolejce /rys. 3.12 i 3.13/. W wyniku przeprowadzonej analizy regresji otrzymano następujące równania liniowe:

- samochody osobowe:

$$t_i = 2,410 \cdot i + 0,169 \quad /3.26/$$

- samochody ciężarowe

$$t_i = 3,680 \cdot i + 0,795 \quad /3.27/$$

gdzie: t_i - czas potrzebny do wjazdu i-tego pojazdu z kolejki.

Dla mieszanej kolumny pojazdów, złożonej z samochodów osobowych i ciężarowych, można zapisać:

$$t_i = A + 2,410 \cdot i + 1,270 \cdot n_c \quad /3.28/$$

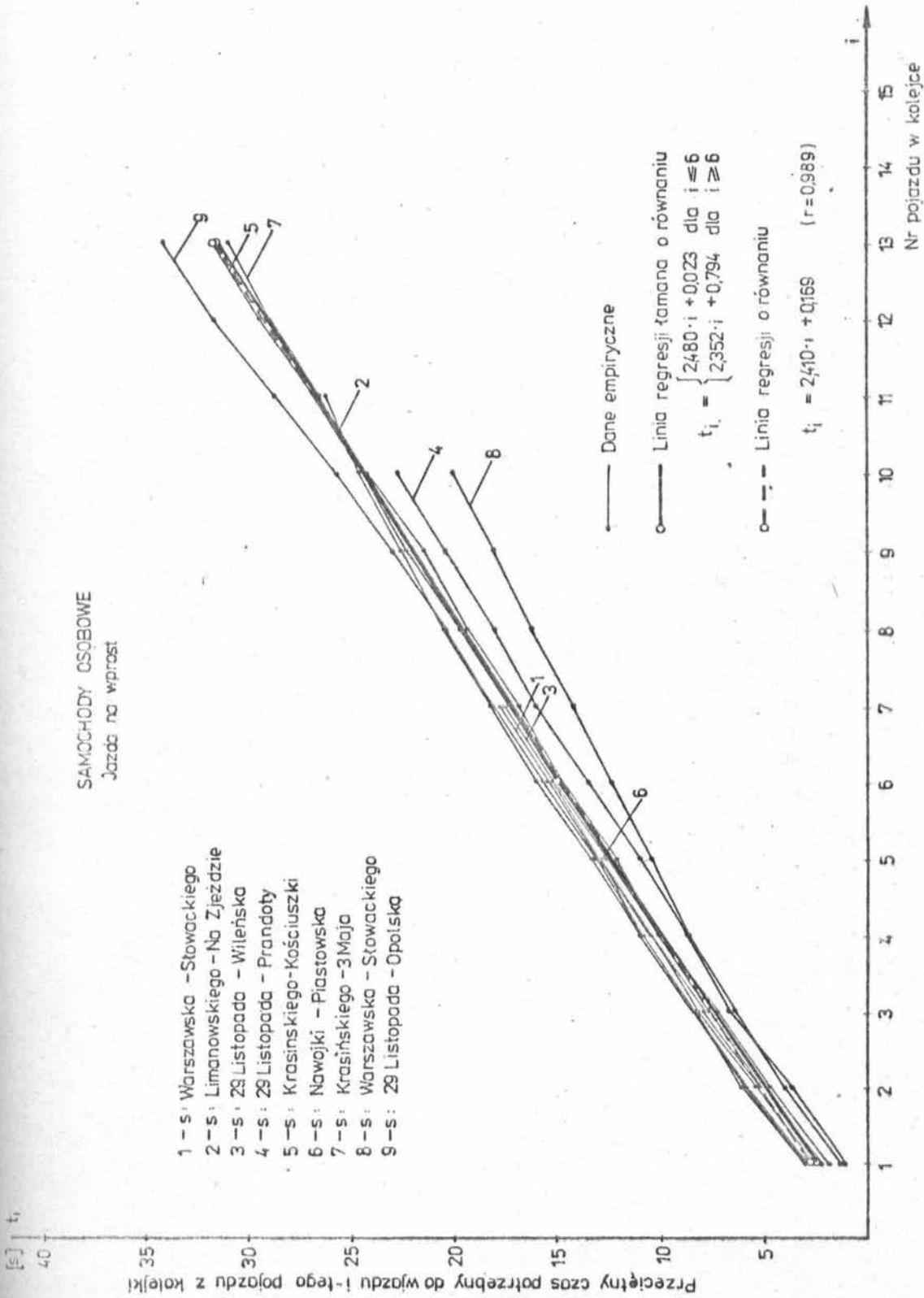
gdzie: A - stała, przyjmująca wartości: 0,169 - gdy na pierwszym miejscu w kolejce znajduje się samochód osobowy, oraz 0,795 - gdy jest to samochód ciężarowy,

n_c - ilość samochodów ciężarowych w kolumnie z wyłączeniem pojazdu na pierwszej pozycji,

pozostałe oznaczenia jak we wzorach /3.26/ i /3.27/.

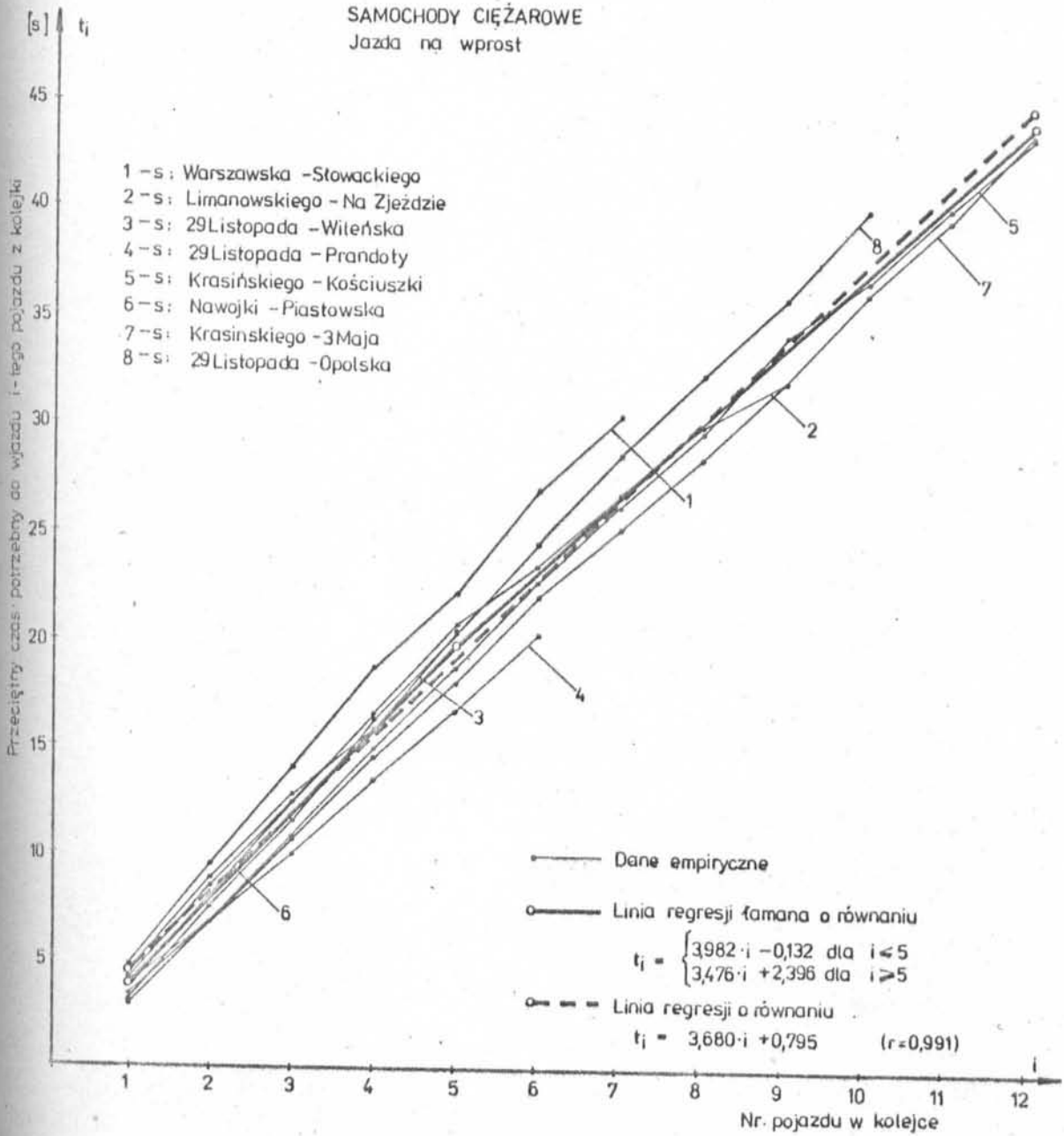
SAMOCCHODY OSOBOWE

Jazda na wprost



Rys. 3.12. Przeciętne czasy przejazdu linii stop przez samochody osobowe z kolejki na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją

SAMOCCHODY CIĘŻAROWE
Jazda na wprost



rys. 3.13. Przeciętne czasy przejazdu linii stop przez samochody ciężarowe z kolejki na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją

Na rys. 3.12 i 3.13 pokazano również łamane linie regresji, dokładniej dopasowane do danych empirycznych niż opisane równaniami /3.26/ i /3.27/ linie proste. Równania tych linii łamanych podano na rysunkach.

4. MODEL SYMULACYJNY NA EMC DO BADANIA WPLYWU WAHAŃ RUCHU NA EFEKTYWNOŚĆ STEROWANIA SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNĄ

Symulacja komputerowa polega na odtwarzaniu /modelowaniu/ rzeczywistych procesów bądź działań zachodzących w systemach przez specjalnie zaprogramowaną maszynę cyfrową. Numeryczne imitowanie działań skomplikowanych systemów pozwala na rozwiązywanie szeregu problemów bądź dokonywanie eksperymentów, niemożliwych do zrealizowania w rzeczywistych warunkach. Dzięki symulacji można uzyskiwać informacje o procesie bez potrzeby jego bezpośredniej obserwacji. Symulacja komputerowa, z uwagi na swoje zalety [16], [18], [24], [41], [48] znalazła szerokie zastosowanie w badaniach procesów ruchu drogowego [7], [13], [16], [18], [23], [27], [35], [41], [61], [69], [76], [77], będących złożonymi procesami stochastycznymi.

Poszczególne etapy badań symulacyjnych wymieniają szczegółowo prace [18], [24], [48], [77]. Najogólniej ujmując można podać jako główne etapy:

- tworzenie modelu matematycznego,
- zaprogramowanie modelu na maszynę cyfrową,
- sprawdzenie poprawności modelu,
- realizacja eksperymentów badawczych.

Etap pierwszy, zwany identyfikacją badanego obiektu czy systemu, jest najważniejszym i zarazem najtrudniejszym etapem badań symulacyjnych. Na etapie tym m.in. konieczne jest podjęcie decyzji odnośnie metody badania symulowanego systemu. Najczęściej stosowana jest dyskretna symulacja komputerowa [24], [41] w ramach której możliwe są dwa układy organizacyjne badań; kolejnych zdarzeń i stałego kroku. Według pierwszego z nich czas zegarowy przyjmuje wartości odpowiadające momentom wystąpienia

kolejnych zdarzeń w przyjętych punktach decyzji. W drugim zaś czas zegarowy zwiększa się o stałe przyrosty i w tak określonych chwilach następuje przegląd sytuacji w systemie. W przypadku skrzyżowań, gdzie szczególnie interesujące jest badanie stanów kolejek, a przy szacowaniu strat czasu nie uwzględnia się zmian prędkości pojedynczych pojazdów na odcinku wlotowym /opóźnianie, przyspieszanie/ dyskretna metoda kolejnych zdarzeń znajduje najczęściej zastosowanie.

Zaprogramowanie modelu na maszynę cyfrową jest zadaniem dosyć prostym, chociaż w przypadku dużych programów, przekraczających pojemność pamięci operacyjnej maszyny cyfrowej, sprawa znacznie się komplikuje. Etap ten stanowi zazwyczaj uzupełnienie wcześniejszego etapu tworzenia modelu, podczas którego opracowana zostaje matematyczno-logiczna sieć działań systemu. Pierwsze testowe przebiegi symulacyjne w fazie uruchamiania programu, wykazują zazwyczaj konieczność uzupełnienia jej o te elementy, które były trudne do przewidzenia na etapie tworzenia modelu.

Kolejnym i zarazem krytycznym etapem badań symulacyjnych jest sprawdzenie poprawności modelu. Zbadanie i udowodnienie poprawności modelu, jego adekwatności z systemem rzeczywistym jest, w przypadku symulacji procesów ruchu na skrzyżowaniu, zadaniem złożonym. Pamiętać bowiem trzeba, że właśnie powodem zastosowania symulacji numerycznej jest przede wszystkim fakt, że problem w sposób matematyczny jest trudny do rozwiązania. Zazwyczaj więc weryfikacja modelu polega na sprawdzeniu adekwatności jego elementów, przy czym jest to o tyle uzasadnione, że modelowanie przeważnie jest wykonywane w celu zbadania charakterystyk elementów systemu a nie jego całości. Najlepszym sposobem weryfikacji modelu ruchu jest porównanie końcowych wyników symulacji, a w przypadku procesów niestacjonarnych również zmian atrybutów

systemu jako funkcji czasu, z wynikami uzyskanymi w drodze bezpośrednich pomiarów na skrzyżowaniu.

Dla zrealizowania przedmiotowych badań wpływu wahań ruchu na efektywność sterowania sygnalizacją świetlną, opracowano model symulacyjny wlotu skrzyżowania z sygnalizacją świetlną o stałym programie. Zastosowano dyskretną symulację numeryczną z organizacją śledzenia zmian w modelu metodą kolejnych zdarzeń. Ponieważ przebieg ruchu na skrzyżowaniu odwzorowany może być jednoznacznie przez dokładne określenie procesu dopływu pojazdów oraz reżimu ich obsługi, opisane poniżej założenia i rozwiązania odnoszą się będą właśnie do tych procesów.

4.1. Odwzorowanie wahań ruchu w procesie zgłoszeń

Proces zgłoszeń, polegający na dojeżdżaniu pojazdów do określonego przekroju, jest częścią składową procesu dopływu pojazdów do wlotu skrzyżowania. Proces zgłoszeń realizowany jest w przekroju drogi, oznaczonym na rys. 4.1 nr I, znajdującym się poza zasięgiem wpływu kolejki, jaka ustawia się na wlocie przed linią zatrzymań. Proces ten, będący procesem stochastycznym, określony jest rozkładem odstępów czasu między kolejnymi pojazdami. W przypadku niestacjonarnego procesu zgłoszeń parametry tego rozkładu uzależnione są dodatkowo od czasu rzeczywistego, w jakim dany proces zachodzi. Ponieważ przyjęto, że proces zgłoszeń będzie faktycznie procesem stochastycznym stacjonarnym w przedziałach możliwe było zastosowanie dyskretnej symulacji. Istotą procesu zgłoszeń stanowi generowanie strumienia zgłoszeń wg przewidzianego rozkładu.

4.1.1. Generowanie strumienia zgłoszeń

W opracowanym modelu ruchu na wlocie skrzyżowania założono, że zgłoszenia pojazdów w przekroju I /rys. 4.1/ stanowią niejednorodny proces Poissona [54], [84]. Oznacza to, że liczba zgłoszeń zarejestrowanych w przedziale czasowym $[\tau, \tau + t/$ jest zmienną losową o rozkładzie Poissona, jednak parametr tego rozkładu jest funkcją nie tylko długości rozważanego przedziału, lecz także jego początku - chwili τ . Zgodnie z przyjętymi w wyniku badań empirycznych ustaleniami /p. 2.6/, odnośnie zmienności natężenia ruchu w czasie, w przedziałach, w których natężenie pozostaje stałe, proces będzie traktowany jako stacjonarny. Ogólnie zaś, w odniesieniu do całego okresu obserwacji T_0 , będzie to proces stochastyczny, stacjonarny w przedziałach.

Przedziały o stałej intensywności strumienia oznaczono symbolem t_{si} . Oczywiście w ujęciu zgodnym z rys. 2.25 momenty τ , początkujące interwały t_{si} , będą ściśle określone w czasie, za pomocą funkcji liniowej:

$$\tau_i = (i - 1) \cdot t_{si} \quad i = 1, \dots, n \quad /4.1/$$

gdzie "i" oznacza numer kolejnego interwału o stałej intensywności strumienia. Wewnątrz interwałów t_{si} odstępy czasu między pojazdami będą miały rozkład wykładniczy przesunięty, przy czym konieczność zastosowania rozkładu przesuniętego wynika z przyjętego modelu wlotu skrzyżowania z jednym pasem ruchu, a przesunięcie odpowiada minimalnemu odstępowi między pojazdami. Dystrybucja tego rozkładu dana jest wzorem:

$$F/t_o/ = 1 - e^{-\frac{t_o - t_{om}}{t_o / \tau_i, t_{si} - t_{om}}} \quad t_o \geq t_{om} \quad /4.2/$$

gdzie: t_o - odstęp czasowy między kolejnymi pojazdami w strumieniu [s],

t_{om} - minimalny odstęp czasowy między pojazdami w strumieniu [s],

$\bar{t}_o/\tau_i, t_{si}/$ - średni odstęp czasowy w strumieniu właściwy interwałowi t_{si} rozpoczynającemu się w chwili τ_i [s], obliczany ze wzoru:

$$\bar{t}_o/\tau_i, t_{si}/ = \frac{3600}{N \cdot RI/\tau_i, t_{si}/} \quad /4.3/$$

N - natężenie ruchu [P/h],

$RI/\tau_i, t_{si}/$ - relatywna intensywność strumienia w interwale t_{si} rozpoczynającym się w chwili τ_i / przyjmowana np. wg rys. 2.25/.

Funkcją odwrotną do /4.2/ jest:

$$\frac{t_o - t_{om}}{\bar{t}_o/\tau_i, t_{si}/ - t_{om}} = - \ln [1 - F/t_o/] \quad /4.4/$$

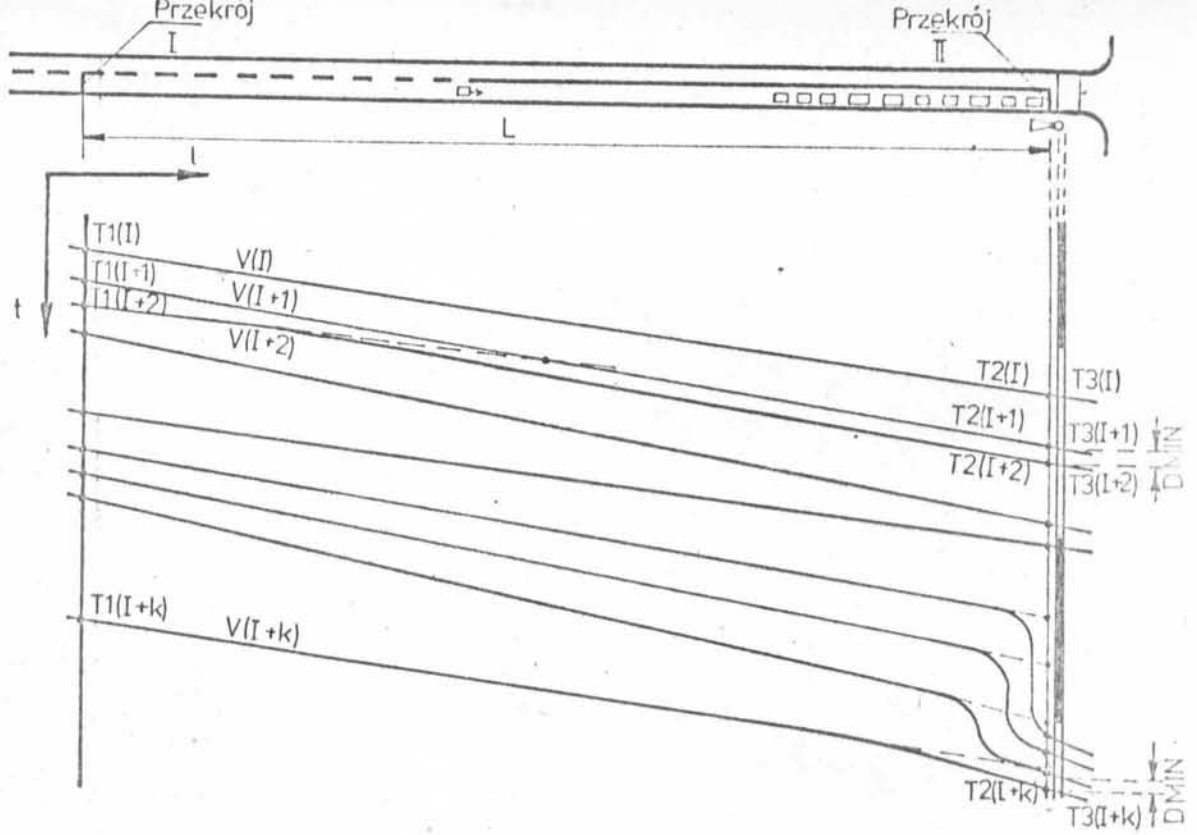
Jeżeli za $F/t_o/$ przyjmujemy ciąg liczb losowych r_n równomiernie rozłożonych w przedziale $[0,1]$ to otrzymamy z /4.4/ ciąg liczb losowych o rozkładzie wykładniczym przesuniętym [18], [24].

Jeśli liczby r_n mają rozkład równomierny $[0,1]$, to taki sam rozkład mają liczby $/1 - r_n/$ i wtedy wzór 4.4 na ciąg liczb losowych o rozkładzie wykładniczym przesuniętym przyjmie postać:

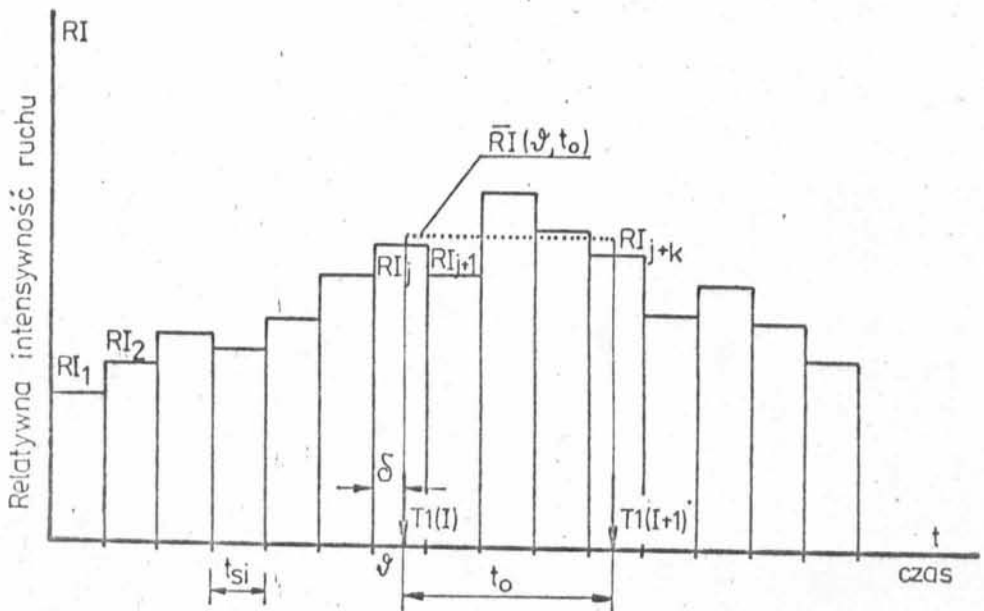
$$t_o = - [\bar{t}_o/\tau_i, t_{si}/ - t_{om}] \ln/r_n/ + t_{om} \quad /4.5/$$

Generowanie liczb losowych o rozkładzie równomiernym np. metodą mnożenia reszty [48] nie sprawia żadnych trudności. Można także skorzystać z gotowego podprogramu z biblioteki maszyny cyfrowej.

W przypadku, gdy interwały t_{si} są krótkie $/t_{si} \leq 1 \text{ min}/$ często może się zdarzyć, że wygenerowany odstęp czasowy t_o będzie znacznie większy od długości interwału o stałej intensywności t_{si} /rys. 4.2/. Powstaje wtedy problem określenia średniej in-



Rys. 4.1. Schemat dopływu pojazdów na wlot skrzyżowania



Rys. 4.2. Określanie aktualnej intensywności niestacjonarnego potoku w przypadku krótkich interwałów t_{sj}

tensywności strumienia w przedziale $[\mathcal{J}, \mathcal{J} + t_0/$, przy czym \mathcal{J} oznacza moment przybycia ostatniego i-tego pojazdu. Gdy moment \mathcal{J} przypada na j-ty interwał o stałej intensywności t_{si} , a koniec odstępu czasowego t_0 na interwał $j + k$ /rys. 4.2/ to średnia relatywna intensywność w interwale $[\mathcal{J}, \mathcal{J} + t_0/$ wyniesie:
dla $k = 0$:

$$\bar{RI}/\mathcal{J}, t_0/ = RI_j \tag{4.6/}$$

zaś dla $k > 0$:

$$\bar{RI}/\mathcal{J}, t_0/ = \frac{1}{t_0} \left[RI_j/t_{si} - \mathcal{J}/ + t_{si} \sum_{i=1}^{k-1} RI_{j+i} + RI_{j+k}/\mathcal{J} + t_0 - k \cdot t_{si}/ \right]$$

Po wymnożeniu i uporządkowaniu:

$$\begin{aligned} \bar{RI}/\mathcal{J}, t_0/ = \frac{1}{t_0} \left[RI_{j+k} \cdot t_0 - t_{si} \cdot /k \cdot RI_{j+k} - \sum_{i=0}^{k-1} RI_{j+i}/ - \right. \\ \left. - \mathcal{J}/RI_j - RI_{j+k}/ \right] \end{aligned}$$

Wprowadzając oznaczenie:

$$P = t_{si}/k \cdot RI_{j+k} - \sum_{i=0}^{k-1} RI_{j+i}/ - \mathcal{J}/RI_j - RI_{j+k}/ \tag{4.7/}$$

można zapisać:

$$\bar{RI}/\mathcal{J}, t_0/ = RI_{j+k} - \frac{P}{t_0} \tag{4.8/}$$

Wzór na parametr rozkładu odstępuów czasowych - analogiczny do /4.3/ - przyjmie teraz postać:

$$\bar{t}_0/\mathcal{J}, t_0/ = \frac{3600}{N/RI_{j+k} - \frac{P}{t_0}/} \tag{4.9/}$$

Jak widać parametr rozkładu zależy od odstępu czasowego t_0 , który jest właśnie poszukiwany. Problem generowania odstępuów czasowych wg rozkładu z parametrem określonym wzorem /4.9/ daje się dość łatwo rozwiązać w przypadku rozkładu wykładniczego /nieprzesuniętego/. Wtedy:

$$t_0 = - \bar{t}_0 / \lambda, \quad t_0 / \ln/r_n /$$

Podstawiając /4.9/ mamy:

$$t_0 = - \frac{3600}{N} \cdot \frac{t_0}{t_0 \cdot RI_{j+k} - P} \ln/r_n /$$

Po przekształceniu otrzymamy:

$$t_0 = \frac{1}{RI_{j+k}} \cdot \left[P - \frac{3600}{N} \ln/r_n / \right] \quad /4.10/$$

Równanie to posiada dwie niewiadome t_0 i k . Z uwagi jednak na zachodzący między nimi związek /rys. 4.2/ można je rozwiązać metodą iteracji, zakładając kolejne wartości $k = 0, 1, 2, \dots$ i badając warunek:

$$t \cdot RI_{j+k} - P > \frac{3600}{N} \ln/r_n /$$

przy czym t przyjmuje wartości $t = t_{si} - \delta + k \cdot t_{si}$.

Wg opisaną procedurę - którą nazwano SEK - następuje w modelu generowanie strumienia zgłoszeń w przypadku gdy interwały o stałej intensywności strumienia $t_{si} \leq 1$ min. Ponieważ jednak podstawą generowania jest tutaj rozkład wykładniczy, w celu uzyskania odstępów czasowych nie mniejszych od wartości t_{om} , zastosowano procedurę korekty wygenerowanych odstępów. Korekta dotyczy zarówno odstępów mniejszych od t_{om} , jak również następujących bezpośrednio po nich odstępów większych. W ten sposób możliwe jest korygowanie odstępów czasowych, kosztem lokalnych przesunięć, bez zmian potoku w skali całego okresu obserwacji.

Jeżeli interwały t_{si} są długie, np. $t_{si} = 5$ min., prawdopodobieństwo wystąpienia odstępu czasowego, między pojazdami w strumieniu, znacznie większego od długości interwału t_{si} , jest bardzo małe. W związku z tym, w takiej sytuacji, przewidziano znacznie prostszą procedurę generowania /MIN/, wykorzystującą wprost

zależności /4.5/ i /4.3/. Relatywna intensywność strumienia RI/τ_i , t_{si} brana jest z tego interwału $[\tau_i, \tau_i + t_{si}]$, w którym znalazł się ostatni wygenerowany pojazd.

W przypadku, gdy generowany potok jest stacjonarny, tzn. intensywność zgłoszeń pozostaje stała w całym okresie obserwacji T_0 , zbędna jest procedura określania aktualnej intensywności strumienia i generowanie następuje wg rozkładu wykładniczego przesuniętego z parametrem:

$$\tau_0 = \frac{3600}{N} \quad /4.11/$$

Wygenerowany potok oceniany jest w sensie statystycznym, podobnie jak czyniono to w odniesieniu do potoków zarejestrowanych podczas badań empirycznych /p. 2.3/. Służy do tego celu; procedura rejestracji liczb pojazdów w zadanych interwałach $[t_r]$, oraz procedura obliczania wskaźników charakteryzujących wahania ruchu CHAWA /identyczna jak w programie EMPIR - p. 2.3.3/. Przewidziano również możliwość sporządzania wykresów zmienności natężenia ruchu w czasie. Ogólny schemat blokowy, obejmujący procedury generowania strumienia zgłoszeń, oraz przetwarzania wygenerowanych danych przedstawiono na rys. 4.3.

Obliczenia wskaźników charakteryzujących wygenerowany potok odnoszą się do okresu obserwacji T_0 , podczas którego następuje rejestracja niezbędnych parametrów potoku. Okres ten poprzedzony jest tzw. okresem rozruchu T_R , potrzeba wprowadzenia którego wyjaśniona będzie w p. 4.3.1.

4.1.2. Porównanie charakterystyk zmienności natężeń potoku stacjonarnego i niestacjonarnego

Opracowanie modelu zgłoszeń pojazdów w formie odrębnej całości umożliwia śledzenie i ocenę wygenerowanego strumienia zgłoszeń

niezależnie od realizacji przebiegu symulacji. Analiza wyników uzyskiwanych z generatora jest istotna z uwagi na możliwość dokonania porównań różnych sposobów generowania, jak również oceny wygenerowanych potoków ruchu; stacjonarnych i niestacjonarnych.

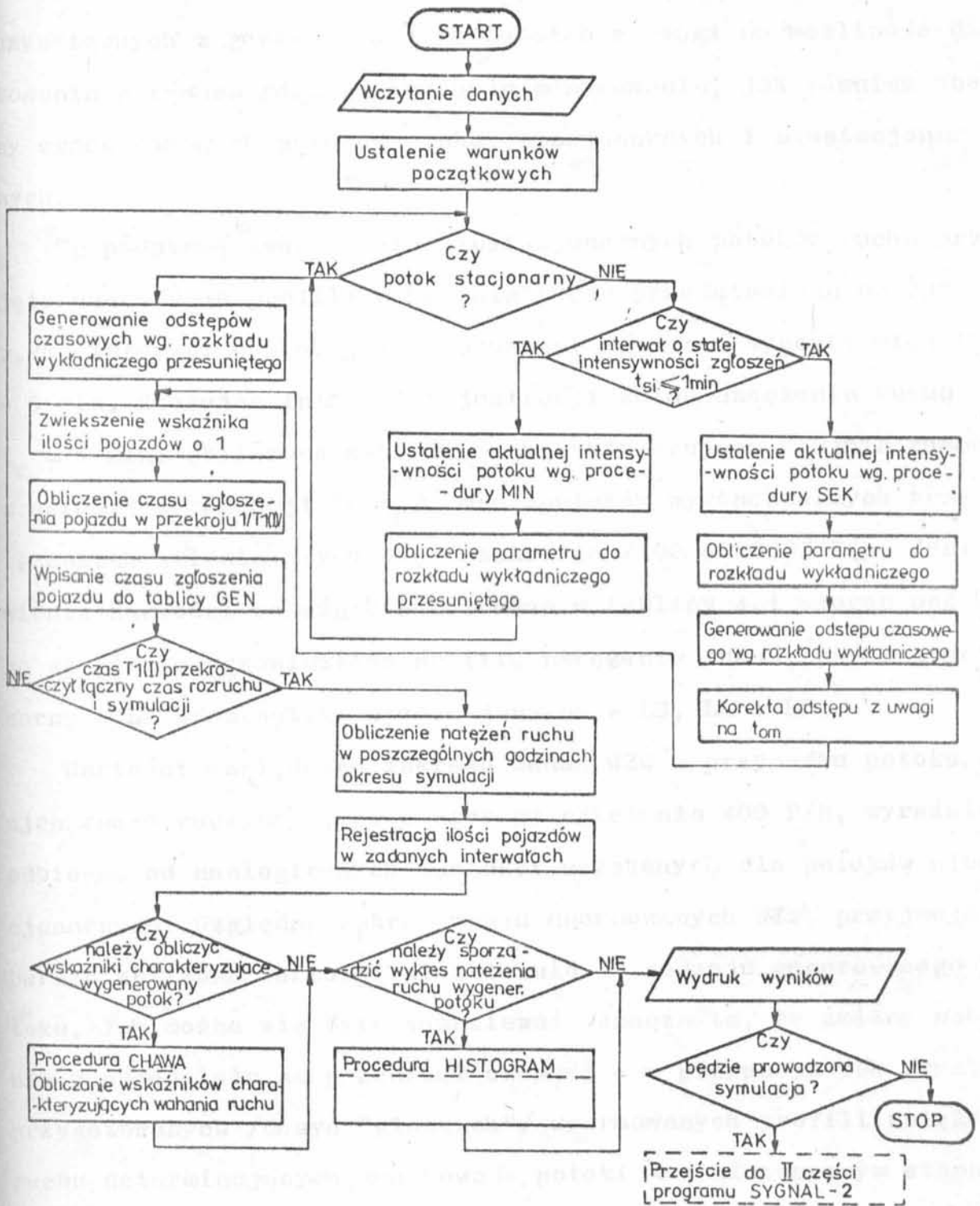
Za podstawę generowania niestacjonarnych potoków ruchu przyjęto unormowane profile natężenia ruchu przedstawione na rys. 2.25. Interwał o stałej intensywności zgłoszeń wynosił więc $t_{si} = 5$ min. Stosując interwał rejestracji zmian natężenia ruchu $t_r = 1$ min. obliczono wskaźniki charakteryzujące wahania ruchu w okresie obserwacji $T_0 = 90$ min. potoków wygenerowanych przy natężeniach zmieniających się w zakresie $/100 + 1000/$ P/h. Zestawienia wartości wskaźników dokonano w tabelicy 4.1 biorąc pod uwagę wszystkie przewidziane profile natężenia ruchu; potok stacjonarny - LR oraz potoki niestacjonarne - LS, LL i LP.

Wartości względnego zakresu wahań WZW w przypadku potoku stacjonarnego zaczynają, począwszy od natężenia 400 P/h, wyraźnie odbiegać od analogicznych wartości uzyskanych dla potoków niestacjonarnych. Względny zakres wahań unormowanych WZwu przyjmuje bardzo zbliżone wartości niezależnie od rodzaju generowanego potoku. Jak można się było spodziewać oznacza to, że zmiany natężenia z przedziału na przedział czasowy - w przypadku tak /rys.2.25/ przygotowanych /dosyć "gładkich"/ unormowanych profili natężenia ruchu determinujących generowane potoki - w nieznacznym stopniu zależą od charakteru ruchu /stacjonarny czy niestacjonarny/. Współczynnik zmienności ξ liczb pojazdów w przedziałach 1-minutowych w przypadku potoku stacjonarnego przyjmuje wyraźnie mniejsze wartości w całym zakresie zmienności natężeń N w porównaniu z potokami niestacjonarnymi. Jak więc widać z dokonanego porównania charakterystyk potoków przy interwale rejestracji $t_r = 1$ min.,

Tablica 4.1.

Zestawienie wartości wskaźników charakteryzujących wahania
natężenia wygenerowanych potoków ruchu

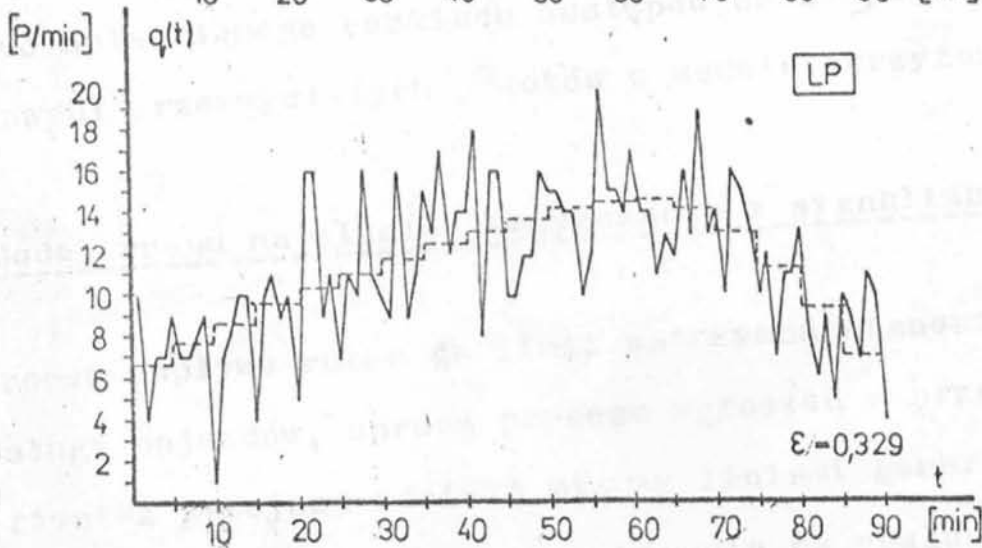
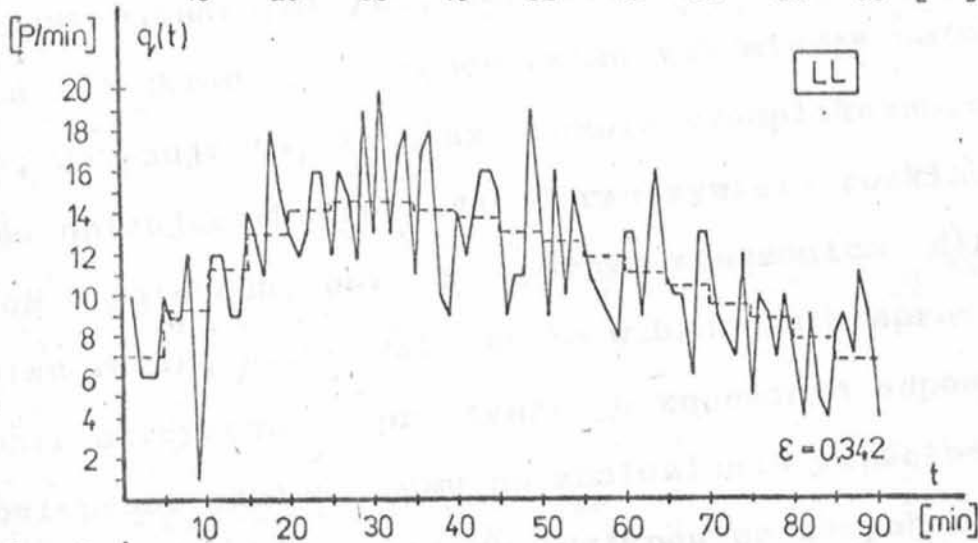
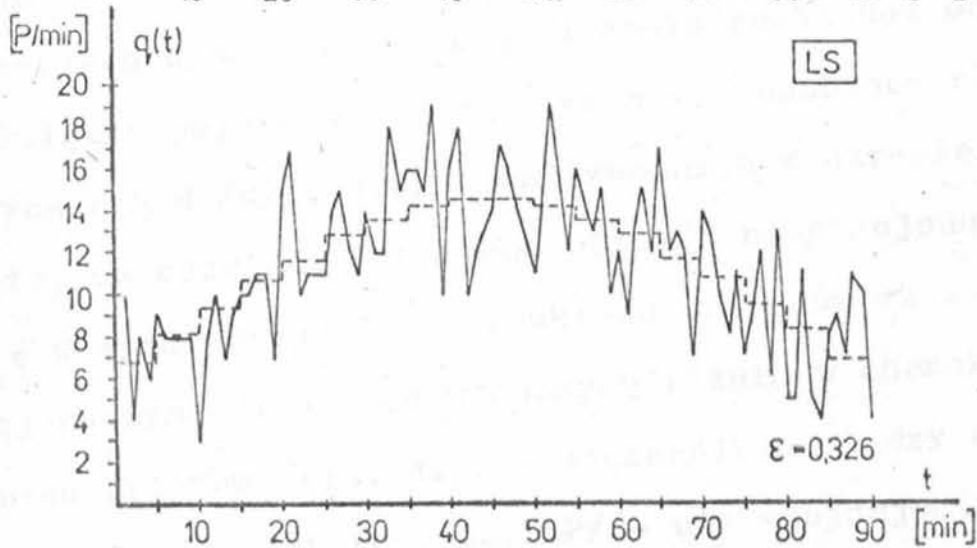
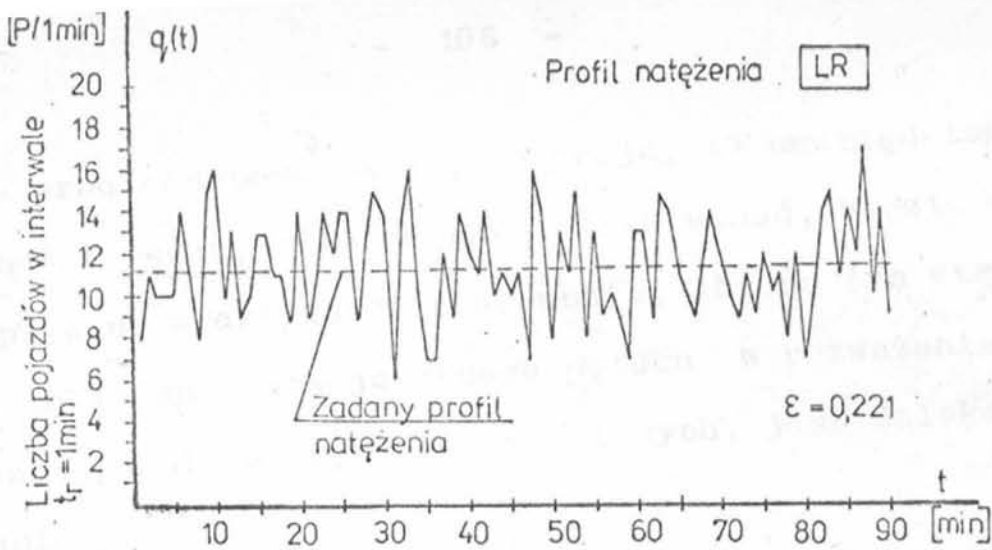
Zadane natężenie ruchu	Zadany profil natężenia ruchu	Wskaźniki charakteryzujące wahania wygenerowanego potoku ruchu							
		$t_r = 1 \text{ min}$				$T_0 = 90 \text{ min}$			
N		\bar{q}	R	WZW	RWU	WZU	S^2_q	S_q	ϵ
P/h		P/1min	P/1min	-	P/1min	-	$P^2/1min$	P/1min	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100	LR	1.64	5	3.04	1.81	1.10	1.52	1.23	0.749
	LS	1.60	5	3.13	1.71	1.07	1.66	1.29	0.806
	LL	1.60	5	3.13	1.78	1.11	1.75	1.32	0.827
	LP	1.61	5	3.10	1.73	1.07	1.77	1.33	0.826
200	LR	3.20	7	2.19	2.28	0.71	2.63	1.62	0.507
	LS	3.22	7	2.17	2.45	0.76	3.28	1.81	0.562
	LL	3.23	8	2.47	2.43	0.75	3.40	1.84	0.570
	LP	3.23	8	2.47	2.32	0.72	3.07	1.75	0.542
300	LR	5.03	11	2.19	2.90	0.58	3.88	1.97	0.391
	LS	4.93	12	2.13	3.51	0.71	5.80	2.41	0.488
	LL	4.99	9	1.88	3.25	0.65	4.86	2.20	0.442
	LP	4.96	11	2.22	3.12	0.63	5.18	2.28	0.459
400	LR	6.51	12	1.84	3.25	0.50	4.61	2.15	0.330
	LS	6.57	13	1.98	2.83	0.43	6.36	2.52	0.384
	LL	6.59	12	1.82	3.50	0.53	7.18	2.68	0.407
	LP	6.58	14	2.13	3.00	0.46	6.73	2.59	0.395
500	LR	8.06	10	1.24	2.86	0.35	4.25	2.06	0.256
	LS	8.19	15	1.83	3.53	0.43	9.04	3.01	0.367
	LL	8.19	14	1.71	3.65	0.45	9.35	3.06	0.374
	LP	8.20	15	1.83	3.70	0.45	8.94	2.99	0.365
600	LR	9.67	12	1.24	3.73	0.39	6.29	2.51	0.259
	LS	9.74	16	1.64	3.45	0.35	10.66	3.26	0.335
	LL	9.74	17	1.74	3.93	0.40	12.03	3.47	0.356
	LP	9.74	15	1.54	3.65	0.37	10.72	3.27	0.336
700	LR	11.36	11	0.97	3.67	0.32	6.30	2.51	0.221
	LS	11.28	16	1.42	3.67	0.33	13.51	3.68	0.326
	LL	11.27	19	1.69	4.05	0.36	14.88	3.86	0.342
	LP	11.28	19	1.68	4.01	0.36	13.73	3.71	0.329
800	LR	13.00	11	0.85	4.23	0.33	7.93	2.82	0.217
	LS	13.02	20	1.54	3.62	0.28	14.22	3.77	0.290
	LL	13.02	18	1.38	3.94	0.30	15.04	3.88	0.298
	LP	13.02	16	1.23	3.95	0.30	14.87	3.86	0.296
900	LR	14.63	13	0.89	4.00	0.27	7.03	2.65	0.181
	LS	14.58	22	1.51	3.74	0.26	19.09	4.37	0.300
	LL	14.58	20	1.37	3.58	0.25	18.20	4.27	0.293
	LP	14.58	21	1.44	4.03	0.28	18.93	4.35	0.299
1000	LR	16.31	12	0.74	3.76	0.23	6.68	2.58	0.159
	LS	16.13	22	1.36	3.55	0.22	21.80	4.67	0.289
	LL	16.12	22	1.36	4.09	0.25	22.66	4.76	0.295
	LP	16.12	25	1.55	4.12	0.26	22.37	4.73	0.293



Rys. 4.3. Ogólny schemat blokowy I części programu SYGNAL-2 dotyczącej generowania potoku pojazdów

a także przy $t_r = 5$ min /tablica 4.1 zamieszczona w aneksie/ wygenerowane niestacjonarne strumienie pojazdów istotnie różnią się od strumieni stacjonarnych. Same jednak wskaźniki charakteryzujące dobrze wielkość wahań natężenia ruchu, nie określają jednoznacznie linii przebiegu natężenia w czasie, czego najlepszym przykładem są niewielkie różnice wartości poszczególnych wskaźników, uzyskanych przy wprowadzonych do generatora różnych profilach LS, LL i LP. Dopiero wykresy linii przebiegu natężenia /szeregów czasowych natężenia/ pozwalają stwierdzić ostatecznie czy wygenerowane potoki niestacjonarne posiadają pożądane cechy. Na rys. 4.4 pokazano linie przebiegu natężeń potoków wygenerowanych przy $N = 700$ P/h i profilach natężeń LR /stacjonarny/ oraz LS, LL i LP /niestacjonarne/. Wizualna ocena wykresów wykazuje wyraźną różnicę linii przebiegu natężeń w przypadkach stacjonarnym i niestacjonarnych oraz występowanie pożądanych zależności od czasu tych ostatnich. Analiza wartości wskaźników charakteryzujących wahania natężenia ruchu w czasie, w wygenerowanych potokach niestacjonarnych i uzyskanych w badaniach empirycznych /rys. 2.4, 2.5, 2.6/ wykazuje znaczną zgodność między nimi. We wszystkich przypadkach wartości wskaźników, uzyskane dla wygenerowanych potoków, mieszczą się w granicach przedziałów ufności dla pojedynczych obserwacji, wyznaczonych dla ustalonych w badaniach empirycznych linii regresji. Tendencje zmian wartości wskaźników w funkcji natężenia są również bardzo zbliżone do empirycznych. Biorąc pod uwagę także kształt wykresów /rys. 4.4/, linie przebiegu natężeń wygenerowanych potoków /LS, LL, LP/ mogą być uznane za dobrą reprezentację zmian natężenia rzeczywistych potoków obserwowanych w okresach ruchu szczytowego.

Znaczne różnice w charakterystyce potoków niestacjonarnych i stacjonarnego, będącego w przeważającej liczbie podejmowanych



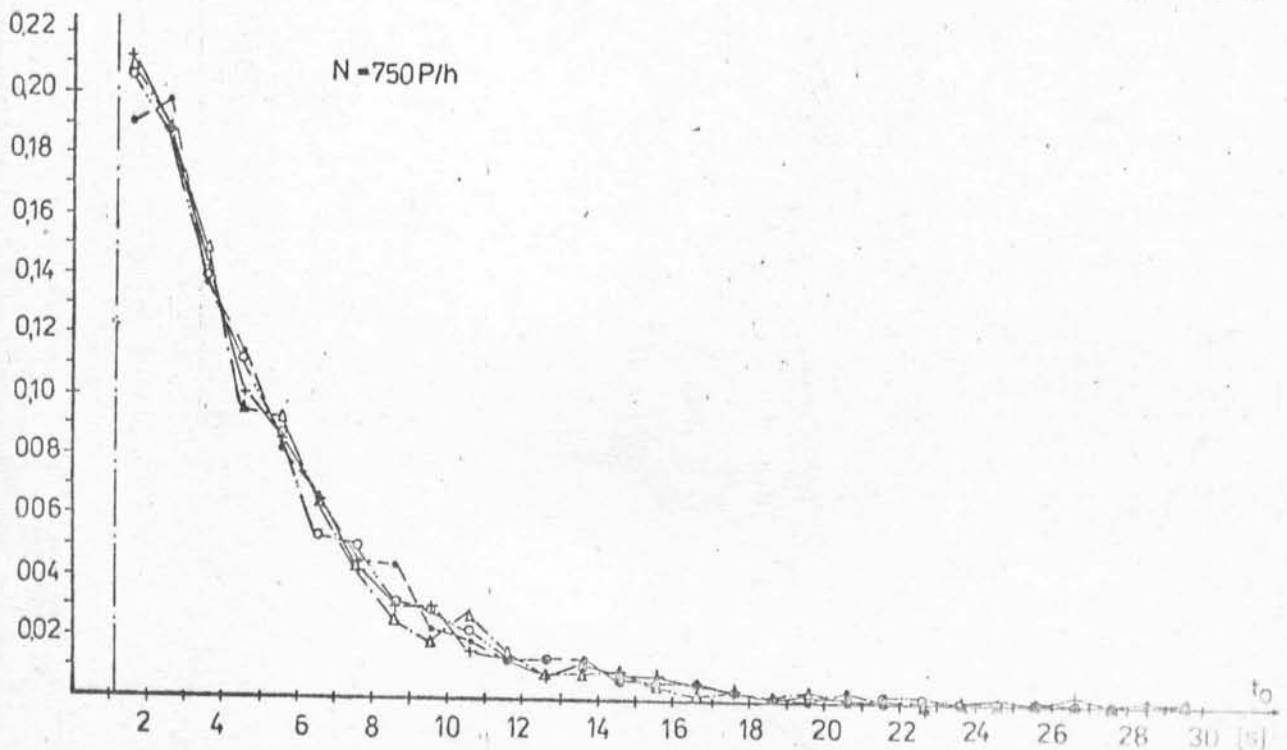
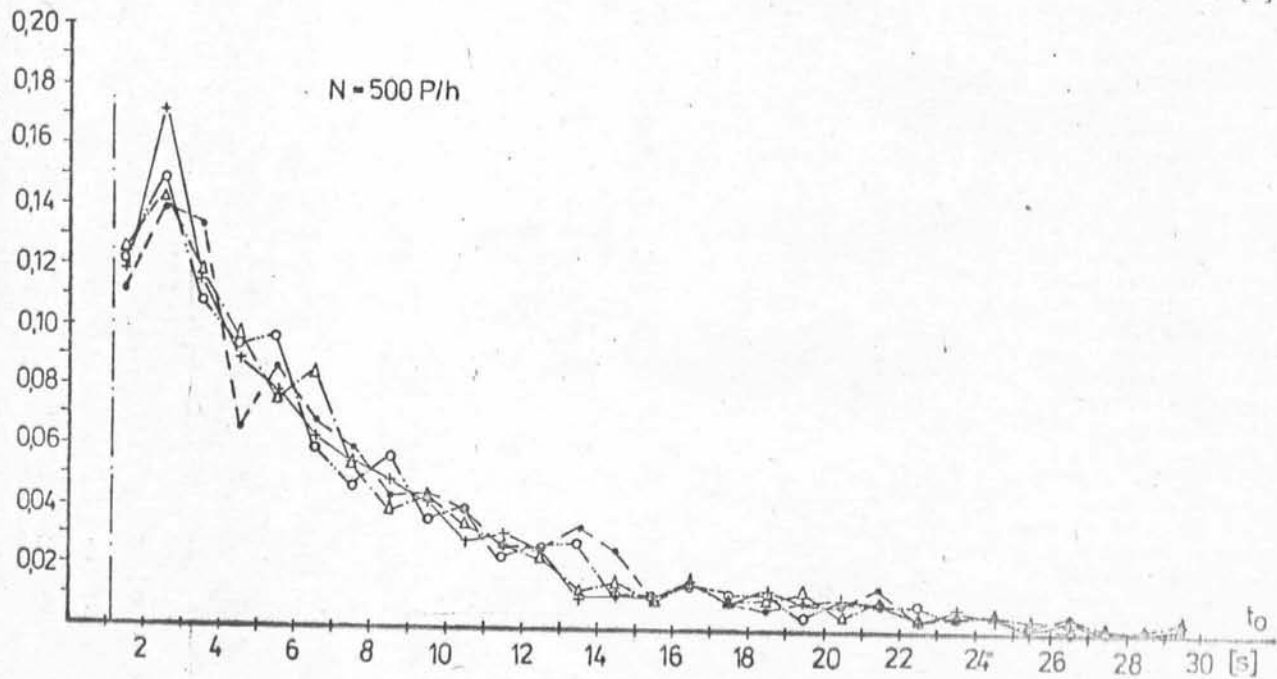
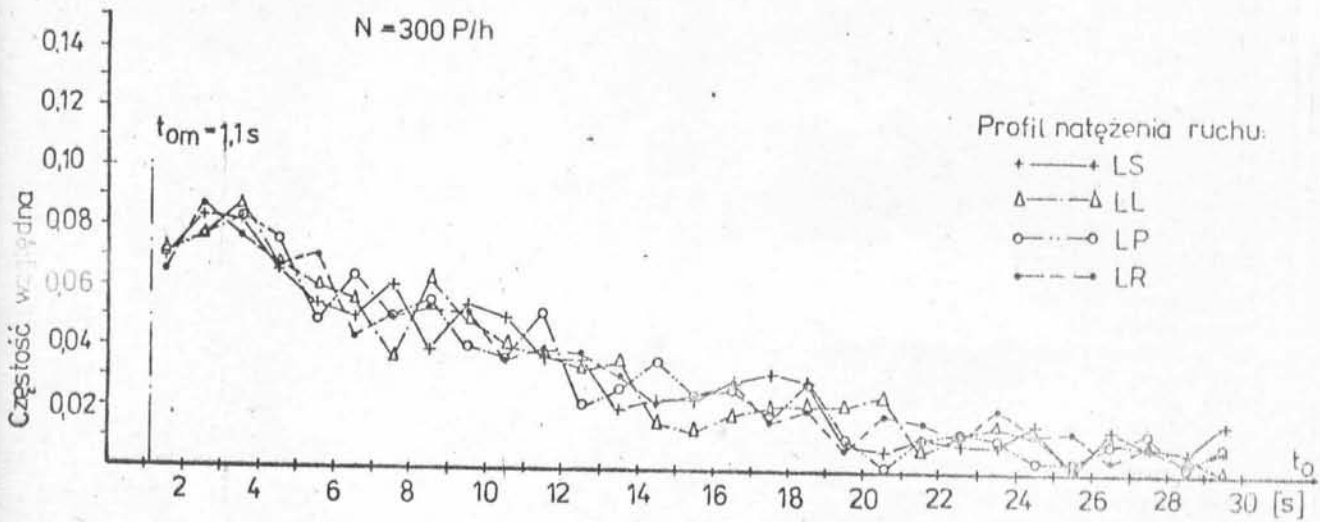
Rys. 4.4. Wygenerowane potoki ruchu przy natężeniu $N = 700 \text{ P/h}$

dotychczas prac podstawą badań, sugerują, że uwzględnienie niestacjonarności ruchu, jego rzeczywistych wahań, będzie miało istotny wpływ na efektywność sterowania. Już na tym etapie badań widać, że zakładanie stacjonarnego potoku w rozważaniach, odnoszonych szczególnie do okresów szczytowych, jest daleko idącym uproszczeniem.

Interesująco wypada również porównanie rozkładów odstępów czasowych między pojazdami w wygenerowanych potokach ruchu o różnych natężeniach N /rys. 4.5/, analizowanych w okresie $T_0 = 90\text{min}$. Okazuje się, że rozkłady dotyczące potoków niestacjonarnych nie różnią się w wyraźny sposób od rozkładu odstępów czasowych w potoku stacjonarnym. Mimo więc wyraźnych różnic w charakterze poszczególnych potoków /rys. 4.4/ - szczególnie między stacjonarnym /LR/ i niestacjonarnymi /LS, LL, LP/ - nie znajduje to odzwierciedlenia w rozkładach odstępów czasowych między pojazdami w tych potokach. Wskazuje to, że poszukiwanie skomplikowanych postaci rozkładów opisujących precyzyjnie rzeczywiste rozkłady odstępów czasowych w potokach, poza bezspornym znaczeniem dla matematycznego opisu ruchu, nie będzie miało w badaniach sprawności funkcjonowania skrzyżowania praktycznego znaczenia odpowiadającego nakładowi pracy poniesionemu na znalezienie właściwego rozkładu. Wierność opisu samego rozkładu odstępów czasowych nie wystarczy do budowania rzeczywistych potoków w modelu skrzyżowania.

4.2. Model ruchu na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną

Proces dopływu ruchu do linii zatrzymań stanowiącej stanowisko obsługi pojazdów, oprócz procesu zgłoszeń w przekroju I obejmuje również przejazd odcinka między liniami generacji /I/ i zatrzymań /II/ /rys. 4.1/ oraz oczekiwanie na obsługę w kolejce



Rys. 4.5. Rozkłady odstępów czasowych między pojazdami w wygenerowanych potokach ruchu o różnych natężeniach

w sytuacji, gdy obsługa nie może być zrealizowana w momencie zgłoszenia pojazdu /czerwony sygnał, zbyt długa kolejka pojazdów/. Proces obsługi determinowany stanami sygnałów świetlnych, powodujących regularne przerwy w obsłudze, realizowany jest w przekroju II i decyduje o momentach wyjścia pojazdów z systemu.

4.2.1. Przebieg ruchu i kolejka pojazdów na odcinku wlotowym skrzyżowania

W opracowanym modelu symulacyjnym skrzyżowania rozważa się ruch samochodów osobowych i ciężarowych poruszających się z indywidualnymi prędkościami na odcinku wlotowym skrzyżowania. Dla każdego z pojazdów, wchodzących w symulowany system z czasem $T_1/I/$, ustalany jest rodzaj a następnie czas z jakim poruszał się będzie między przekrojami I i II.

Generowanie struktury rodzajowej prowadzone jest w oparciu o uzyskane z badań empirycznych prawdopodobieństwa warunkowe kolejności występowania poszczególnych rodzajów pojazdów. Polega ono na tym, że dla każdego kolejnego pojazdu generowana jest liczba losowa r_n z przedziału $[0,1]$ a następnie sprawdzany jest warunek:

- jeżeli poprzedni pojazd był s.o.

$$r_n < P/c/o/$$

- jeżeli poprzedni pojazd był natomiast s.c.

$$r_n < P/c/c/$$

gdzie: $P/c/o/$ i $P/c/c/$ - prawdopodobieństwa warunkowe obliczane z wzorów /3.17/ i /3.18/ przy zadanym udziale samochodów ciężarowych u_c w potoku /w postaci liczby niemianowanej/.

W przypadku, gdy liczba losowa r_n jest mniejsza od wartości

odpowiedniego prawdopodobieństwa warunkowego to kolejnym pojazdem jest s.c., a jeżeli nie to s.o.

Czas przejazdu odcinka I - II generowany jest - zgodnie z wynikami badań /p. 3.2/ - z rozkładu normalnego, przy zadanych parametrach, średnim czasie przejazdu \bar{t}_p i odchyleniu standardowym σ_{t_p} , oddzielnie dla samochodów osobowych i ciężarowych. Wartości parametrów odwołują się do swobodnego przejazdu /brak kolejki, sygnał zielony na wlocie/. Taki dobór parametrów umożliwia właściwe określanie strat czasu, jako różnicy między faktycznym czasem przejazdu odcinka I - II a czasem, w jakim pojazd przejechałby ten odcinek bez zatrzymań. Występujące w rzeczywistości zmniejszanie prędkości przy dojeżdżaniu do kolejki lub do linii stop, gdy pali się sygnał czerwony ujęto w modelu przez wprowadzenie parametru t_χ identyfikującego opóźnienie pojazdu /wyrażone w sekundach/ wynikające z hamowania.

Między przekrojem I i II nie zachodzi wyprzedzanie pojazdów a przejazd odcinka każdy z pojazdów realizuje nie zmieniając prędkości z jaką wjechał na odcinek, za wyjątkiem przypadków, gdy;

- poprzednik porusza się z mniejszą prędkością,
- rozważany pojazd dojeżdża do kolejki lub
- dojeżdża do linii stop podczas sygnału czerwonego.

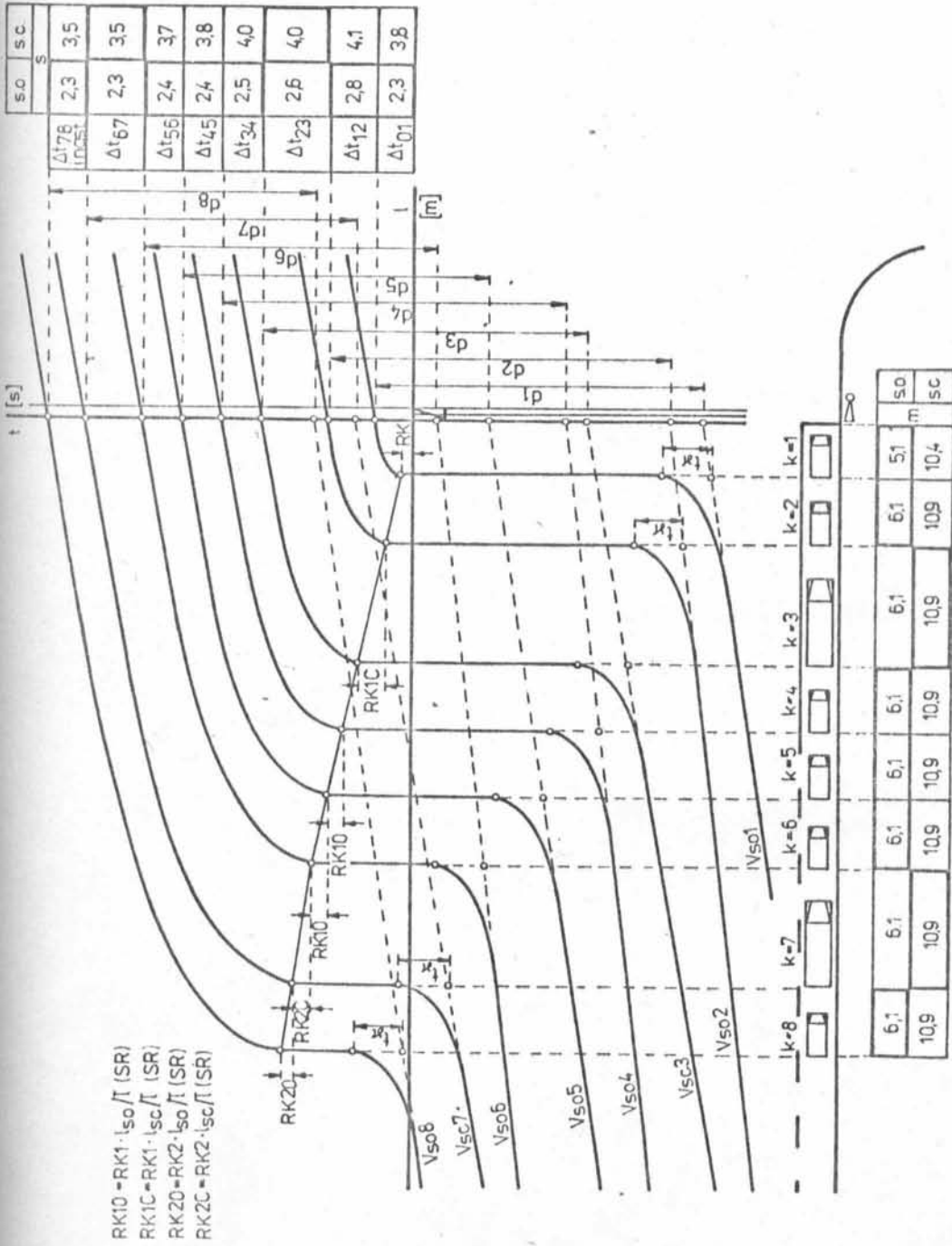
Korekta prędkości danego pojazdu z uwagi na minimalny odstęp czasowy względem poprzednika, dokonywana jest w punktach decyzji, którymi są; koniec kolejki oraz linia zatrzymań. Minimalny odstęp czasowy między kolejnymi pojazdami poruszającymi się w obrębie wlotu określono jako DMIN /rys. 4.1/.

Podczas wyświetlania sygnału czerwonego, przy dojeździe kolejnych pojazdów na wlocie tworzy się kolejka. Okres, w którym kolejka pojazdów tworzy się i oczekuje na możliwość opuszczania wlo-

tu, rozpoczyna się z chwilą zatrzymania się pierwszego pojazdu na skutek zmiany sygnałów z żółtego na czerwony a kończy się w momencie ruszenia ostatniego pojazdu z kolejki, już w czasie trwania sygnału zielonego. Przy rozstrzygnięciu, czy dany pojazd dojedzie do kolejki, czy też nie, brany jest pod uwagę czas, w jakim przebywa on odcinek między przekrojem I i końcem kolejki z uwzględnieniem czasu hamowania t_{h} , oraz moment ruszenia ostatniego pojazdu w kolejce. Czas ruszenia pojazdów z kolejki wyliczany jest w oparciu o ustalone empirycznie równanie /3.24/ modyfikowane z uwagi na różne długości stanowisk pojazdów w kolejce. Odstępy czasowe, w jakich ruszają pojazdy w kolejce względem pojazdów poprzedzających je oznaczono symbolami /rys. 4.6/ $RK10$ i $RK1C$ /dla stanowisk do 6-tego włącznie/, oraz $RK20$ i $RK2C$ /dla dalszych stanowisk/, przy czym litera kończąca symbol oznacza rodzaj pojazdu /O - s.o., C - s.c./ zajmującego stanowisko, z którego rusza rozważany pojazd. Wzory do obliczania odstępów czasowych między momentami ruszeń kolejnych pojazdów podano na rys. 4.6. $RK1$ i $RK2$ oznaczają w nich współczynniki kątowe z równania /3.24/, l_{so} i l_{sc} - długości stanowisk s.o. i s.c., a $\bar{l}/SR/$ - średnią długość stanowiska, zależną od struktury rodzajowej kolejki. Długości stanowisk pojazdów l_{so} i l_{sc} /rys. 4.6/ zróżnicowano tylko w zależności od typu pojazdu. Inną długość w porównaniu z pozostałymi posiada pierwsze stanowisko.

Długość kolejki, wyrażona przez liczbę pojazdów lub zajmowany odcinek wlotu $L_k [m]$, jest każdorazowo aktualizowana w momencie zjazdu pierwszego pojazdu po zapaleniu się sygnału zielonego. Rejestracji podlegają maksymalne kolejki w cyklach, oraz kolejki pozostające na końcu każdego sygnału zielonego.

Tak dokładne odwzorowanie kolejki, oprócz podstawowego celu tj. dokładnego szacowania mierników efektywności /uwarunkowanych



Rys. 4.6. Model obsługi pojazdów, które zatrzymały się w kolejce na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją

w znacznym stopniu adekwatnością kolejki/, ma spełniać również drugoplanowe zadania - dać m.in. odpowiedź na pytanie, które uproszczenia są istotniejsze przy symulacji wlotu skrzyżowania.

4.2.2. Proces obsługi

Obsługa pojazdów, determinowana stanami sygnałów świetlnych, odbywa się zgodnie z kolejnością zgłoszeń. Sygnalizacja stałoczasowa sterująca tym procesem reprezentowana jest przez rzeczywiste długości sygnałów czerwonego, zielonego i żółtego, przy czym ruch zachodzi podczas sygnału zielonego i częściowo żółtego. Pojazdy z kolejki, która ustawiła się podczas sygnału czerwonego, przejeżdżają linię stop w odstępach Δt zróżnicowanych dla pierwszych 6-ciu pojazdów a następnie w stałych odstępach. Wartości poszczególnych odstępów czasowych, ustalane na podstawie pomiarów /p. 3.5/ podano na rys. 4.6. Pojazd który nie dojechał do kolejki, lecz z uwagi na mniejszą prędkość kolumny pojazdów opuszczających wlot zwalnia, przekracza linię stop w odstępie D_{MIN} za ostatnim pojazdem z kolejki /rys. 4.1/ w sytuacji, gdy stan sygnałów zezwala na zjazd. Jeżeli wlot opuściły wszystkie pojazdy, które zatrzymały się w kolejce i nadal trwa sygnał zielony, to następne pojazdy przekraczają /T3/I// linię zatrzymań zgodnie z momentami zgłoszeń /T2/I// w przekroju II - $T3/I/ = T2/I/$, przy czym musi być spełniony warunek $T3/I+1/ \geq \geq T3/I/ + D_{MIN}$. Minimalny odstęp czasowy na linii stop między kolejnymi pojazdami realizującymi przejazd bez zatrzymań, przyjęto $D_{MIN} = 2,0$ s.

Pojazdy dojeżdżające już na sygnale żółtym do linii zatrzymań muszą w pewnej odległości od niej podjąć decyzję - zatrzymać się lub przejechać. Traktując w sposób losowy podejmowanie decyzji można rozstrzygać ten dylemat korzystając z prawdopodobień-

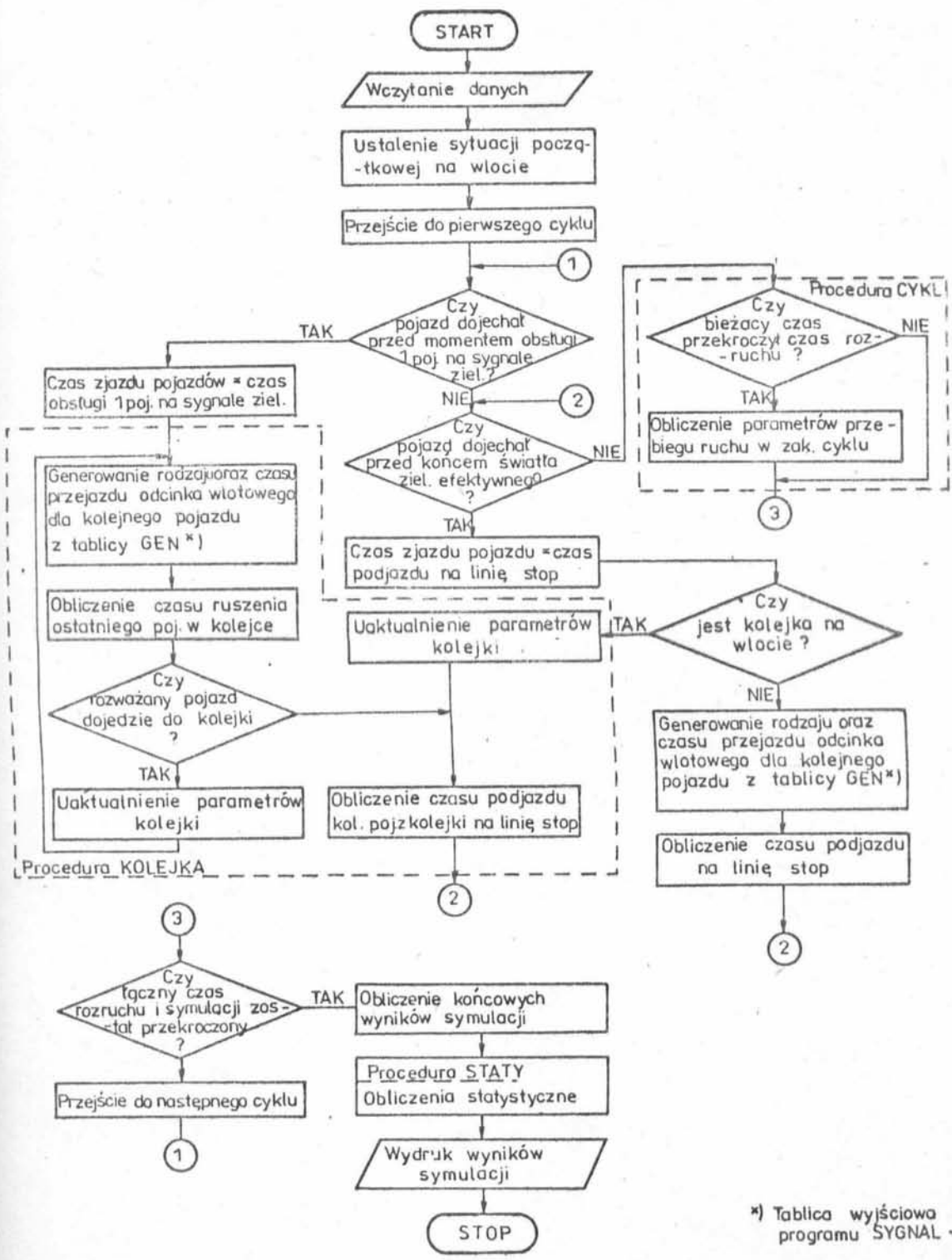
stwa zatrzymania się przed linią stop, podanego w funkcji odległości od linii zatrzymań oraz prędkości dojeżdżających pojazdów [16], [20]. W modelu potraktowano ten problem deterministycznie, wprowadzając parametr Z_e /interpretowany jako część sygnału żółtego/, który umożliwia dokonywanie oceny możliwości przejazdu rozważanych pojazdów. Pojazd, który w momencie zmiany sygnałów z zielonego na żółty znajduje się w odległości czasowej od linii stop mniejszej od założonej wartości parametru Z_e - przejeżdża. W przeciwnym przypadku, tj. gdy od momentu zauważenia zmiany sygnałów droga, jaka pozostaje pojazdowi do przejechania, wymaga czasu dłuższego niż Z_e - zatrzymuje się.

Biorąc pod uwagę całość procesu obsługi, można powiedzieć, że został on w opracowanym modelu rozwiązany jako deterministyczny.

4.3. Opis programu symulacyjnego

Ogólny, poglądowy schemat blokowy, dotyczący symulacji przebiegu ruchu na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, przedstawiono na rys. 4.7. Stanowi on uzupełnienie schematu zaprezentowanego na rys. 4.3, a dotyczącego generowania strumienia zgłoszeń. Łącznikiem między oboma tymi częściami modelu jest tablica GEN, w której zarejestrowane są czasy zgłoszeń $T1/I/$ pojazdów w przekroju nr I.

Program symulacyjny SYGNAL-2 na EMC CYBER-72 został napisany w języku FORTRAN. Składa się on z programu głównego i 6 podprogramów. Organizacja jego umożliwia niezależne użytkowanie I części programu /GENER-2/, obejmującej generowanie strumienia zgłoszeń wraz z opracowaniem charakterystyki oraz wykresu wygenerowanego potoku pojazdów. Stosunek czasu symulacji do czasu rzeczywistego, w zależności od stopnia nasycenia wlotu wynosi od 1 : 1400 /dla $x \cong 0,1/$ do 1 : 700 /dla $x \cong 1,0/$.



*) Tablica wyjściowa z I części programu SYGNAL-2

Rys. 4.7. Ogólny schemat blokowy II części programu SYGNAL-2 dotyczącej symulacji przebiegu ruchu na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną

4.3.1. Zbieranie danych statystycznych

Znaczną część programu SYGNAL-2 stanowią procedury i podprogramy specjalnie opracowane w celu zbierania danych statystycznych dotyczących działania /i jego efektów/ symulowanego systemu. Obejmują one rejestrowanie danych w zakresie; charakterystyki potoku dopływającego, strat czasu pojazdów, kolejek, zatorów, nasycenia wlotu, czasu oczekiwania na obsługę itp.

Gromadzenie danych charakteryzujących potok dopływający /w przekroju I/, oprócz wskaźników odnoszących się do natężenia ruchu /p.p. 4.1.1 i 4.1.2/ obejmuje również dane charakteryzujące jego strukturę rodzajową. Rejestrowane są udziały samochodów ciężarowych w potoku w zadanych interwałach oraz prowadzona może być analiza kolejności występujących po sobie rodzajów pojazdów - analogicznie do opisanej w p. 3.1.

Straty czasu d_i poszczególnych pojazdów /rys. 4.6/ obliczane są wg wzoru:

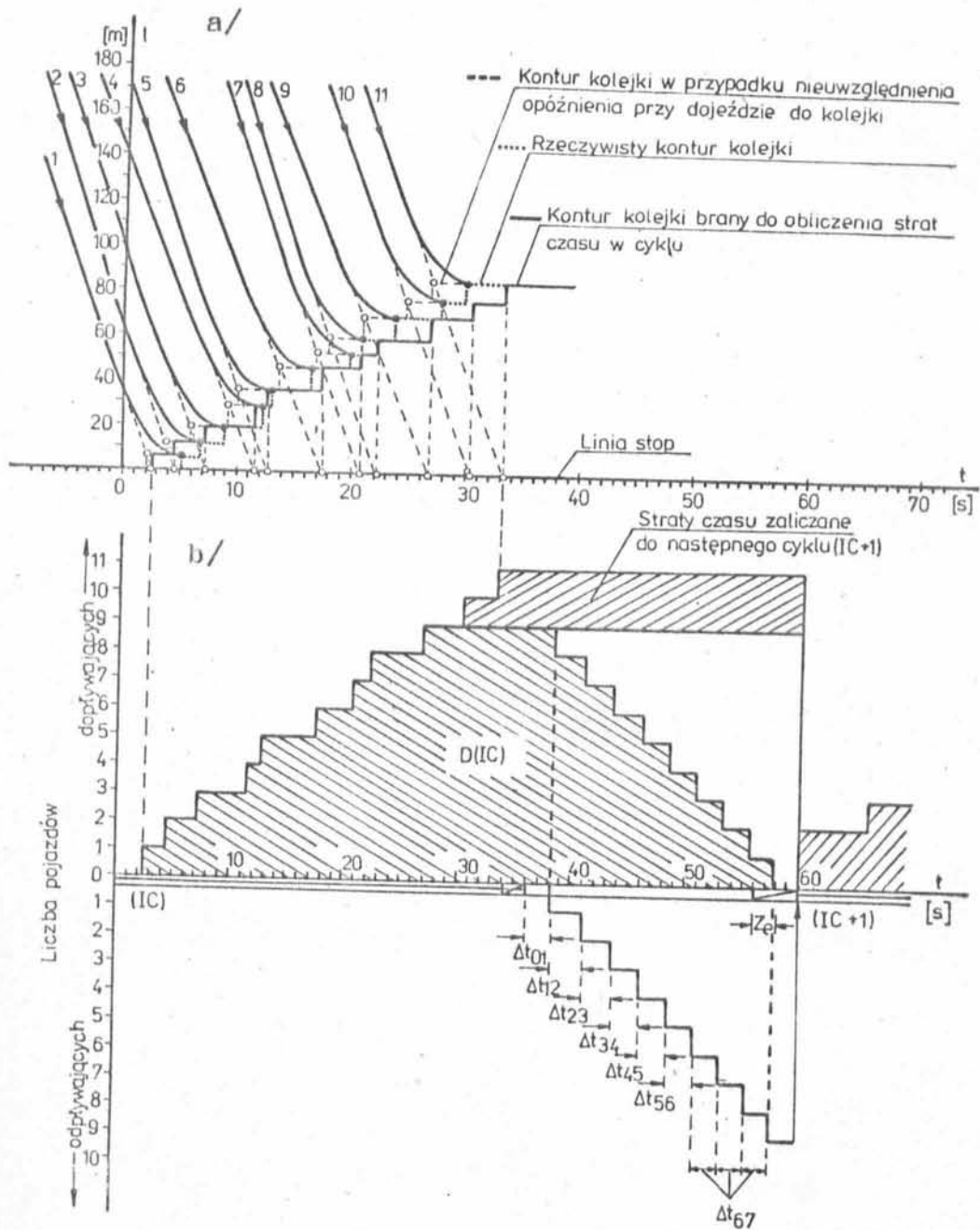
$$d_i = T3/I/ - [T1/I/ + t_p/I/] \quad [s] \quad /4.12/$$

gdzie: $T1/I/$ - czas, w jakim i -ty pojazd przejechał przekrój I,

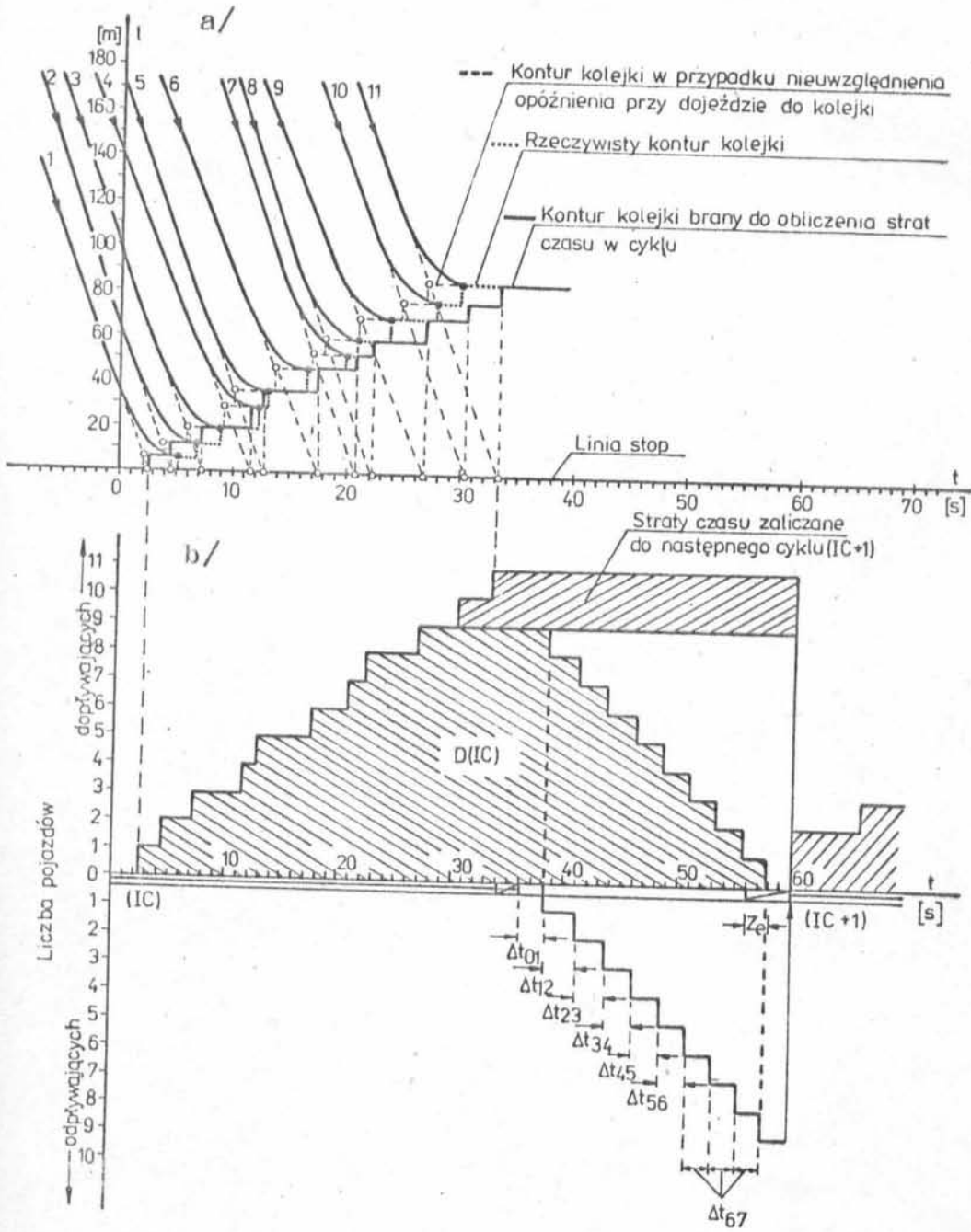
$T3/I/$ - czas, w jakim i -ty pojazd przejechał linię stop /przekrój II/,

$t_p/I/$ - przypisany w sposób losowy i -temu pojazdowi czas przejazdu odcinka I - II.

Do sumarycznych strat czasu $D/IC/$ przypadających na dany cykl IC zalicza się straty d_i pojazdów, które zostały obsłużone w tym cyklu. Interpretację graficzną sumarycznych strat czasu $D/IC/$ w cyklu o pełnym nasyceniu przedstawiono na rys. 4.8. Rys. 4.8.a wyjaśnia zasadę tworzenia teoretycznego konturu kolejki ograniczającego częściowo powierzchnię odpowiadającą $D/IC/$. Różni się on od rzeczywistego konturu kolejki z uwagi na specyfikę zdefi-



Rys. 4.8. Sumaryczne straty czasu w cyklu o pełnym nasyceniu wg przyjętego modelu ruchu



Rys. 4.8. Sumaryczne straty czasu w cyklu o pełnym nasyceniu wg przyjętego modelu ruchu

niowania strat czasu - wzór /4.12/ - uwzględniającego wirtualny czas przejazdu pojazdu od przekroju I do linii stop /a nie do końca kolejki/. Momenty, w których pojazdy kolumny przekraczają linię stop /rys. 4.8.b/, określone zgodnie z zasadami podanymi w p. 4.2.2, tworzą linię schodkową zamykającą powierzchnię strat czasu D/IC/ przypadających na cykl o numerze IC. Średnie straty czasu przypadające na każdy z pojazdów, które zostały obsłużone w cyklu IC obliczane są następująco:

$$d/IC/ = \frac{D/IC/}{LO/IC/} = \frac{\sum_{i=1}^{LO/IC/} d_i}{LO/IC/} \quad [s/P] \quad /4.13/$$

gdzie: D/IC/ - sumaryczne straty czasu przypadające na cykl IC [s],

LO/IC/ - liczba pojazdów obsłużonych w cyklu IC [P].

Analogicznie obliczane są średnie straty czasu $d_z/IC/$ przypadające na pojazd zatrzymany w cyklu IC. Wtedy zamiast LO/IC/ brana jest do wzoru /4.13/ liczba LZ/IC/ pojazdów zatrzymanych, spośród obsłużonych w cyklu IC.

Długości kolejek /w [P] oraz w [m]/ zapamiętywane są w momencie osiągnięcia maksimum w każdym cyklu oraz w chwili zakończenia obsługi ostatniego pojazdu w cyklu /kolejka na końcu sygnału zielonego równoznaczna z liczbą pojazdów zostających na następny cykl/.

Nasylenie wlotu w każdym z cykli określane jest zgodnie z wzorem /1.1/, przy czym natężenie ruchu q - rejestrowane w przekroju I - brane jest z okresu odpowiadającego rozważanemu cyklowi, a natężenie nasycenia s obliczane jest z uwzględnieniem aktualnej struktury rodzajowej potoku. Współczynnik ekwiwalentny dla samochodów ciężarowych, określony przy wzięciu pod uwagę relacji między czasami obsługi samochodów osobowych i ciężarowych a także

długościami stanowisk w kolejce, przyjęto 1,8 /potwierdza to rezultat uzyskany w pracy [43] /. Sygnał zielony efektywny obliczany jest z zależności:

$$G_e = G + Z - t_f \quad [s] \quad /4.14/$$

gdzie: G i Z - rzeczywiste długości sygnałów zielonego i żółtego [s],

t_f - czas tracony w fazie ruchu w cyklu [s]

$$t_f = 1,2 + Z - Z_e \quad [s] \quad /4.15/$$

1,2 - oznacza stratę czasu w [s] ponoszona przez pierwsze pojazdy z kolejki,

Z_e - efektywna, wykorzystywana przez ruch, część sygnału żółtego.

Uciążliwość oczekiwania pojazdu, jeżeli pojazd nie może być obsłużony w jednym cyklu, wiąże się nie tylko z czasem oczekiwania, ale również z wielokrotnym podsuwaniem się i zatrzymaniami w kolejce. Dla oceny tych uciążliwości zliczane są w programie pojazdy zatrzymujące się wielokrotnie na wlocie skrzyżowania. Zgodnie z reżimem obsługi, właściwym relacji bezkolizyjnej na skrzyżowaniu z sygnalizacją o stałym programie, każde kolejne zatrzymanie danego pojazdu /począwszy od drugiego zatrzymania/, oznacza konieczność oczekiwania o jeden cykl dłużej. Pojazdy nie obsłużone w cyklu, w którym się zgłosiły, rejestrowane są w grupach pojazdów oczekujących 2,3 oraz 4 i więcej cykli.

Przedstawione wyżej najistotniejsze dane charakteryzujące sprawność funkcjonowania wlotu skrzyżowania, zbierane są podczas symulacji, w czasie tzw. okresu obserwacji T_0 . Okres ten poprzedzony jest czasem rozruchu T_R , kiedy to nie rejestruje się danych z uwagi na potrzebę eliminacji wpływu warunków początkowych, w jakich rozpoczyna się przebieg symulacyjny. Jednym ze sposobów redu-

kowania wpływu stanu początkowego jest właśnie pominięcie początkowej części przebiegu [24] i rozpoczęcie zbierania danych statystycznych po upływie okresu rozruchu T_R . Długość okresu T_R , przeznaczoną na ustabilizowanie się sytuacji ruchowej na wlocie skrzyżowania, przyjęto na podstawie obserwacji wstępnych przebiegów symulacyjnych, równą 900 s /15 cykli po 60 s/. Przy ustalaniu czasu rozruchu T_R brano również pod uwagę warunek jego podzielności przez długość interwału t_{si} o stałej intensywności zgłoszeń $/t_{si} = 300 \text{ s/}$.

4.3.2. Zakres wyników symulacji

Program symulacyjny SYGNAL-2 umożliwia zbieranie danych o przebiegu ruchu, na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją o stałym programie, odnoszących się do poszczególnych cykli, jak również całego okresu obserwacji T_0 . Wyniki symulacji charakteryzujące ruch w cyklach:

- kolejki maksymalne $K/IC/$ $[\bar{P}]$,
- długości kolejek maksymalnych $L_K/IC/$ $[m]$,
- sumaryczne straty czasu $D/IC/$ $[s]$,
- średnie straty czasu na pojazd $d/IC/$ i pojazd zatrzymany $d_Z/IC/$ $[s/P]$,
- liczba $LZ/IC/$ lub procent $Z/IC/$ pojazdów zatrzymanych $[\bar{P}]$ lub $[\%]$
- stopień nasycenia wlotu $x/IC/$,
- liczba pojazdów obsłużonych $LO/IC/$ $[\bar{P}]$, z wyszczególnieniem liczby samochodów ciężarowych,
- liczba pojazdów zostających na następny cykl /kolejka na końcu sygnału zielonego/ $K_K/IC/$ $[\bar{P}]$, z wyszczególnieniem liczby s.c.,
- stopień obciążenia wlotu $x^*/IC/$ - jako stosunek zgłaszających się lub oczekujących przed linią stop pojazdów do przepustowości pasa w cyklu.

W odniesieniu do całego okresu obserwacji T_0 , stanowiącego

wielokrotność długości cyklu, dla zbiorów wartości każdego z wyżej wymienionych wskaźników funkcjonowania skrzyżowania obliczane są statystyki takie jak; średnia, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności, skośność. Wskaźniki te charakteryzują zmienność wartości poszczególnych wskaźników w czasie /w okresie T_0 /. Liczebność prób, na podstawie których wyznaczone są te statystyki, równa jest liczbie cykli w okresie obserwacji $/T_0/T/$.

Ponadto dla okresu obserwacji T_0 określane są:

- maksymalna kolejka $K[P]$ i jej długość $L_K[m]$,
- sumaryczne straty czasu $D [s]$,
- średnie straty czasu przypadające na pojazd \bar{d}^* i pojazd zatrzymany $\bar{d}_Z^*[s/P]$, /por. p. 5.31/,
- liczba pojazdów zmieniających prędkość - w odniesieniu do tych pojazdów, które nie zatrzymały się na wlocie,
- liczby pojazdów oczekujących na obsługę 2, 3, 4 i więcej cykli.

Przykładowy wydruk danych i wyników symulacji ruchu przedstawiono w aneksie na rys. 4.1.a i b, przy czym rys. 4.1.a dotyczy I części programu SYGNAL-2 /generowanie potoku pojazdów/, a rys. 4.1.b części II /symulacja przebiegu ruchu na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją/.

4.4. Weryfikacja modelu ruchu

Jakkolwiek skonstruowany model symulacyjny ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną o stałym programie, opracowany został na podstawie wnikliwej obserwacji, oraz szczegółowych badań ruchu w warunkach rzeczywistych, to aby mieć pełne zaufanie do uzyskiwanych z przebiegów symulacyjnych wyników, a tym samym do rezultatów dalszych badań, niezbędna jest jego weryfikacja.

Sprawdzeniem poprawności działania objęto przede wszystkim generatory strumienia zgłoszeń oraz jego atrybutów, a w dalszej kolej-

ności przeprowadzono weryfikację niektórych wyników końcowych symulacji przez porównanie z danymi uzyskanymi z pomiarów ruchu na skrzyżowaniu.

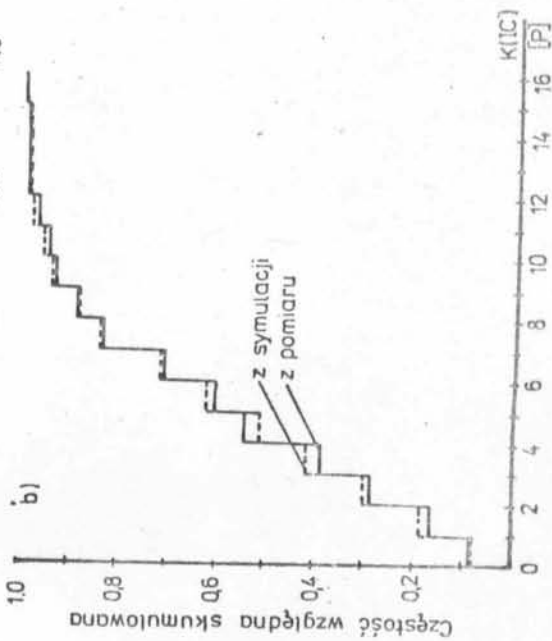
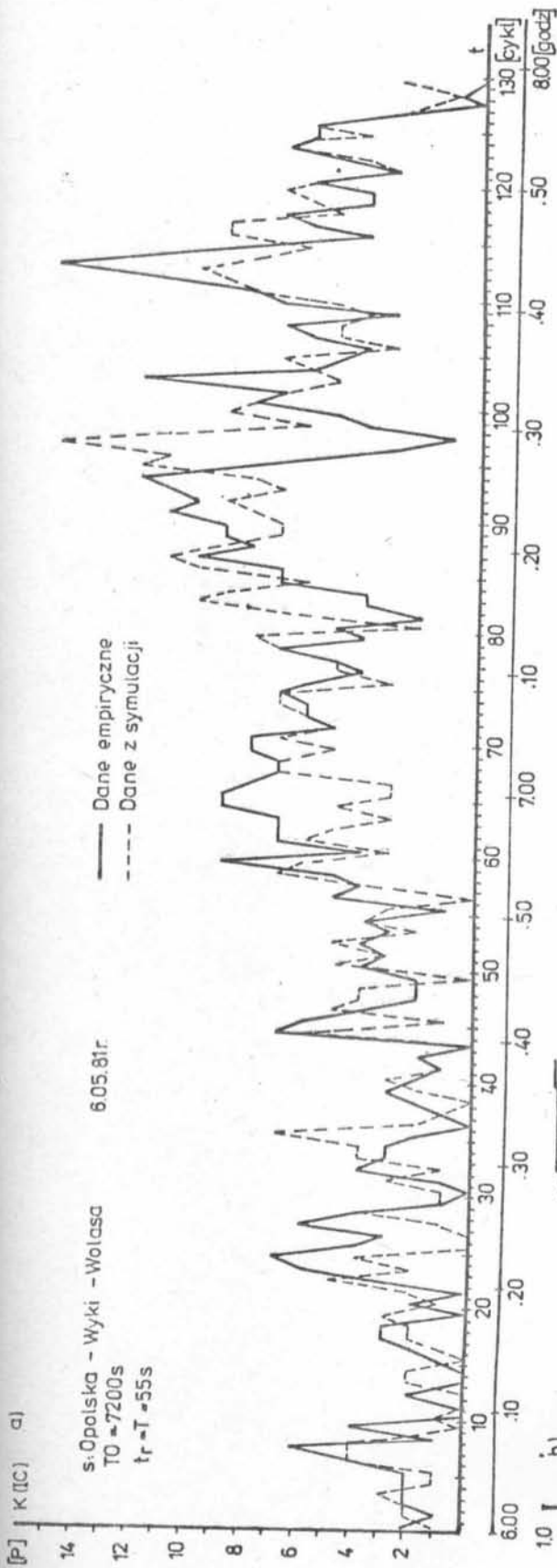
Dla sprawdzenia adekwatności odwzorowania struktury rodzajowej potoków dokonano porównania /tablica 4.2 w aneksie/ prawdopodobieństw warunkowych występowania samochodów osobowych i ciężarowych w wygenerowanych potokach z prawdopodobieństwami obliczonymi analitycznie wg ustalonych empirycznie wzorów /3.16/ + /3.19/. Porównanie to wykazuje dużą zgodność rezultatów, szczególnie w zakresie większych natężeń N i udziałów samochodów ciężarowych u_c w ruchu. Występujące przy mniejszych wartościach N i u_c odchylenia od prawdopodobieństw obliczonych analitycznie nie przekraczają występujących w rzeczywistości odchyleń pojedynczych obserwacji od wyznaczonych regresyjnie zależności.

Dane z generatora czasów przejazdu t_p odcinka wlotowego posiadają rozkład odpowiadający dokładnie rzeczywistemu rozkładowi $N/t_p, \sigma t_p$ /rys. 4.1 w aneksie/.

Dla weryfikacji wyników symulacji w zakresie najistotniejszych mierników oceny efektywności sterowania tj. kolejek i strat czasu, dokonano pomiarów ruchu na skrzyżowaniu Opolska - Wyki - Wolasa. W pomiarach zastosowano techniki filmową i telewizyjną, oraz jako uzupełniający, prowadzono równoległe pomiar manualny. O konieczności skorzystania z obu tych technik równocześnie zdecydowała potrzeba ciągłej rejestracji ruchu w okresie czasu $T_0 = 2$ godz./przekraczającym możliwość zapisu na taśmie filmowej lub magnetycznej. Ciągły pomiar był zaś niezbędny dla uchwycenia zmienności mierzonych parametrów w czasie /przy interwale rejestracji $t_r = T = 55$ s/. Zarejestrowane podczas 2 pomiarów potoki poddano, przy zastosowaniu programu EMPIR, wygładzaniu wykładniczemu a następnie obliczono relatywne intensywności w interwałach odpowia-

dających długości cyklu. Wygenerowane na ich podstawie potoki porównano z rzeczywistymi /rys. 4.2 i 4.3 w aneksie/ biorąc za podstawę porównania; zmienność natężenia w czasie, dystrybuanty rozkładu liczb pojazdów w cyklach oraz wartości wskaźników charakteryzujących natężenie potoków. Uzyskana duża zgodność odwzorowania potoku dopływającego do skrzyżowania potwierdziła wcześniejsze wnioski /p. 4.1.2/ o adekwatności części generacyjnej modelu. Wyniki w zakresie kolejek i strat czasu uzyskane z symulacji przebiegu wygenerowanych potoków na skrzyżowaniu, przy sterowaniu odpowiadającym rzeczywistemu, przedstawiono na rys. 4.9 i 4.10 podając równocześnie wyniki empiryczne. Wykresy; zmienności w czasie i dystrybuanty rozkładu kolejek maksymalnych w cyklach oraz zestawienie parametrów rozkładu kolejek maksymalnych w cyklach /rys. 4.9/ dotyczą potoków ruchu /rzeczywistego i z generatora/ z pierwszego dnia pomiarów /rys. 4.2 w aneksie/, zaś analogiczne wykresy oraz zestawienie parametrów rozkładu w odniesieniu do strat czasu /rys. 4.10/ potoków - z drugiego dnia pomiarów /rys. 4.3 w aneksie/. W obu tych przypadkach zauważyć można bardzo dobrą zgodność wyników z symulacji z danymi rzeczywistymi i to nie tylko w odniesieniu do pojedynczych statystyk, jak np. wartość średnia, ale również rozkładów wartości mierników efektywności sterowania rejestrowanych w cyklach a także ich zmienności w czasie. Z uwagi na niestacjonarność symulowanych procesów ruchu prawidłowe odwzorowanie zmienności w czasie mierników charakteryzujących funkcjonowanie skrzyżowania ma pierwszorzędne znaczenie.

Dokonane wrywkowe porównanie wyników symulacji i rzeczywistych, wykazujące dobrą zgodność rezultatów, pozwala uznać opracowany model symulacyjny za poprawny.

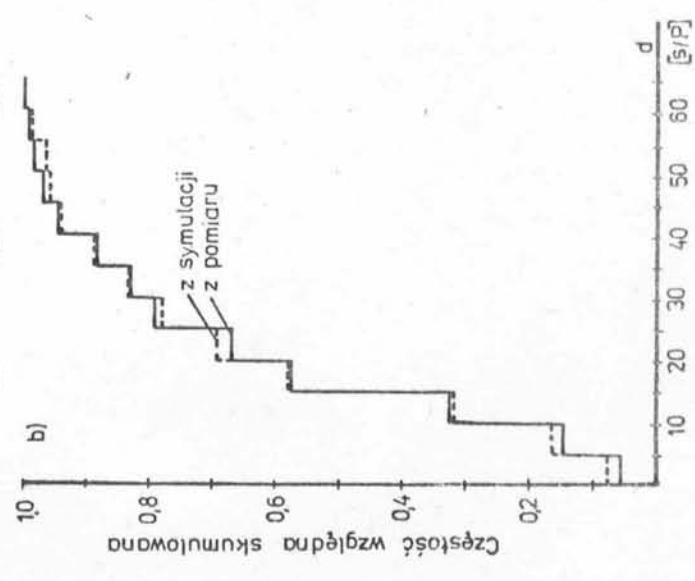
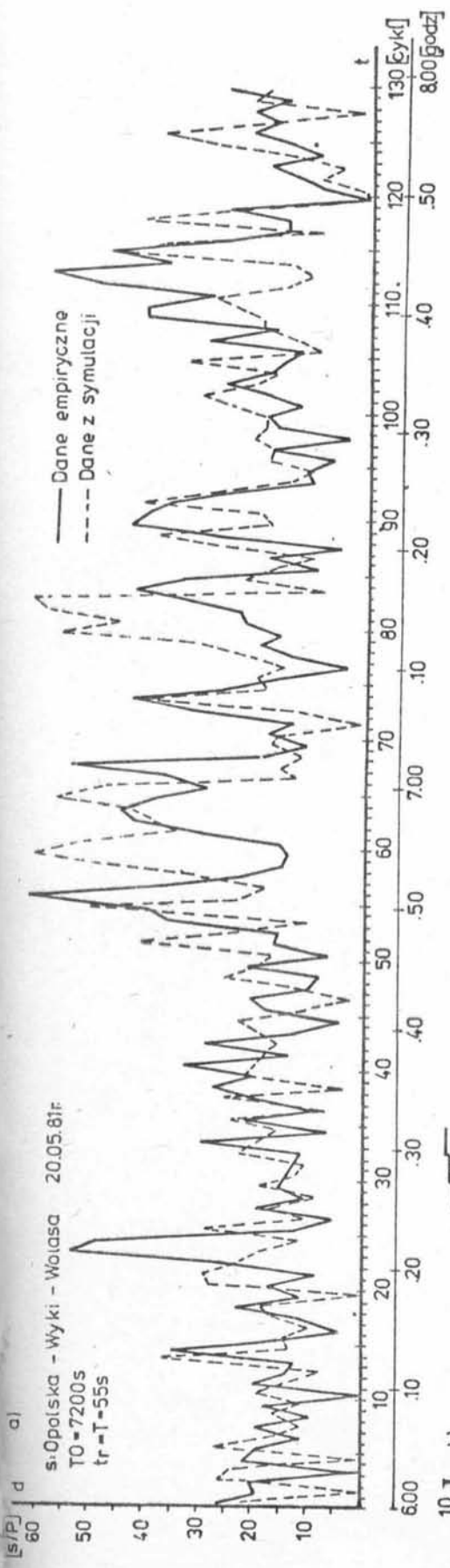


Parametry rozkładu kolejek maksymalnych w cyklach

	Srednia \bar{K} [P]	Odczylenie standardowe S_k [P]	Współczynnik zmienności ξ_k [-]	Współczynnik skrajności g_{ik} [-]
Z pomiaru	4,70	3,14	0,668	0,553
Z symulacji	4,64 (3,67)*	3,08 (1,98)	0,664 (0,54)	0,454 (0,294)

*) w nawiasach podano wyniki uzyskane dla potoku stacjonarnego

Rys. 4.9. Porównanie maksymalnych kolejek w cyklach zarejestrowanych w czasie pomiaru i uzyskanych z symulacji:
 a/ zmienność w czasie,
 b/ dystrybuanta rozkładu kolejek w cyklach,
 c/ parametry rozkładu kolejek



c) Parametry rozkładu strat czasu w cyklach

	Srednia \bar{d} [s/P]	Odczylenie standardowe S_d [s/P]	Współczynnik zmienności ϵ_d [-]	Współczynnik skośności g_{1d} [-]
Z pomiaru	21,56	12,62	0,585	0,908
Z symulacji	21,81 (18,87*)	13,48 (9,86)	0,618 (0,523)	0,868 (0,315)

*) W nawiasach podano wyniki uzyskane dla potoku stacjonarnego.

Rys. 4.10. Porównanie strat czasu zarejestrowanych w czasie pomiaru i uzyskanych z symulacji:
 a/ zmienność w czasie,
 b/ dystrybuanta rozkładu strat czasu w cyklach,
 c/ parametry rozkładu strat czasu

4.5. Założenia do badań symulacyjnych dla oceny efektywności sterowania sygnalizacją świetlną

Dla określenia zależności mierników oceny efektywności sterowania od podstawowych parametrów ruchu niezbędne jest zrealizowanie badań symulacyjnych w szerokim zakresie. Każdy bowiem eksperyment symulacyjny daje wartości poszczególnych mierników odnoszące się do pojedynczej wartości wprowadzanego parametru, będącego zmienną niezależną. Jako podstawowe zmienne niezależne przyjęto w badaniach natężenie ruchu N [P/h] i udział sygnału zielonego efektywnego w cyklu λ lub średni stopień nasycenia wlotu \bar{x} , liczony jako średnia arytmetyczna stopni nasycenia wlotu w poszczególnych cyklach. Badania prowadzono w odniesieniu do potoków niestacjonarnych o profilach natężenia ruchu LL, LS i LP oraz potoku stacjonarnego - LR, przy różnych udziałach samochodów ciężarowych w ruchu. Ze względu na obszerność tak zaplanowanych eksperymentów symulacyjnych w zakresie parametrów sterowania ograniczono się jedynie do cyklu o długości $T = 60$ s z różnymi splitami λ . Badania numeryczne prowadzono przy następujących wartościach najważniejszych danych ruchowych:

- natężenie ruchu $N = 150 + 950 / P/h$, profile natężenia LL, LS, LP, LR,
- minimalny odstęp czasowy w potoku w przekroju generowania $t_{om} = 1,10$ s,
- udział samochodów ciężarowych w ruchu; zasadniczo $u_c = 0,25$ jako reprezentatywny udział dla jednej z liczniejszych grup skrzyżowań, oraz $u_c = 0,00, 0,10, 0,35$,
- udział światła zielonego efektywnego w cyklu $\lambda = 0,33, 0,41, 0,50, 0,58, 0,66$,
- czasy obsługi pojazdów na sygnale zielonym / Δt / wg rys. 4.6,
- minimalny odstęp między pojazdami przejeżdżającymi linię stop bez zatrzymań $DMIN = 2,0$ s,

- parametry określające ruszanie pojazdów w kolejce /rys. 4.6/:
 $RK1 = 1.1 \text{ s}$, $RK2 = 0.7 \text{ s}$, $RK = 0.8 \text{ s}$,
- długości stanowisk pojazdów w kolejce l_s wg rys. 4.6,
- opóźnienie czasowe przy hamowaniu /rys. 4.6/ $t_{\lambda} = 3.0 \text{ s}$,
- czasy przejazdu odcinka wlotowego /I - II o długości 250 m/:
samochody osobowe $\bar{t}_p = 17.0 \text{ s}$, $\sigma_{t_p} = 2.5 \text{ s}$,
samochody ciężarowe $\bar{t}_p = 20.0 \text{ s}$, $\sigma_{t_p} = 2.8 \text{ s}$.

Każdy przebieg symulacyjny obejmował okres rozruchu $T_R = 900 \text{ s}$ /15 cykli/ i okres obserwacji $T_O = 5400 \text{ s}$ /90 cykli/, czyli razem 6300 s rzeczywistego ruchu. Zaplanowane badania symulacyjne dotyczyły głównie:

- strat czasu,
- kolejek maksymalnych w cyklach oraz na końcu światła zielonego,
- zatrzymań,
- cykli przeciążonych podczas okresu obserwacji,
- wpływu struktury rodzajowej na podstawowe mierniki efektywności sterowania.

5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ SYMULACYJNYCH

Zasadnicza analiza, opracowanych statystycznie / przez maszynę cyfrową/ danych z eksperymentów symulacyjnych prowadzona była dla uzyskania zależności między parametrami ruchu i sterowania a miernikami oceny efektywności sterowania. W celu wykazania wpływu wahań ruchu /jego niestacjonarności/ na efektywność sterowania, dokonano porównań uzyskanych zależności, przyjmując jako punkt odniesienia zależności występujące w przypadku stacjonarnych potoków. Większość podstawowych związków, opisujących ruch na skrzyżowaniach jak również sterowanie jego przebiegiem, ustalonych zostało przy założeniu stacjonarnych potoków ruchu, stąd też słuszną wydaje się właśnie taka analiza porównawcza, odniesiona do przypadków z potokami, których parametry nie ulegają zmianom w czasie.

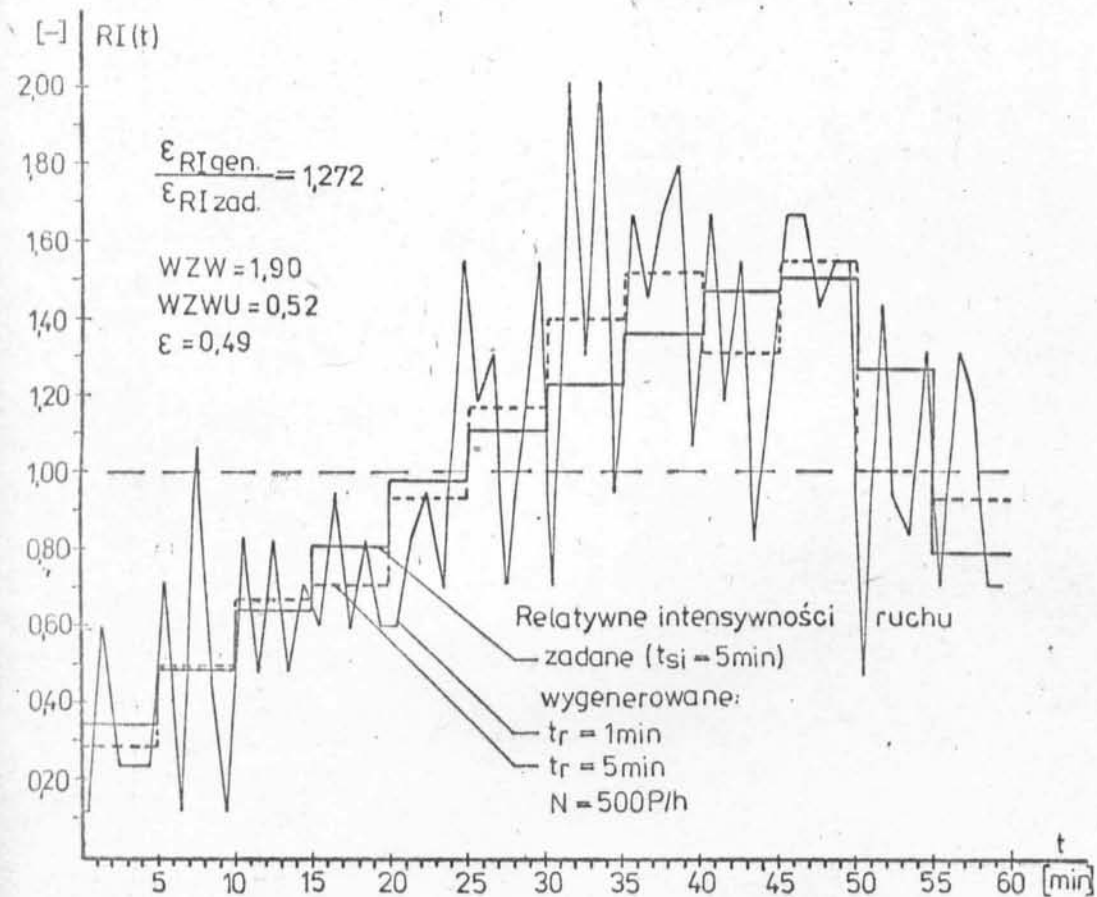
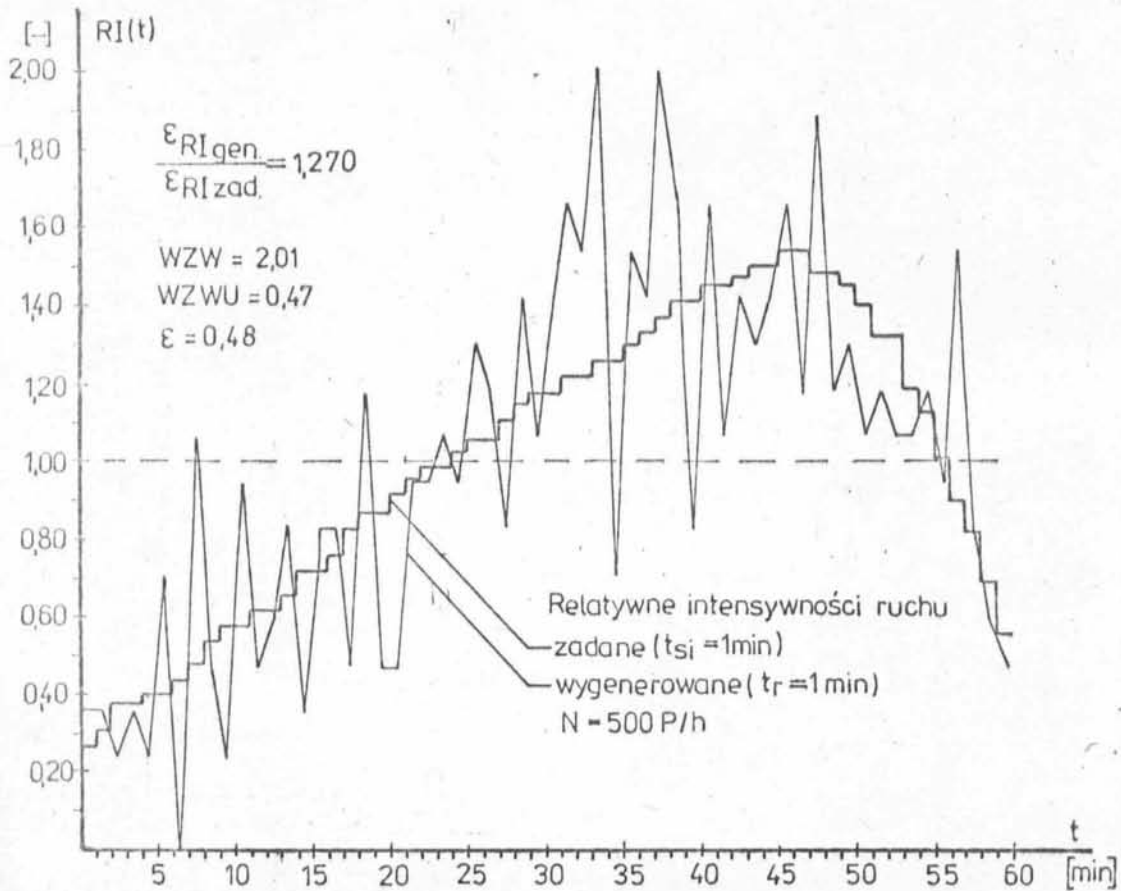
Jako najwłaściwszą metodę przedstawienia syntetycznych rezultatów badań symulacyjnych wybrano metodę graficzną. Sposób ten jasno ilustruje zależności funkcyjne i umożliwia wygodne dokonywanie porównań określonych zależności.

5.1. Ocena przyjętej wielkości interwału rejestracji zmian natężenia

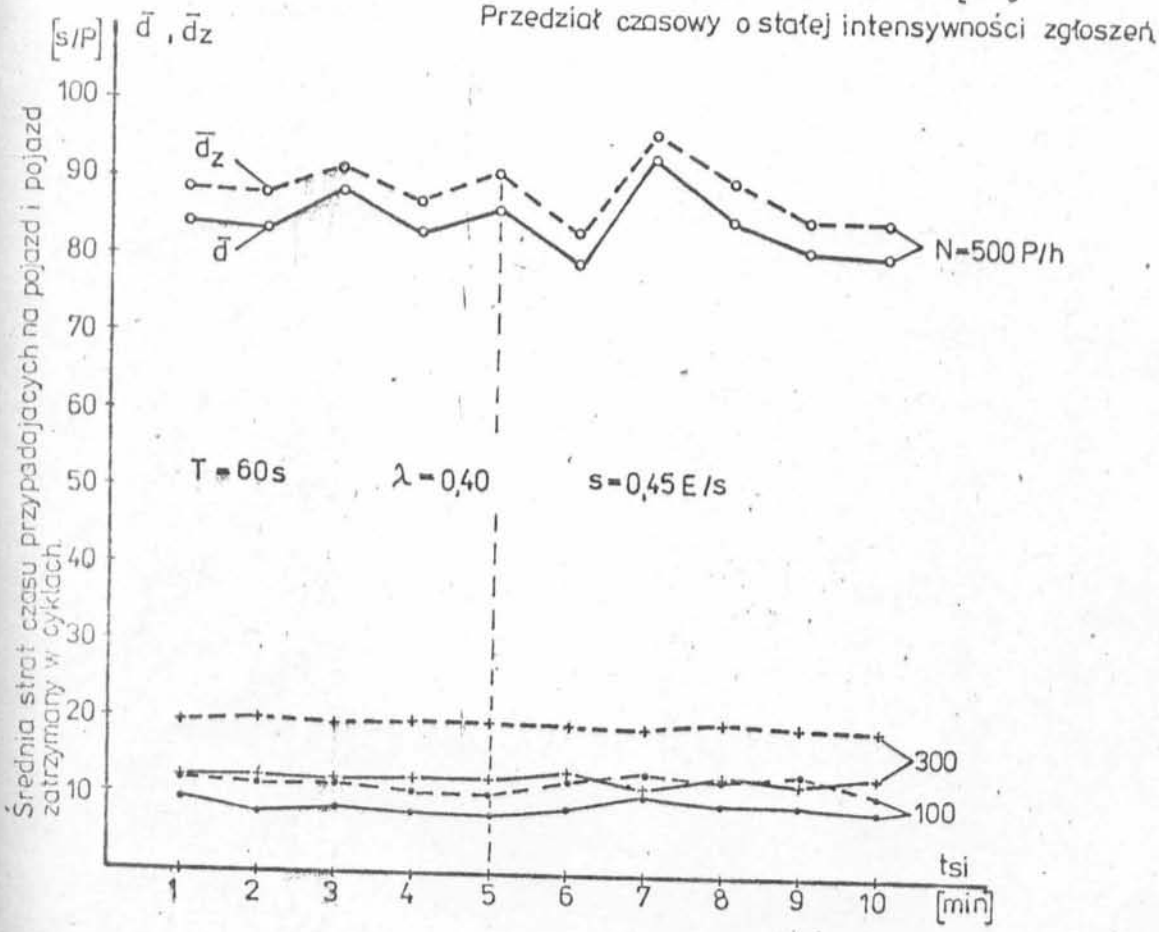
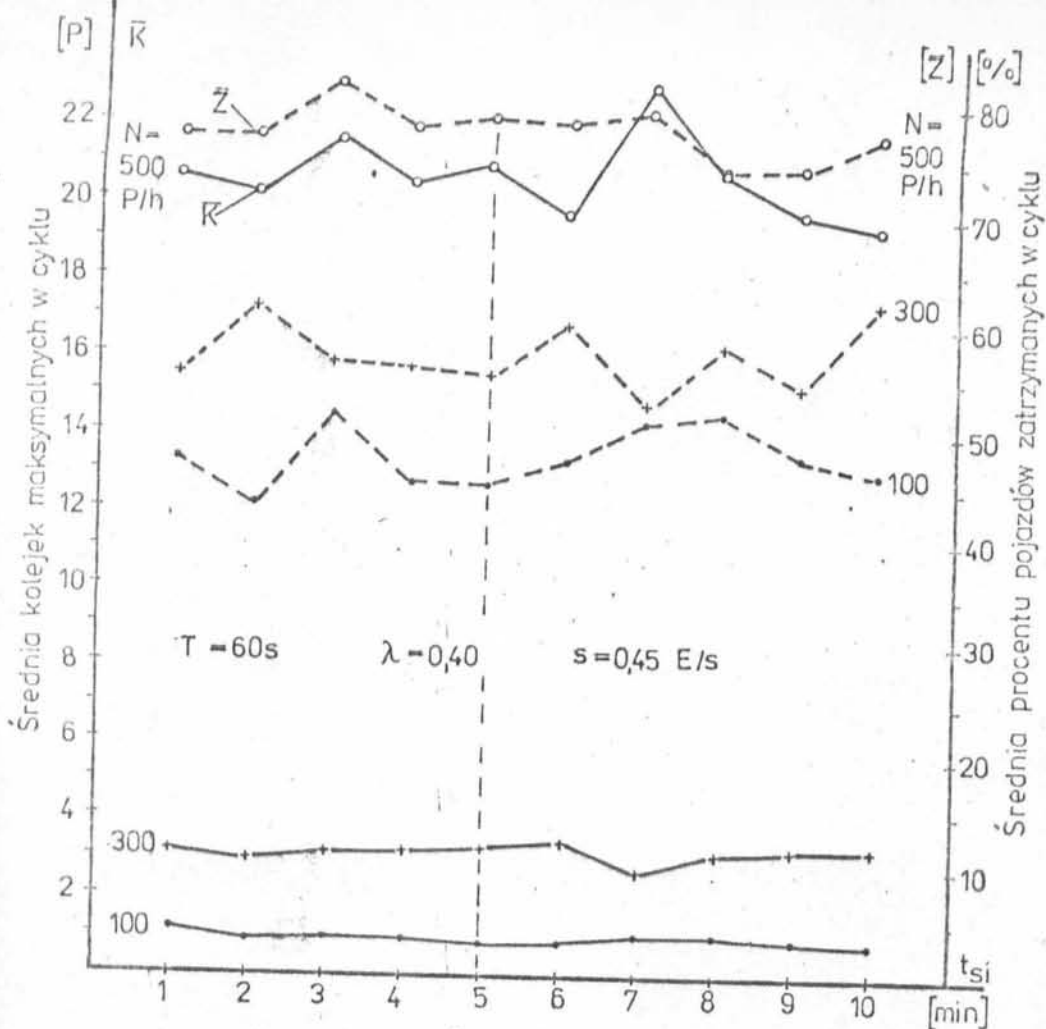
Odwzorowanie reprezentatywnych dla godzin szczytu potoków ruchu w przebiegach symulacyjnych następuje w oparciu o profile natężenia, z interwałami o stałej intensywności strumienia $t_{si} = 5$ min. Interwały te odpowiadają wielkością, uznanym za wystarczająco dokładne dla identyfikacji ruchu /p. 2.5/, interwałom rejestracji zmian natężenia t_r podczas pomiaru. Oznacza to więc, że uzyskane z pomiarów, realizowanych przy interwale rejestracji $t_r = 5$ min., dowolne profile natężenia ruchu mogą być

wprost brane za podstawę generowania strumienia zgłoszeń w badaniach modelowych. Dla zbadania, jaki wpływ na dokładność odwzorowania potoków ruchu w procesie symulacji miałyby przyjęcie mniejszego interwału t_{si} , dokonano porównania /rys. 5.1/ zrelatywizowanych linii zmienności natężeń wygenerowanych potoków, przy założeniu wyjściowych, unormowanych profili natężenia z interwałami o stałej intensywności $t_{si} = 1$ i 5 min. Wartości wskaźników charakteryzujących zmienność natężeń /przy $t_r = 1$ min./ w obu przypadkach różnią się niewiele. Profile natężeń wygenerowanych potoków są bardzo zbliżone a zmienność ich minutowych wartości względem profili zadanych jest prawie identyczna, o czym świadczą stosunki współczynników zmienności $\xi_{RIgen} / \xi_{RIzad}$. Wynioskować można z tego, że w przypadku unormowanych, wyjściowych profili natężenia przyjęcie krótkich interwałów t_{si} nie wpływa w widoczny sposób na zmianę postaci uzyskanego z generatora potoku ruchu, a niewątpliwie jest mniej korzystne ze względów praktycznych /pomiaru i przygotowanie danych do symulacji/.

Istotą symulacji stanowi jednakże nie samo odwzorowanie strumienia pojazdów lecz numeryczne modelowanie funkcjonowania wlotu skrzyżowania i w efekcie uzyskanie informacji o jego sprawności. Dlatego też podobnej ocenie jak w przypadku wygenerowanych potoków poddano końcowe wyniki symulacji, uzyskane przy wyjściowym, unormowanym profilu z interwałami t_{si} o różnej długości. Wpływ długości interwału t_{si} na średnie wartości podstawowych mierników efektywności sterowania, takich jak kolejki, zatrzymania oraz straty czasu przypadające na pojazd i pojazd zatrzymany, przedstawiono na rys. 5.2. W przypadku małych natężeń ruchu / $N = 100, 300$ P/h/ wartości poszczególnych mierników praktycznie nie zmieniają się mimo stosowania różnych interwałów t_{si} przy generowaniu strumienia zgłoszeń. Przy większym natężeniu



Rys. 5.1. Porównanie potoków ruchu wygenerowanych, dla linii zmienności natężenia zadanej w różnych interwałach t_{si}



Rys. 5.2. Wpływ długości interwału o stałej intensywności zgłoszeń na wartości mierników oceny efektywności sterowania sygnalizacją świetlną

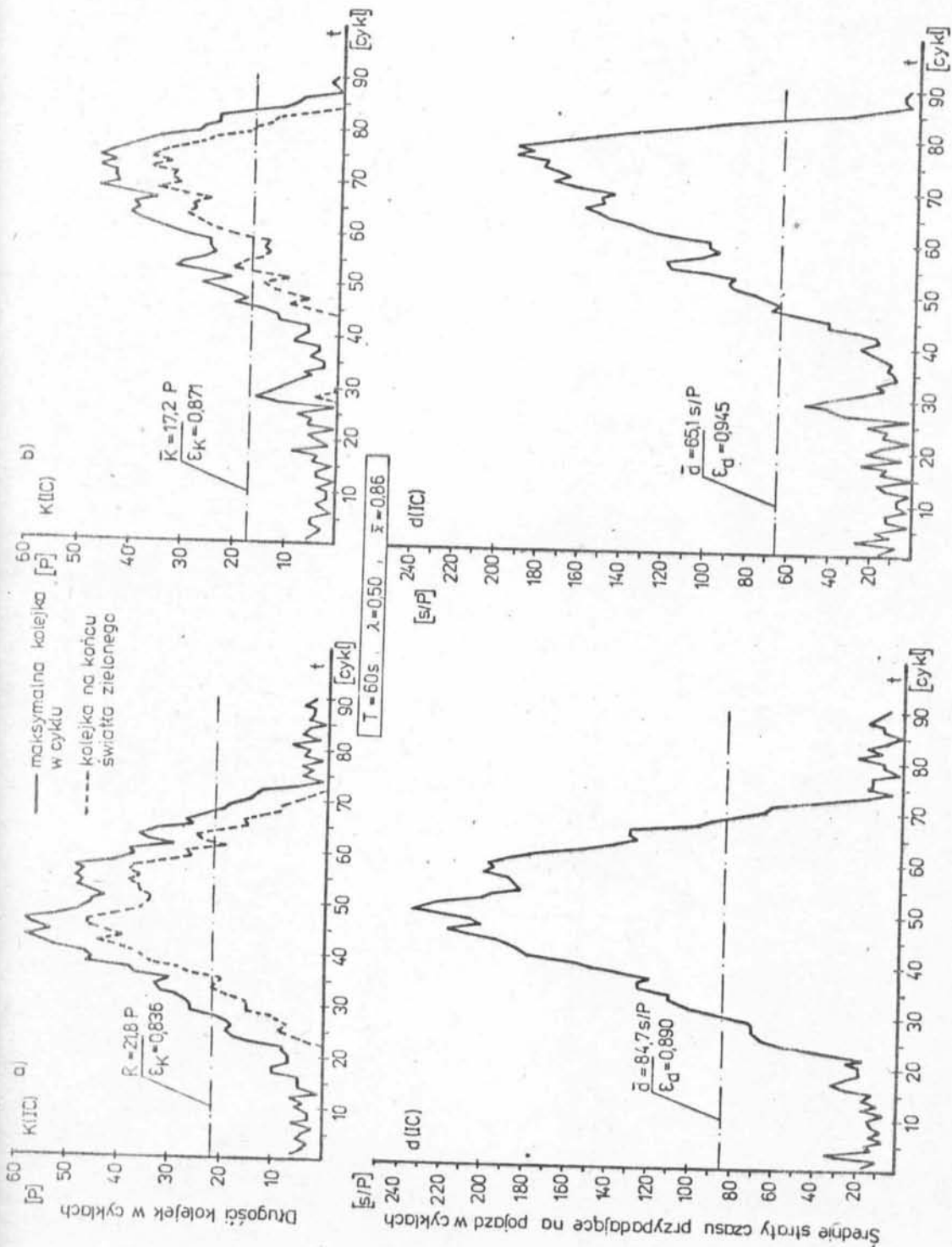
$/N = 500 P/h/$ wpływ zmian wielkości interwału o stałej intensywności t_{si} zaznacza się już wyraźniej, przy czym wzrostowi wielkości interwału t_{si} nie towarzyszą określone zmiany poszczególnych mierników. Zauważyć można jednak, że wielkość tych zmian w przedziale wartości t_{si} od 1 do 5 min. jest mała, co świadczy o braku istotnego wpływu długości interwału t_{si} z tego zakresu na końcowe wyniki symulacji. Powstaje pytanie, czy nie można przyjmować dłuższych interwałów t_{si} , np. 10 minutowych, ponieważ nawet przy takim interwale t_{si} wartości mierników efektywności sterowania niewiele odbiegają od wartości przy $t_{si} = 1$ min.? Pamiętać jednak należy /o czym była mowa w p. 2.4/, że wydłużenie na etapie pomiarów interwału rejestracji, odpowiadającego w procesie symulacji interwałowi t_{si} , może spowodować zniekształcenie rzeczywistych zmian stałych /trendu/ szeregu czasowego natężenia ruchu. W tej sytuacji wzięcie pod uwagę przy modelowaniu ruchu na skrzyżowaniu zmian natężenia ruchu zarejestrowanych w dłuższych interwałach $/t_r = t_{si}/$ może spowodować niedokładne bądź wręcz fałszywe odwzorowanie rzeczywistego potoku ruchu. Dlatego też, mimo uzyskania w przypadku unormowanych profili danych /rys. 5.2/ wskazujących na możliwość stosowania, bez ujemnego wpływu na wyniki końcowe, większych interwałów np. $t_{si} = 10$ min. wydaje się, że interwał $t_{si} = t_r = 5$ min. jest najwłaściwszym do identyfikacji potoków ruchu przy modelowaniu symulacyjnym w szerokim zakresie rozważanych przypadków /nie tylko unormowane, wyjściowe profile relatywnych intensywności strumienia/.

5.2. Porównanie warunków ruchu na wlocie skrzyżowania przy założeniu potoków stacjonarnych i niestacjonarnych

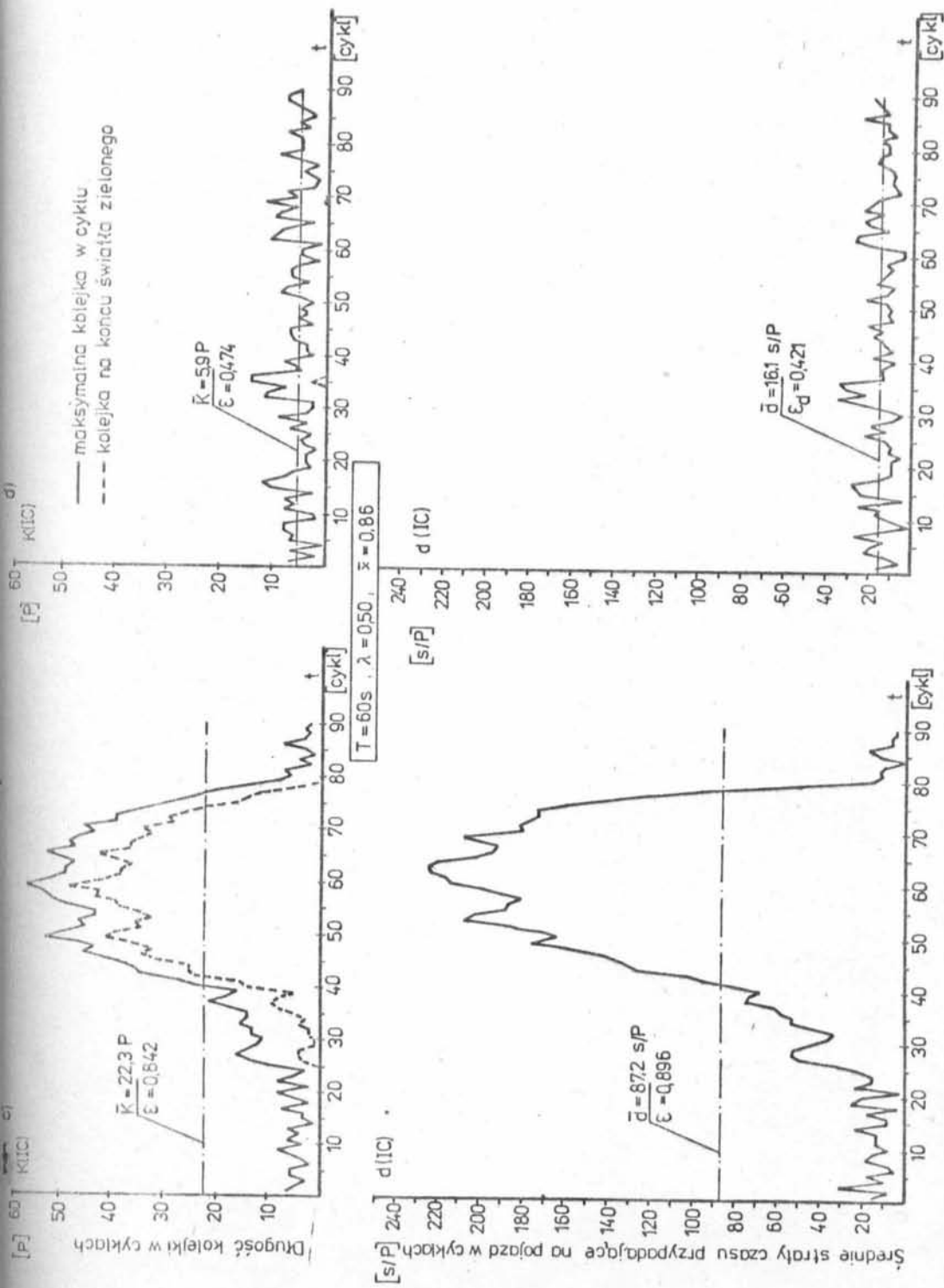
Dokonane w p. 4.1.2 porównanie wygenerowanych stacjonarnych

i niestacjonarnych potoków ruchu dopływających do wlotu skrzyżowania, wykazało znaczne zróżnicowanie ich charakteru. Przepływ tak wyraźnie zróżnicowanych potoków przez skrzyżowanie, przy eksploatacji danego, stałego programu sygnalizacji, musi również powodować odczuwalne różnice w warunkach ruchu i ich zmienności podczas okresu obserwacji. Potoki niestacjonarne, o średnim natężeniu pozwalającym określić stan wlotu, w odniesieniu do całego okresu obserwacji, jako nienasycony $\bar{x} < 1,0$, mogą powodować pewne okresy przeciążenia, charakteryzujące się znacznie gorszymi warunkami ruchu. Dlatego też, w przypadku niestacjonarnych potoków, istotne jest nie tylko rozważanie przeciętnych wartości parametrów charakteryzujących warunki ruchu w dłuższym okresie czasu, ale także ich zmienności w tym okresie. Analizę takiej zmienności w czasie umożliwia obliczanie i rejestracja w programie SYGNAL-2 najważniejszych mierników sprawności funkcjonowania skrzyżowania w kolejnych cyklach.

Dla wykazania wpływu niestacjonarności ruchu na warunki jego przebiegu na wlocie skrzyżowania sporządzono wykresy kolejek maksymalnych i kolejek na końcu sygnału zielonego, oraz strat czasu przypadających na pojazd w kolejnych cyklach okresu obserwacji $T_0 = 90$ cykli /rys. 5.3/ dla wszystkich przewidzianych do dalszych badań symulacyjnych profili natężenia: LL /rys. 5.3.a/, LP /rys. 5.3.b/, LS /rys. 5.3.c/ i LR /rys. 5.3.d/. Przy potokach niestacjonarnych /LL, LP, LS/ występuje we wszystkich przypadkach dość długi okres /ok. 50 cykli/ niestabilnych, uciążliwych warunków ruchu, pomimo, że średni stopień nasycenia w całym okresie obserwacji wynosi $\bar{x} = 0,85 < 1,0$. W sytuacji, gdy rozważany jest natomiast potok stacjonarny /rys. 5.3.d/ warunki ruchu pozostają stabilne w całym okresie obserwacji / $T_0 = 90$ cykli/. Generalnie kolejki i straty czasu, przy założeniu stacjonarności dopływają-



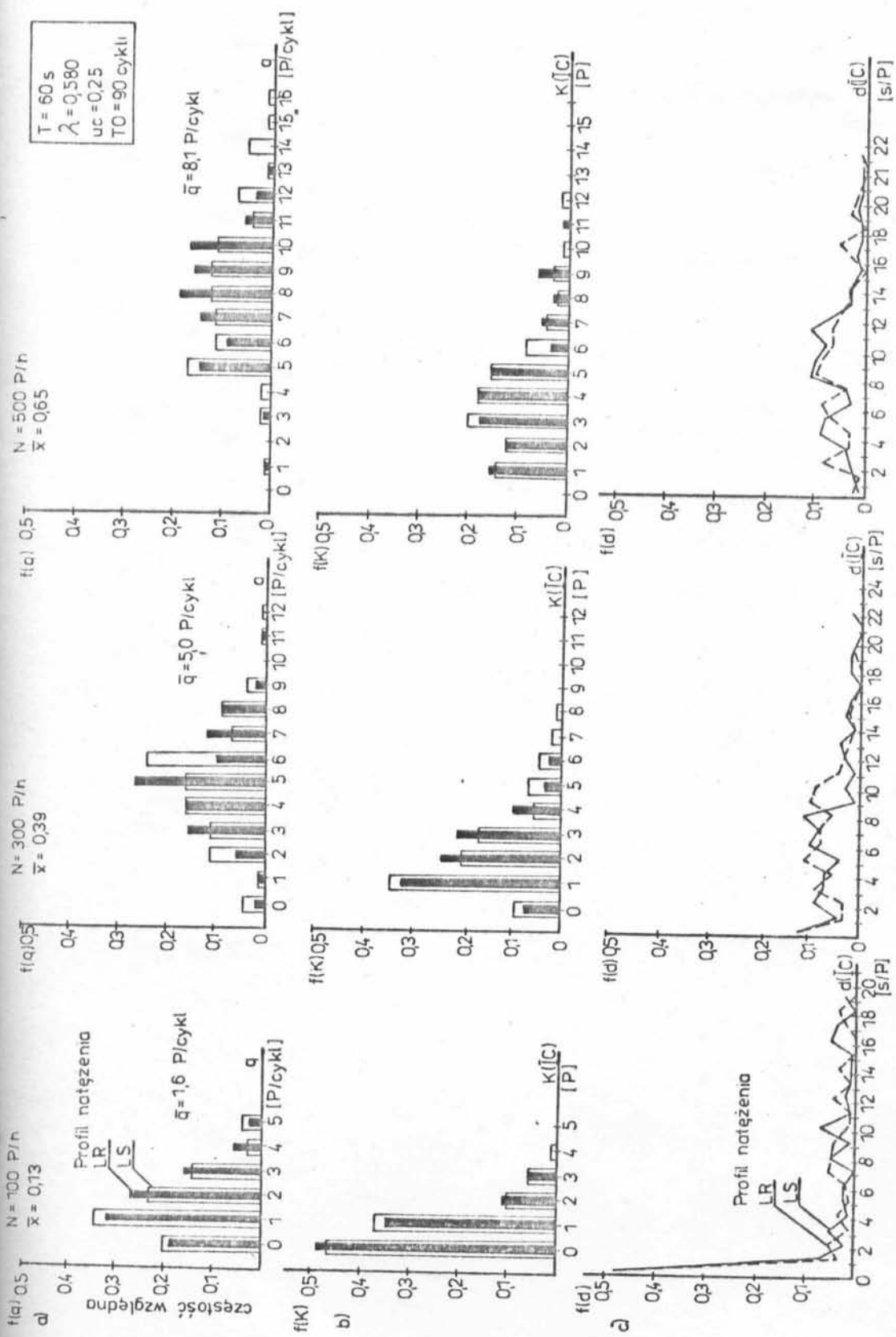
Rys. 5.3. a i b. Kolejki i straty czasu zarejestrowane w cyklach podczas symulacji ruchu na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją przy różnych potokach dopływających: a/ profil natężenia LL, b/ profil natężenia LP, c/ profil natężenia LS, d/ profil natężenia LR



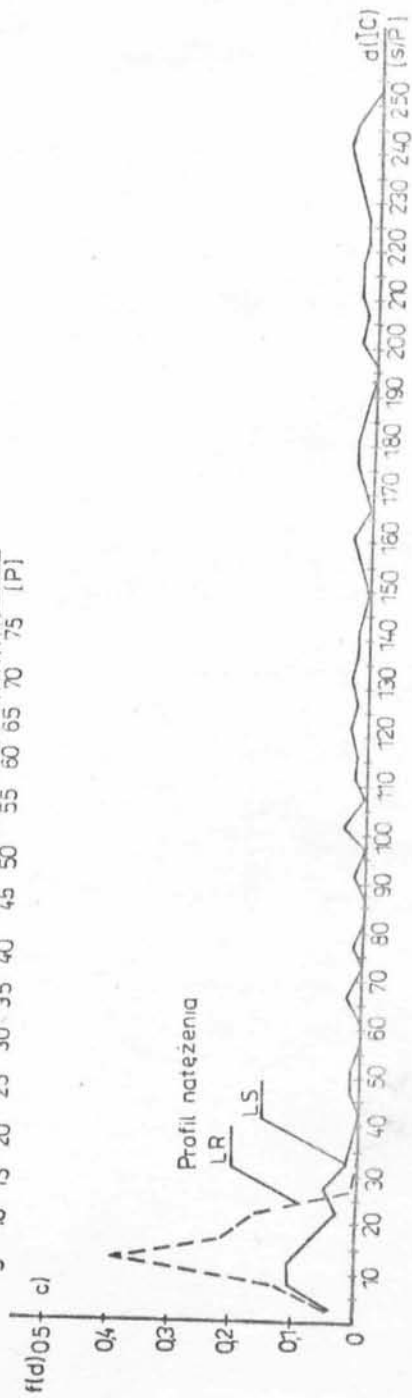
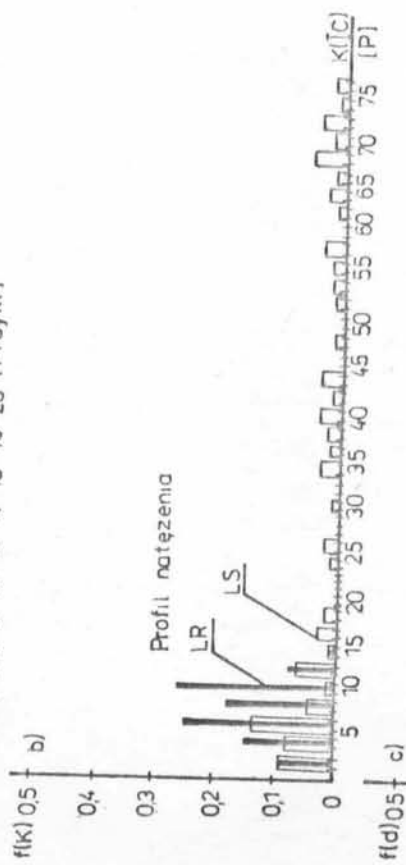
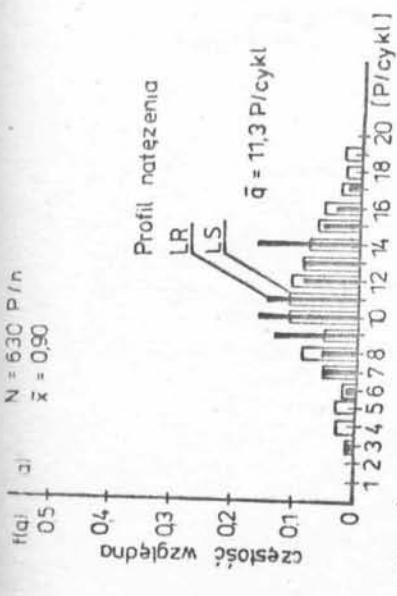
Rys. 5.3. c i d.

tego ruchu, są w całym okresie TO znacznie mniejsze, a więc i dokonana na ich podstawie ocena warunków ruchu w tym przypadku wypadłaby znacznie korzystniej, niż - w bliższym rzeczywistości - przypadku uwzględniającym faktyczne wahania ruchu. Warunki ruchu przy poszczególnych potokach niestacjonarnych /LL, LP, LS - rys. 5.3.a, b, c/ różnią się między sobą niewiele, w tym; momentami, w których rozpoczynają się i kończą okresy uciążliwych warunków ruchu /o czym świadczą np. kolejki na końcu sygnału zielonego/, oraz tempem powstawania i zaniku uciążliwości ruchu.

Porównanie rozkładów kolejek oraz strat czasu /rys. 5.4 oraz w aneksie tablica 5.1/ powstających w przypadku potoku stacjonarnego /LR/ i niestacjonarnego /LS/ przy różnych natężeniach ruchu / $N = 100 + 680 P/h$ / wskazuje, że przy mniejszych wartościach stopnia nasycenia wlotu / $\bar{x} = 0.13, 0.39$ i 0.65 / różnice w rozkładach tych parametrów są minimalne. Warunki ruchu, przy takich nasyceniach wlotu, będą więc praktycznie takie same, niezależnie od rodzaju przyjętego do rozważań potoku. W sytuacji, gdy stopień nasycenia wlotu zbliża się do jedności / $\bar{x} = 0.90$ / warunki ruchu, w przypadku potoku niestacjonarnego, znacznie się pogarszają w stosunku do przypadku stacjonarnego. Świadczy o tym występowanie, przy profilu natężenia LS, długich kolejek i dużych strat czasu na pojazd w cyklach. Stan taki w przypadku potoku niestacjonarnego spowodowany jest występowaniem w interwałach 5-minutowych natężeń przekraczających przepustowość wlotu. W sytuacji gdy średni dla okresu obserwacji o profilu natężenia LS, stopień nasycenia \bar{x} osiąga wartość 0.65, maksymalne natężenie w interwale 5 - min. nie przekracza jeszcze przepustowości /C/ wlotu /stanowi ok. 0.85 C/. Natomiast gdy $\bar{x} = 0.90$, natężenia z kilku interwałów 5 - min. /łącznie w okresie ok. 40 min./, przekraczają wartość przepustowości, przy czym maksymalne natężenie 5 - min. jest wyż-



Rys. 5.4. Rozkłady dojeżdżających pojazdów /a/, maksymalnych kolejek /b/ oraz strat czasu /c/ w cyklach w przypadku stacjonarnego /LR/ i niestacjonarnego /LS/ potoku ruchu i różnych jego natężeń



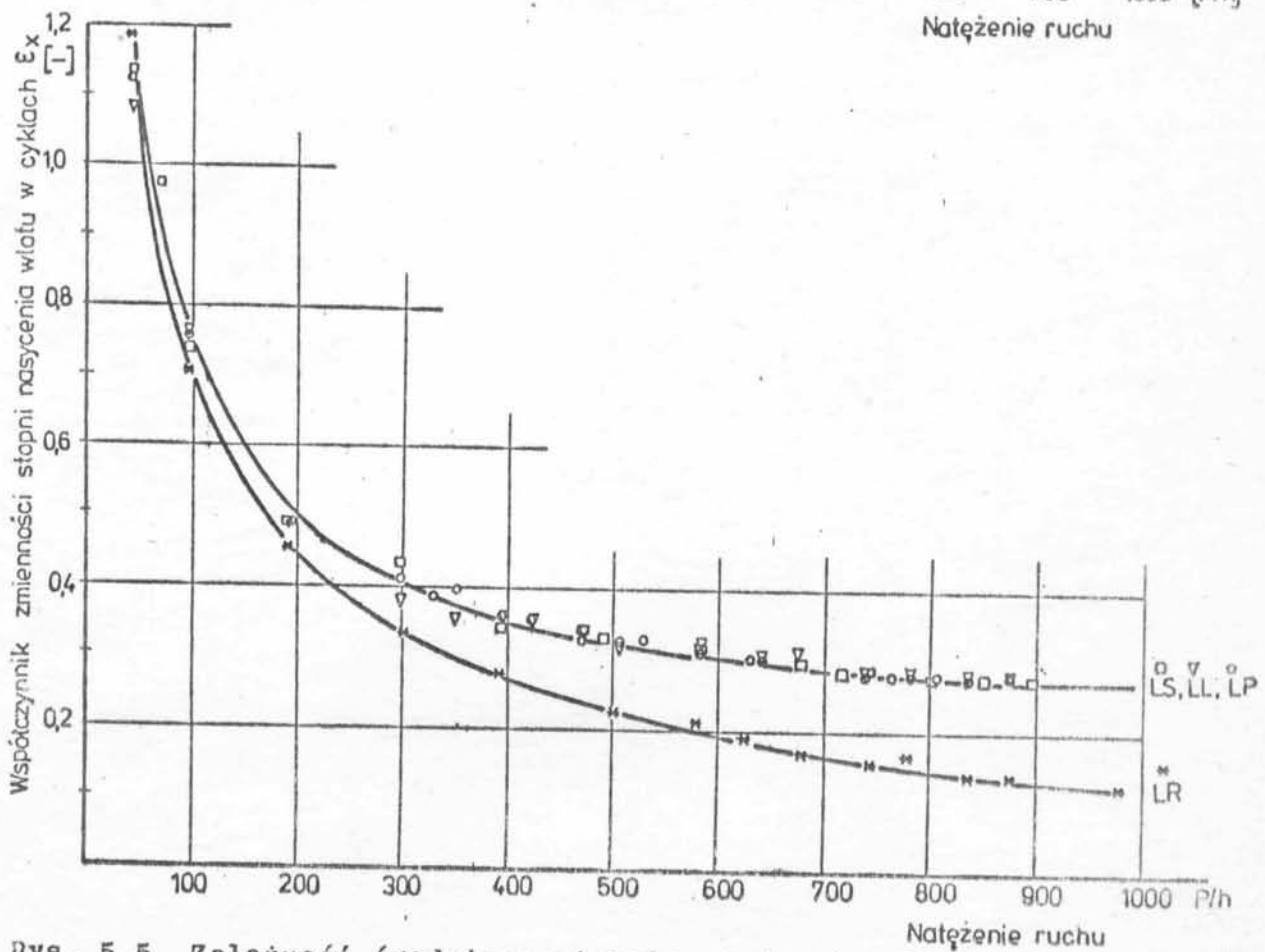
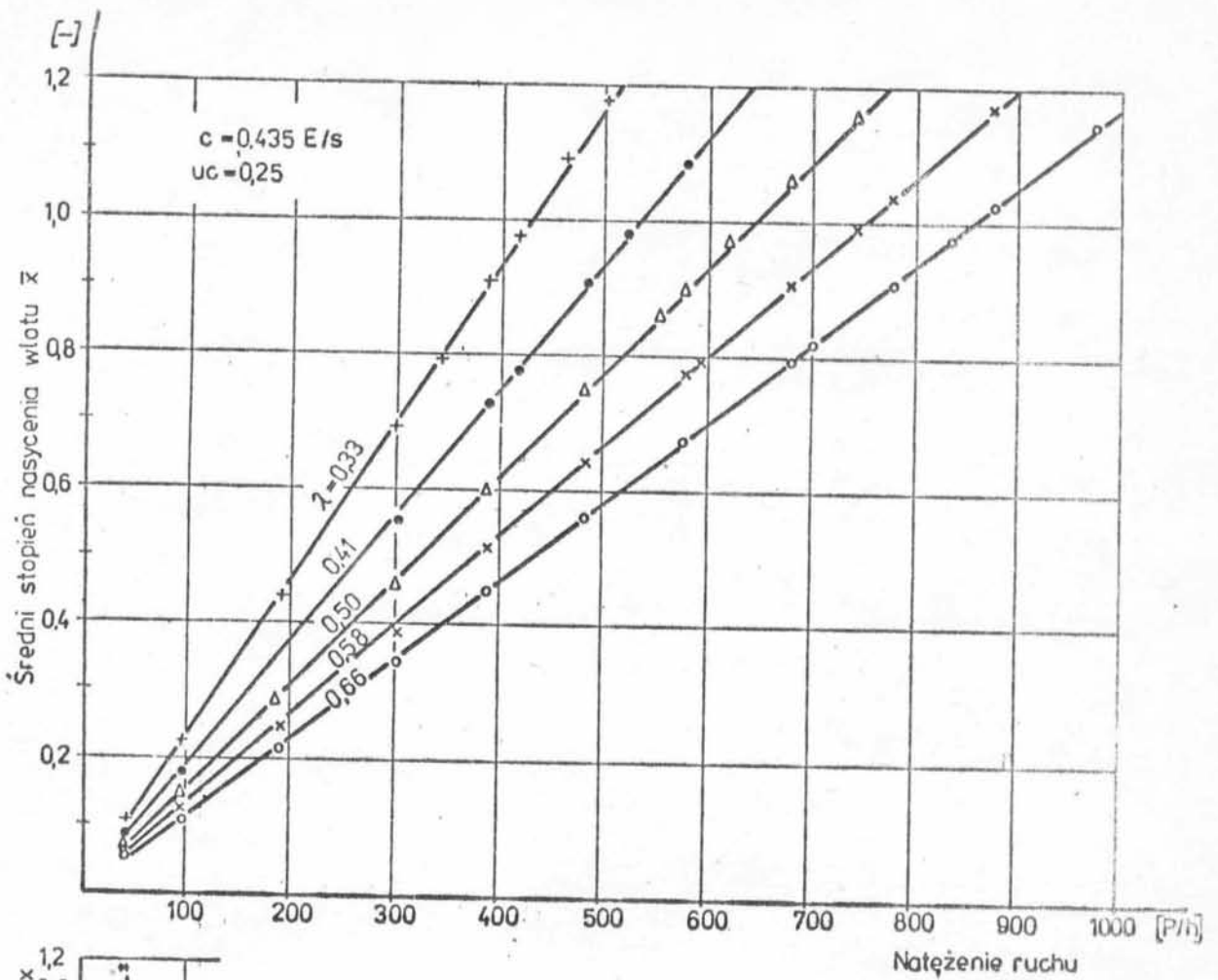
rys. 5.4. - cd.

sze od przepustowości o ok. 20%.

Powyższe uwagi a także analiza opracowanych na podstawie badań empirycznych profili natężenia /rys. 2.25/ ruchu w okresach szczytowych wskazują, że aby natężenia w interwałach 5-minutowych nie przekraczały przepustowości C , przy wymiarowaniu skrzyżowań, w oparciu o średnie natężenie z okresu szczytowego, należy przyjmować praktyczną przepustowość $C_{pr} \cong 0.75 C$ /przy czym C odpowiada maksymalnej przepustowości wlotu/.

5.3. Wpływ wahań ruchu na podstawowe mierniki oceny sprawności skrzyżowań

Wahania ruchu powodują, że stopień nasycenia wlotu, który jest wprost proporcjonalny do natężenia ruchu /wyrażonego np. liczbą pojazdów przypadających na cykl/, będzie również zmieniał się w okresie obserwacji. Dlatego też jego średnia wartość odniesiona do okresu T_0 , szczególnie w przypadku znacznych wahań ruchu /potok niestacjonarny/, nie stanowi wystarczającej wykładni obciążenia wlotu w tym okresie. Biorąc średni stopień nasycenia za podstawę analizy zmienności innych mierników oceny efektywności sterowania, trzeba mieć na uwadze, że zgodnie ze swoim określeniem wyraża on przeciętne warunki ruchu w okresie T_0 i przy danym średnim natężeniu ruchu przyjmie zawsze taką samą wartość, w przypadku potoku stacjonarnego jak i niestacjonarnego. W obu tych przypadkach zmienność stopnia nasycenia x w okresie obserwacji będzie jednak różna /rys. 5.5/. Średni stopień nasycenia wlotu \bar{x} , zgodnie ze wzorem 1.1, jest funkcją liniową natężenia ruchu i nie zależy od rodzaju potoku ruchu. Współczynnik zmienności stopni nasycenia wlotu w cyklach ε_x , będący stosunkiem odchylenia standardowego stopni nasycenia $x/IC/$ do ich średniej arytmety-



Rys. 5.5. Zależność średniego stopnia nasycenia wlotu i jego współczynnika zmienności w cyklach od natężenia ruchu

tycznej \bar{x} , posiada krzywoliniową zależność od natężenia ruchu i przyjmuje różne wartości w przypadku potoków stacjonarnego i niestacjonarnych. Różnica tych wartości rośnie w miarę wzrostu natężenia ruchu /rys. 5.5/. Współczynnik zmienności ξ_x w odniesieniu do przyjętych do badań symulacyjnych rodzajów potoków niestacjonarnych /LS, LL, LP/ przyjmuje prawie identyczne wartości przy poszczególnych natężeniach ruchu.

Niezależność średniego stopnia nasycenia wlotu od rodzaju potoku dopływającego do wlotu skrzyżowania umożliwia wspólne rozpatrywanie zależności mierników efektywności sterowania od stopnia nasycenia wlotu \bar{x} dla potoków stacjonarnych i niestacjonarnych.

Analizując zależności mierników sprawności skrzyżowania od \bar{x} należy wziąć pod uwagę, że natężenie nasycenia s /wchodzące do wzoru na \bar{x} / ustalone na podstawie minimalnego odstępu czasowego $\Delta t = 2,3$ s w kolumnie pojazdów /powstałej z kolejki/, może w pewnych przypadkach powodować zawyżanie wartości \bar{x} . Faktycznie bowiem, przy większych długościach sygnału zielonego i natężeniach zbliżających się do wartości s , pojazdy przejeżdżające wlot bez zatrzymania będą przekraczały linię stop w odstępach $DMIN = 2,0$ s /por. p. 4.2.2/. A więc może się zdarzyć, że wlot przejedzie więcej pojazdów niż wynikałoby to z ustalonej wartości s .

5.3.1. Straty czasu

Do analizy strat czasu - przypadających na pojazd w cyklach - na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją, jako podstawowe zmienne przyjęto natężenie ruchu i jego pochodną - stopień nasycenia wlotu, oraz udział sygnału zielonego efektywnego w cyklu. Zależności strat czasu od tych zmiennych badano oddzielnie dla każdego rodzaju dopływającego potoku; ruch niestacjonarny - potoki LL, LS, LP,

ruch stacjonarny - potok LR. Jako reprezentację strat czasu w okresie obserwacji T_0 przyjęto średnią arytmetyczną ze średnich strat czasu przypadających na pojazd w poszczególnych cyklach okresu T_0 :

$$\bar{d} = \frac{T \cdot \sum_{IC=1}^{T_0/T} d/IC/}{T_0} \quad [s/P] \quad /5.1/$$

gdzie: \bar{d} - średnia strat czasu przypadających na pojazd w poszczególnych cyklach okresu obserwacji $[s/P]$,

$d/IC/$ - średnia strata czasu przypadająca na pojazd w cyklu IC $[s/P]$,

T - długość cyklu $[s]$,

T_0 - okres obserwacji $[s]$.

Tak wyliczona wartość określa przeciętną stratę czasu w cyklu przypadającą na każdy z obsłużonych pojazdów. Można również biorąc pod uwagę straty czasu poszczególnych pojazdów w całym okresie T_0 /bez prowadzenia analizy w cyklach/ obliczyć średnią stratę czasu przypadającą na pojazd w okresie T_0 , ze wzoru:

$$\bar{d}^* = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad [s/P] \quad /5.2/$$

gdzie: \bar{d}^* - średnia strata czasu przypadająca na pojazd w okresie T_0 $[s/P]$,

d_i - strata czasu i -tego pojazdu $[s]$,

n - liczba pojazdów obsłużonych w okresie T_0 $[P]$.

Zapisując wzór /5.2/ w równoważnej postaci:

$$\bar{d}^* = \frac{\sum_{IC=1}^{T_0/T} \sum_{i=1}^{LO/IC/} d_i}{n} = \frac{\sum_{IC=1}^{T_0/T} d/IC/ \cdot LO/IC/}{n}$$

różnicę między stratami \bar{d}^* i \bar{d} można wyrazić w następujący sposób:

$$\bar{d}^* - \bar{d} = \sum_{IC=1}^{T_0/T} \left[\frac{LO/IC/}{n} - \frac{T}{T_0} \right] \cdot d/IC/ \quad /5.3/$$

gdzie: - $L_0/IC/$ - liczba pojazdów obsłużonych w cyklu IC $[P]$,
- pozostałe oznaczenia jak we wzorach /5.1/ i /5.2/.

Jak wynika z wyrażenia /5.3/ straty czasu określone wzorami /5.1/ i /5.2/ będą sobie równe tylko w przypadku, gdy:

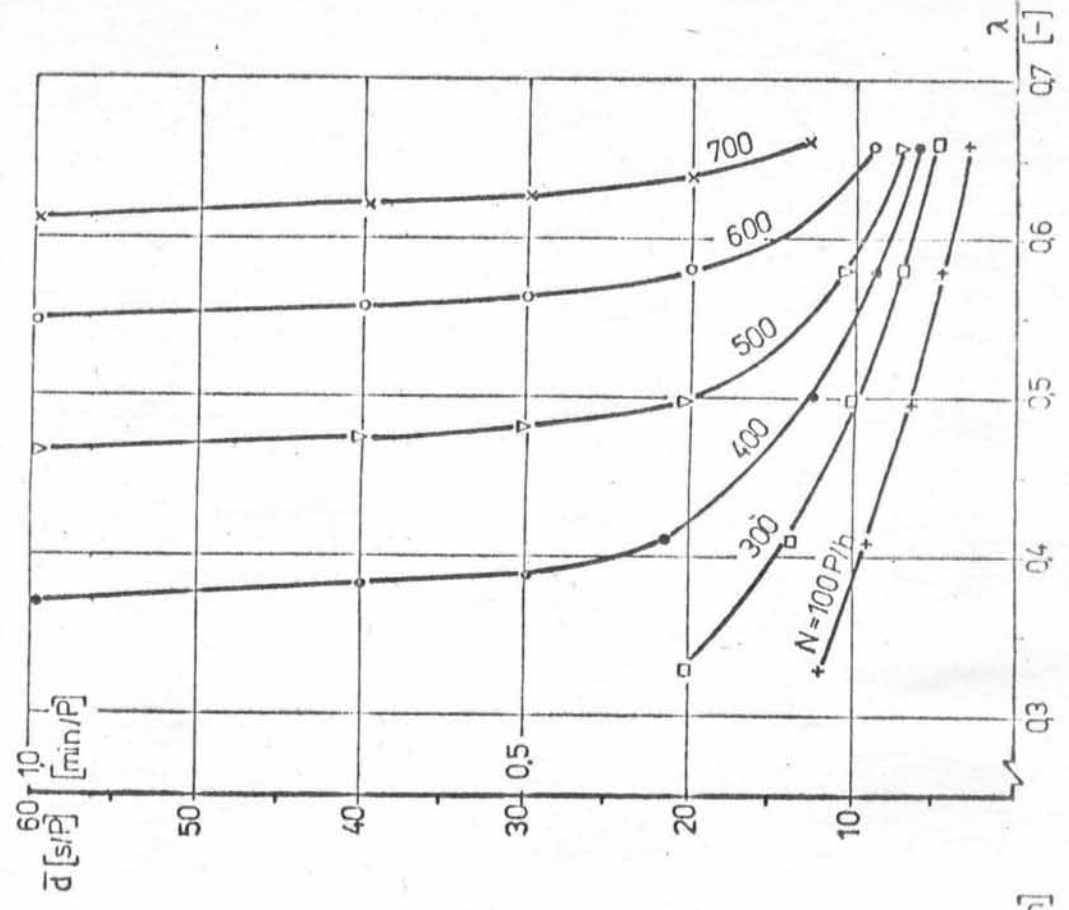
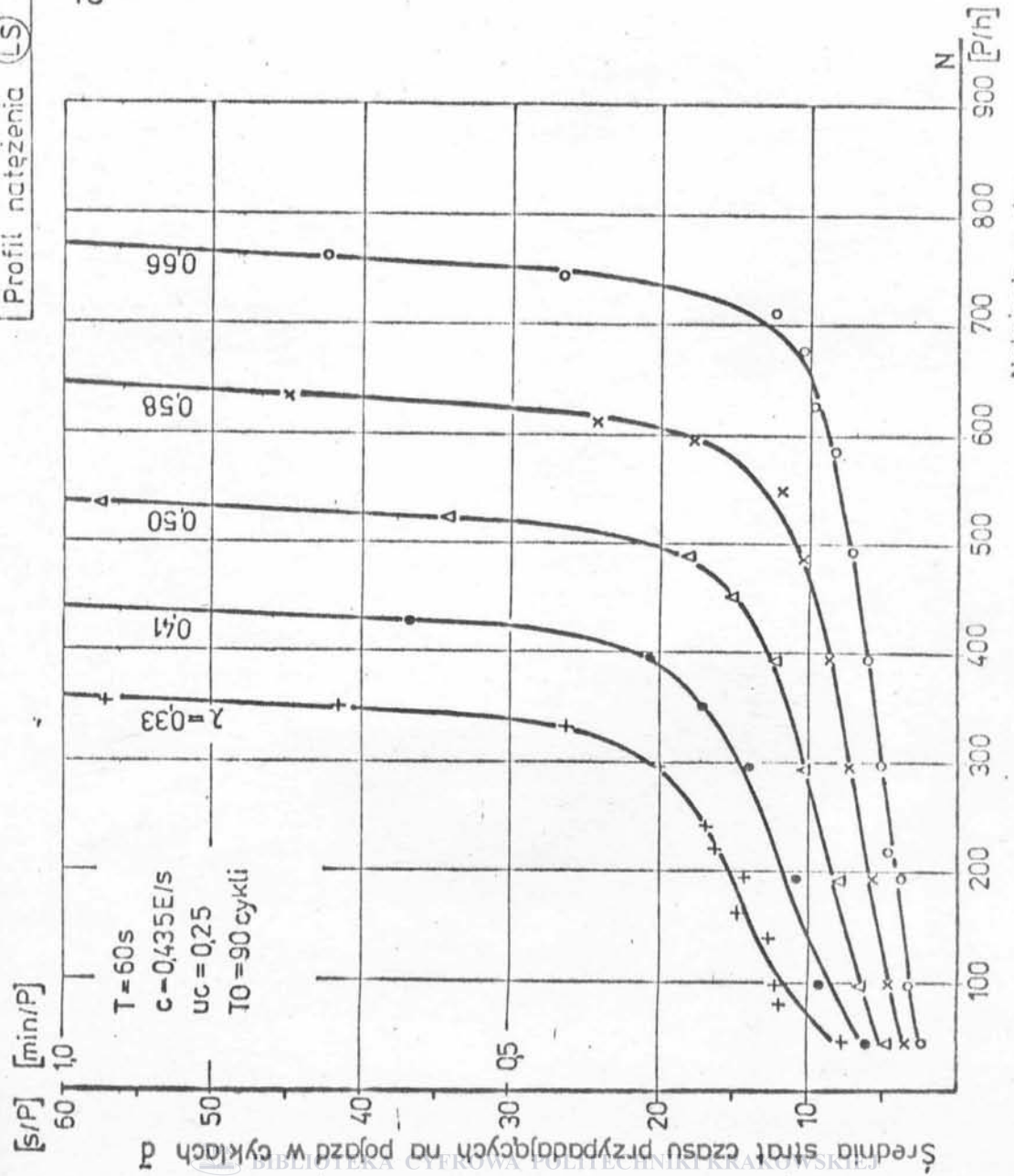
$$\frac{L_0/IC/}{n} = \frac{T}{T_0} \quad \text{dla każdego } IC = 1, 2, \dots, T_0/T \quad /5.4/$$

czyli, gdy liczby pojazdów obsłużonych będą jednakowe w każdym cyklu IC i będą wynosić $n \cdot T/T_0$. Praktycznie jednak sytuacja taka jest mało prawdopodobna.

Prowadzona analiza zmienności strat czasu rejestrowanych w poszczególnych cyklach okresu obserwacji zdecydowała o przyjęciu w badaniach sposobu obliczania strat czasu wg wzoru 5.1. Zależności tak obliczonych strat czasu \bar{d} od natężenia ruchu o różnych profilach oraz udziału sygnału zielonego efektywnego w cyklu, przy udziale samochodów ciężarowych w potoku 25%, przedstawiono na rys. 5.6 i 5.7 /profile LS i LR/ oraz na rys. 5.1 i 5.2 w aneksie /profile LL i LP/. Przebieg krzywych wskazuje na istnienie pewnych granicznych wartości natężeń, zależnych od udziału sygnału zielonego efektywnego w cyklu λ , po przekroczeniu których niewielkie przyrosty natężenia powodują gwałtowny wzrost średniej strat czasu \bar{d} . Porównanie kolejnych wykresów przedstawionych na rys. 5.6 i 5.7 oraz 5.1 i 5.2 w aneksie wykazuje, że w przypadku potoków ruchu uwzględniających rzeczywiste zmienności natężenia w okresach szczytowych /profile LL, LS i LP/, wartości średnich strat czasu \bar{d} różnią się niewiele. W przypadku potoku stacjonarnego LR /rys. 5.7/ identyczne straty czasu jak dla potoków LL, LS i LP uzyskiwane są z reguły przy większych natężeniach lub dla danego natężenia obserwuje się mniejsze straty czasu, przy czym uwidacznia się to szczególnie w zakresie większych natężeń.

Zależności średnich strat czasu \bar{d} oraz współczynnika zmienności

Profil natężenia (LS)

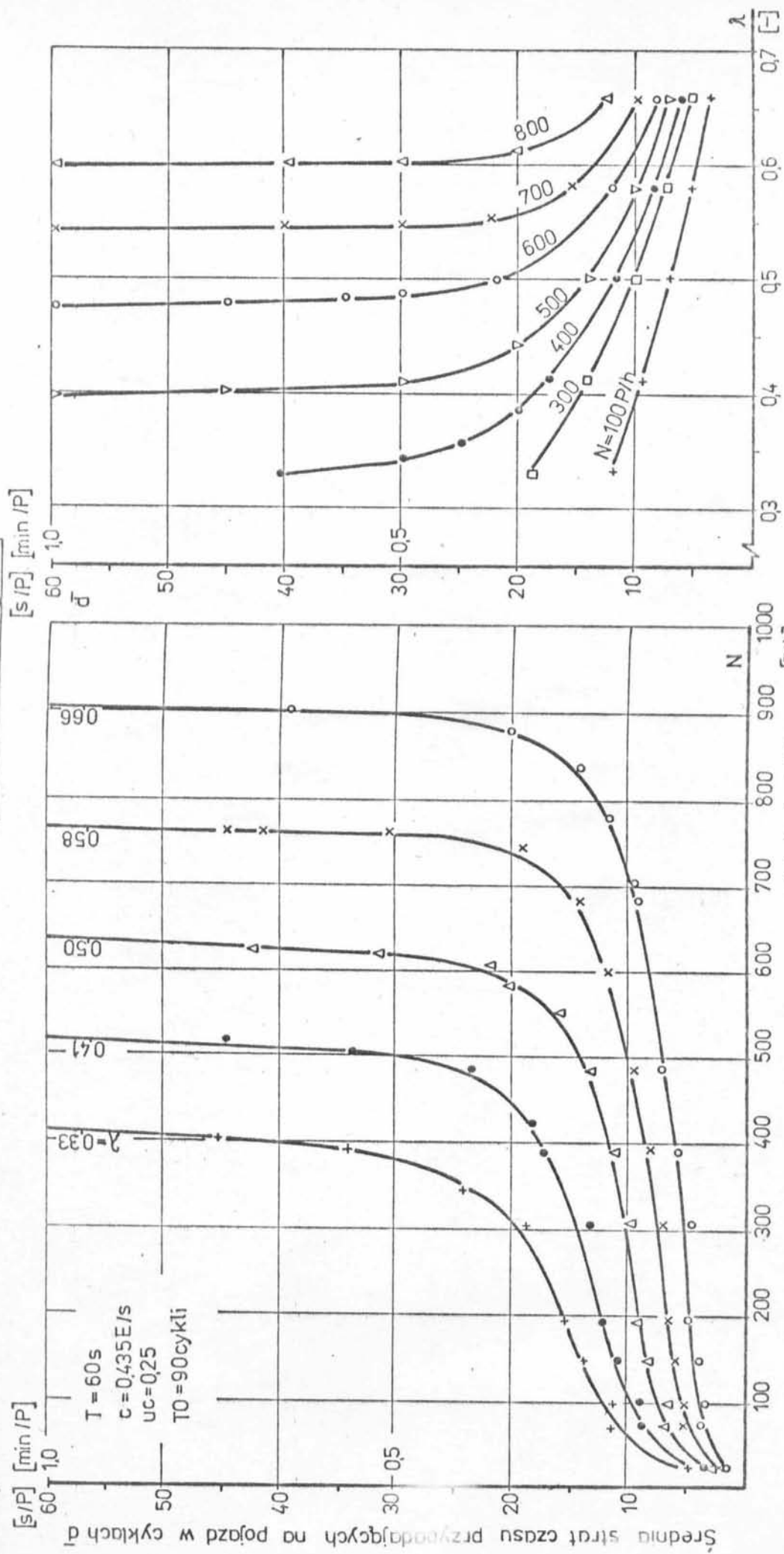


Natężenie ruchu

Udział światła zielonego efektywnego w cyklu

Rys. 5.6. Zależność strat czasu przypadających na pojazd w cyklach od natężenia ruchu /profil LS/ i udziału światła zielonego efektywnego w cyklu

Profil natężenia (LR)



Udział światła zielonego efektywnego w cyklu

Rys. 5.7. Zależność średnich strat czasu przypadających na pojazd w cyklu od natężenia ruchu /profil LR/ i udziału sygnału zielonego efektywnego w cyklu

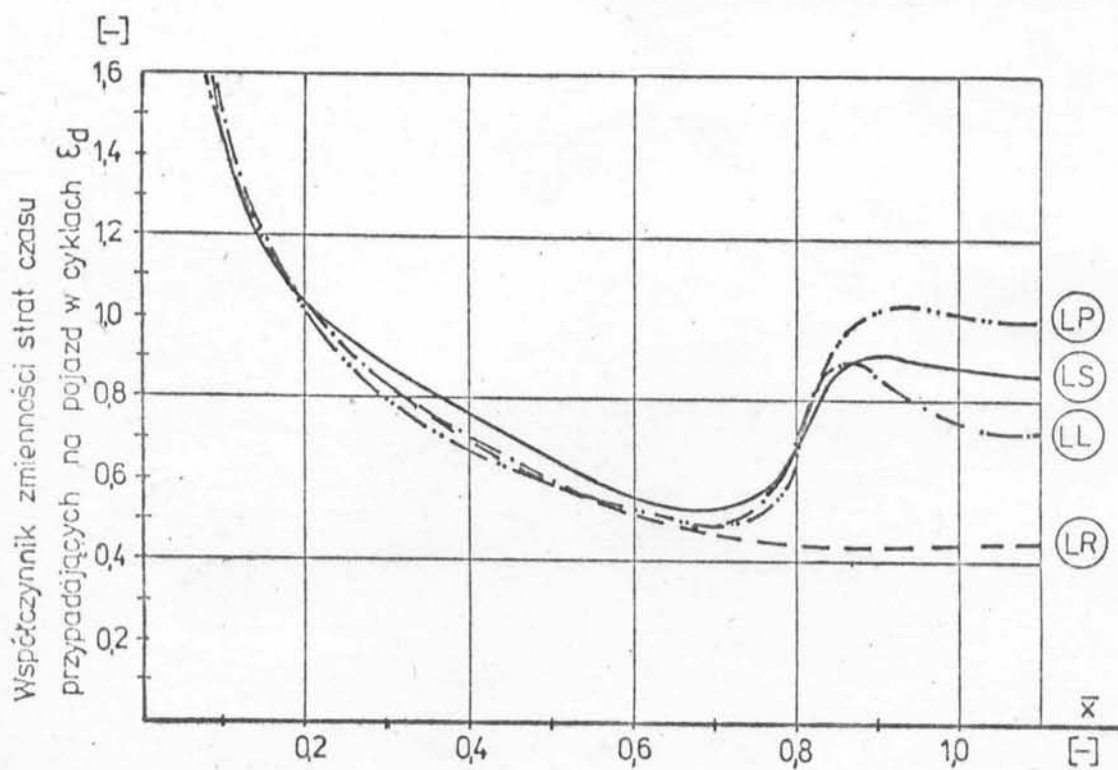
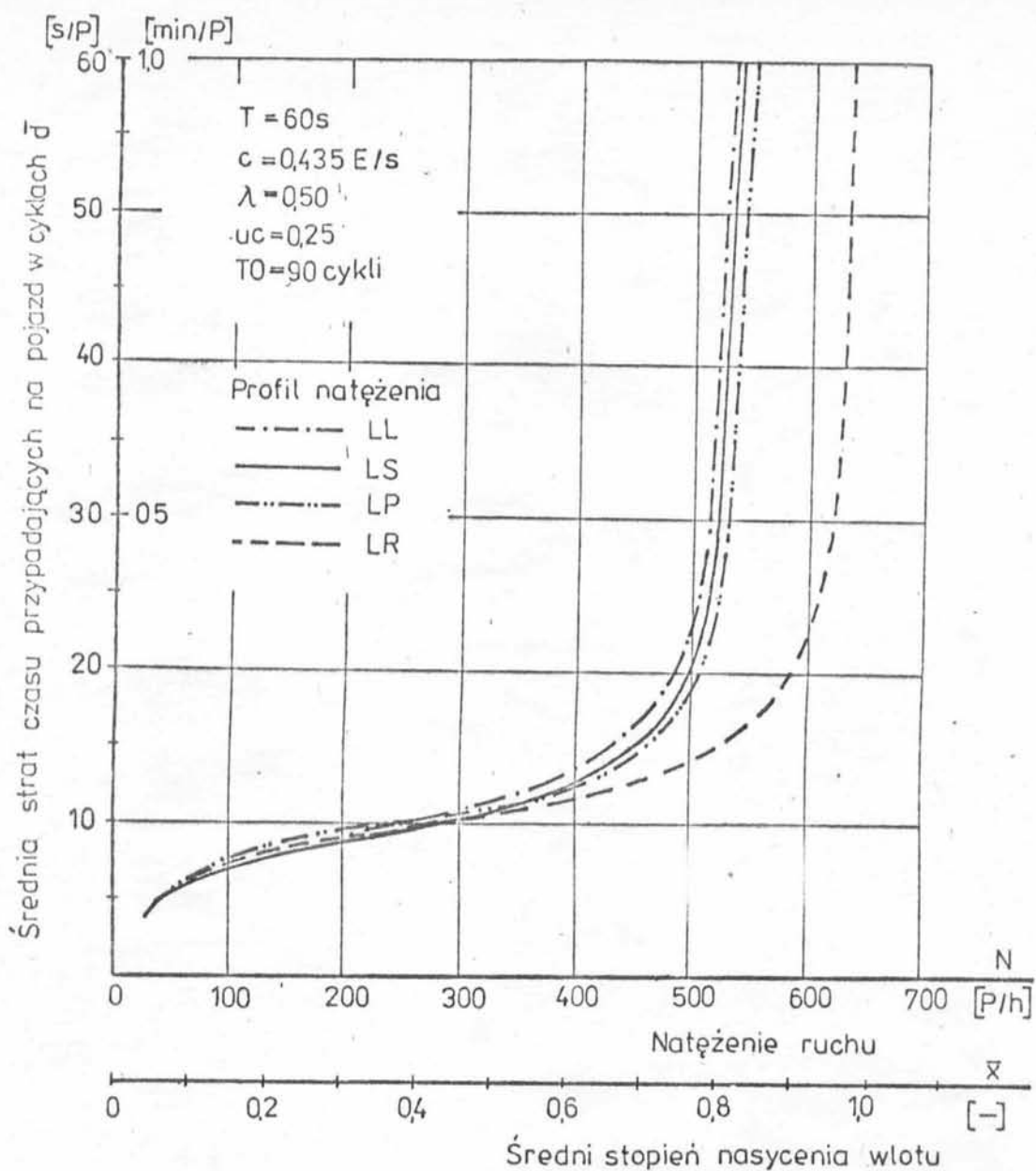
ci ξ_d od średniego stopnia nasycenia wlotu \bar{x} przedstawiono na rys. 5.3 + 5.6 zamieszczonych w aneksie. Pomimo, że stopień nasycenia wlotu łączy w sobie parametry ruchu /natężenie N / oraz sterowania /udział sygnału zielonego efektywnego w cyklu λ /, to jednak na wykresach tych wyraźnie uwidacznia się w dalszym ciągu zależność strat czasu \bar{d} od λ . Wiąże się to niewątpliwie z faktem, że przy wzroście udziału sygnału zielonego efektywnego w cyklu, maleje równocześnie udział efektywnego czasu, w którym wlot pozostaje zamknięty dla ruchu a więc maleją jednostkowe straty czasu ponoszone na postój w kolejce. Wydłużenie sygnału zielonego zwiększa poza tym możliwości przejazdu pojazdów bez zatrzymań, a więc i bez strat czasu. W efekcie czynniki te powodują, że przy ustalonym średnim stopniu nasycenia \bar{x} , straty czasu maleją przy wzroście udziału sygnału zielonego efektywnego w cyklu mimo, że pociąga on za sobą równocześnie wzrost natężenia ruchu.

Zwiększenie się zakresu zmienności /rozproszenia/ średnich strat czasu w cyklach, w przedziale wartości stopnia nasycenia $\bar{x} = 0,7 + 0,9$ /o czym świadczy kształt krzywych $\xi_d = f/\bar{x}/$ na rys. 5.3 + 5.5 w aneksie/ spowodowane jest pojawieniem się przy tych wartościach \bar{x} , w przypadku potoków niestacjonarnych o profilach natężenia LL, LS i LP, pojazdów oczekujących na obsługę dłużej niż 1 cykl, czyli pojawieniem się niezerowych kolejek na końcu sygnału zielonego /patrz rys. 5.3.a,b,c/. W całym okresie obserwacji występują więc w tej sytuacji zarówno małe straty $d/IC/$, w cyklach na początku i na końcu okresu obserwacji, jak i duże straty $d/IC/$ w środkowych cyklach okresu T_0 . Zakres zmienności średnich strat czasu przypadających na pojazd w cyklach /ich rozproszenie względem wartości średniej $\bar{d}/$ jest więc większy niż przy niższych natężeniach, kiedy to kolejki pozostają w sta-

nie równowagi /brak w dłuższym okresie czasu kolejek na końcu sygnału zielonego/. W przypadku potoku stacjonarnego /rys. 5.6 w aneksie/ efekt ten nie występuje, bowiem przy wzroście natężenia duże straty czasu $d/IC/$ zaczynają się pojawiać równocześnie w całym okresie obserwacji T_0 , a więc ich rozproszenie nie ulega większym zmianom.

Porównanie statystyk \bar{d} i ξ_d rozkładów strat czasu w cyklach w funkcji natężenia ruchu N i stopnia nasycenia wlotu \bar{x} dla różnych profili natężenia i udziału sygnału zielonego efektywnego w cyklu $\lambda = 0,50$ przedstawiono na rys. 5.8. Różnice strat czasu występujących przy potokach niestacjonarnych są niewielkie, przy czym większe straty czasu odnoszą się do potoków z większym tempem powstawania szczytu /potoki LL i LS/. Istotnie różni się natomiast przebieg tych strat od uzyskanych przy założeniu potoku stacjonarnego. Bardzo szybki przyrost strat czasu rozpoczyna się w okolicach wartości 0,75 i 0,90 stopnia nasycenia \bar{x} ; odpowiednio dla potoków niestacjonarnych i stacjonarnego. W przypadku potoków niestacjonarnych współczynnik zmienności ξ_d przyjmuje minimalne wartości w przedziale $\bar{x} = 0,70 + 0,80$. Stąd wyciągnąć można wniosek, że z uwagi na straty czasu przypadające na pojazd w cyklach, stopień nasycenia wlotu \bar{x} nie powinien przekraczać wartości 0,75, gdyż powyżej niej przyrost średnich strat czasu jest bardzo szybki a także następuje zwiększenie zakresu ich zmienności /pojawiają się cykle z kolejką na końcu sygnału zielonego/. Poza tym widać, że uwzględnienie wahań ruchu, charakterystycznych dla godzin szczytowych, powoduje istotne różnice w wielkości strat czasu w zakresie większych wartości stopnia nasycenia wlotu $\bar{x} > 0,70/$.

Analogiczne porównanie statystyk \bar{d}_Z i ξ_{d_Z} odnoszących się do pojazdów zatrzymanych /rys. 5.7 w aneksie/ potwierdza powyż-



Rys. 5.8. Porównanie statystyk rozkładów strat czasu przypadających na pojazd w cyklach dla różnych profili i wartości natężeń potoku do-

sze wnioski.

5.3.2. Kolejki maksymalne w cyklach

Zależności wartości średnich kolejek maksymalnych w cyklach okresu obserwacji, obliczanych ze wzoru:

$$\bar{K} = \frac{T \cdot \sum_{IC=1}^{T_0/T} K/IC/}{T_0} \quad [P] \quad /5.5/$$

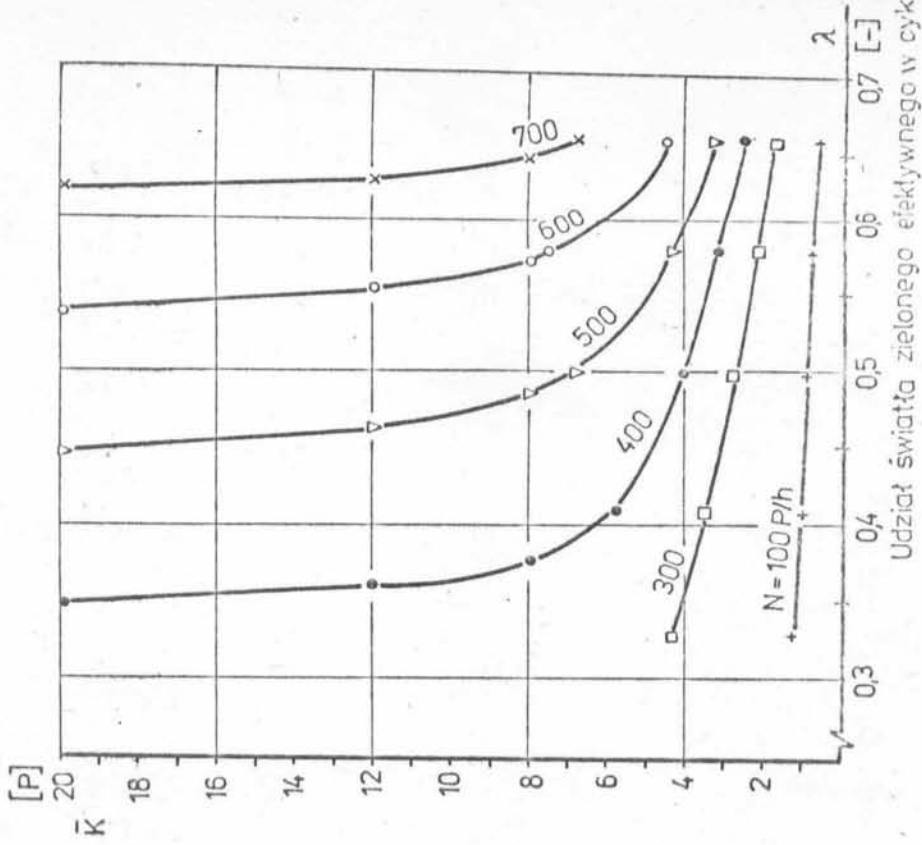
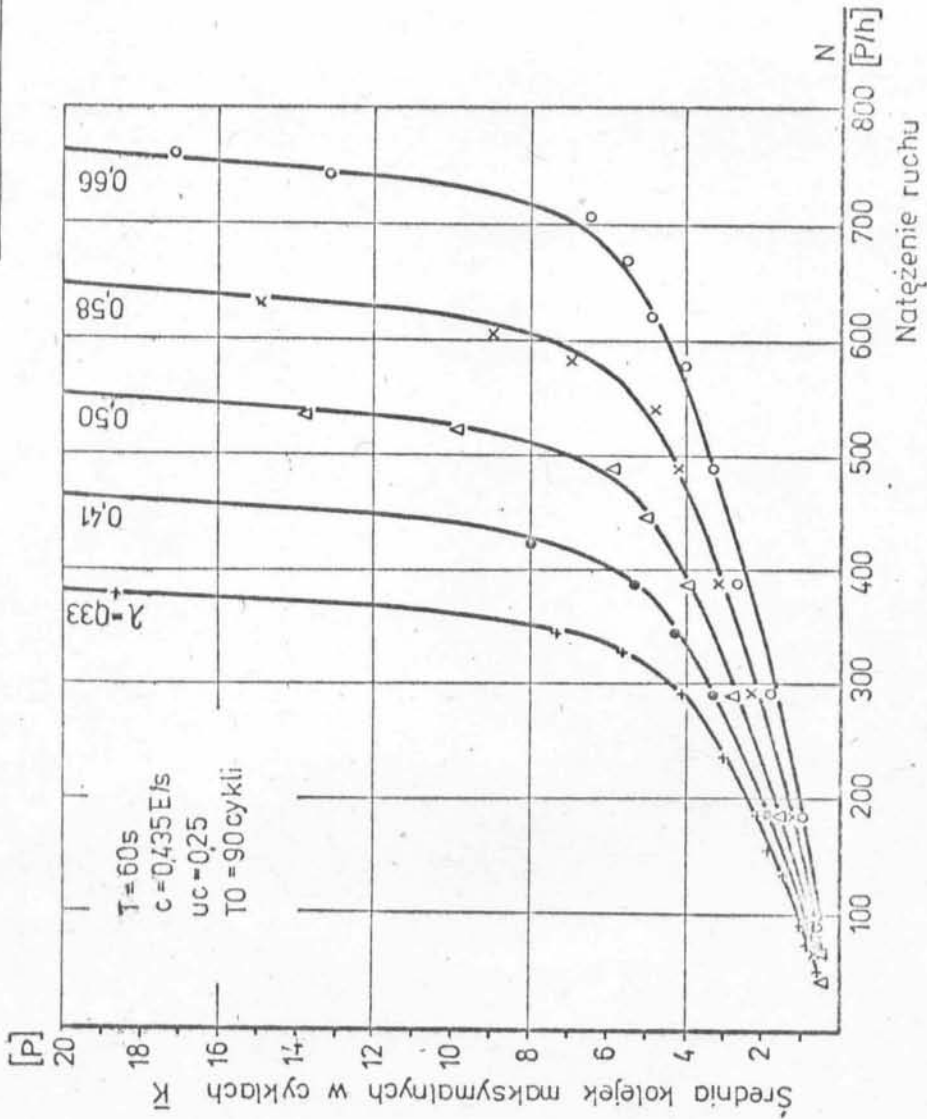
gdzie: $K/IC/$ - maksymalna kolejka w cyklu o nr IC $[P]$,

- pozostałe oznaczenia jak we wzorze /5.1/,

od natężenia ruchu N oraz udziału sygnału zielonego efektywnego w cyklu λ , przedstawiono na rys. 5.9 i 5.10 oraz na rys. 5.8 i 5.9 w aneksie. Analogicznie jak w przypadku strat czasu \bar{d} można zauważyć, że przekroczenie pewnych wartości natężeń /odpowiadających poszczególnym udziałom sygnału zielonego efektywnego w cyklu λ / powoduje bardzo szybki przyrost długości kolejek. Te graniczne wartości natężeń w przypadku potoku stacjonarnego /rys. 5.10/ są znacznie większe niż w sytuacji, gdy rozważamy potoki niestacjonarne /rys. 5.9 i w aneksie 5.8 i 5.9/. Zależność $\bar{K} = f/\lambda$ / wykazuje, że wzrost λ tylko do pewnego momentu powoduje wyraźną poprawę warunków ruchu. Z dalszym wzrostem λ kolejki maleją w niewielkim zakresie.

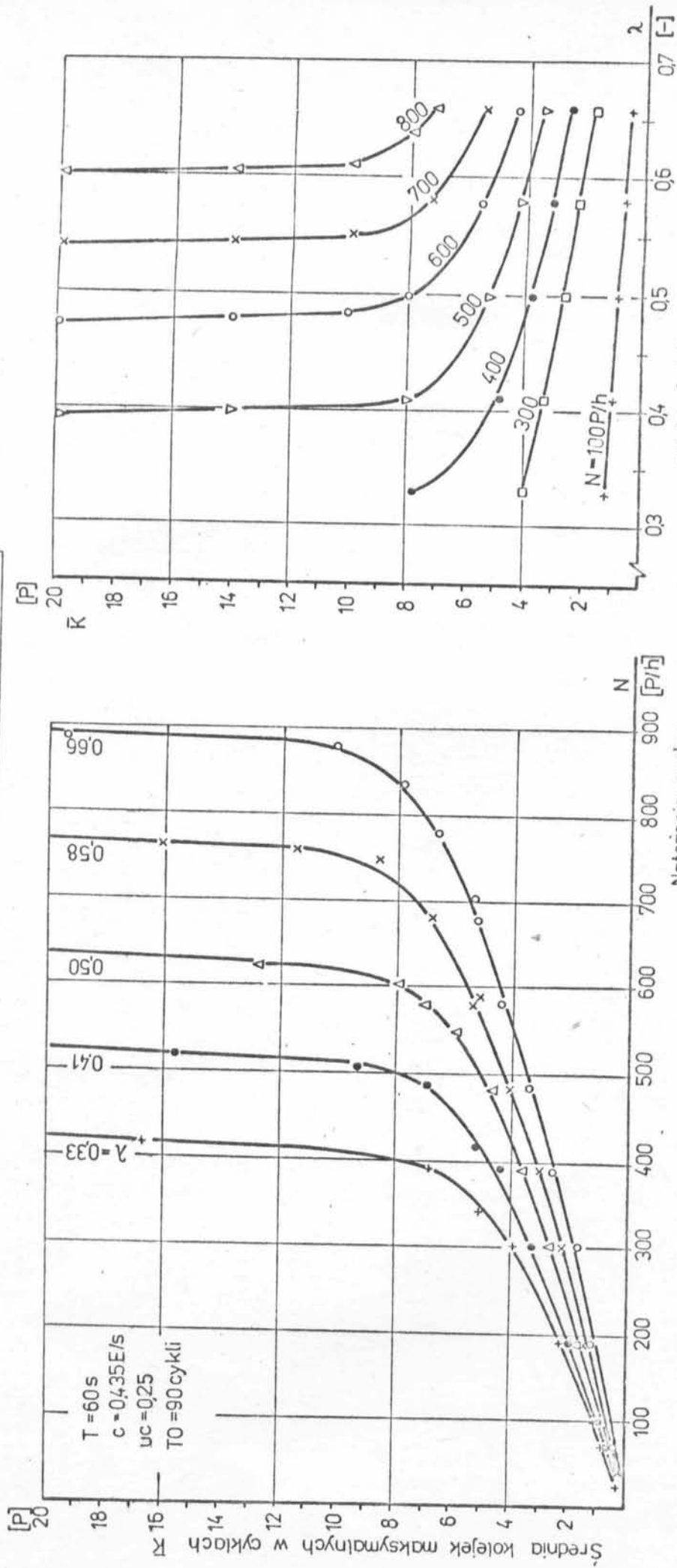
Zależności statystyk \bar{K} oraz ξ_K rozkładów kolejek maksymalnych w cyklach od średniego stopnia nasycenia wlotu \bar{x} przedstawiono na rys. 5.10 + 5.13 zamieszczonych w aneksie, a ich porównanie na rys. 5.11 /w zasadniczej części pracy/. W przypadku kolejek \bar{K} rozważanych w funkcji średniego stopnia nasycenia wlotu \bar{x} wpływ udziału sygnału zielonego efektywnego λ praktycznie nie uwidacznia się. W tej sytuacji oczywistym jest, że w odniesieniu do funkcji strat czasu $\bar{d} = f/\bar{x}$ wpływ ten musi być wyraźny,

Profil natężenia. (LS)

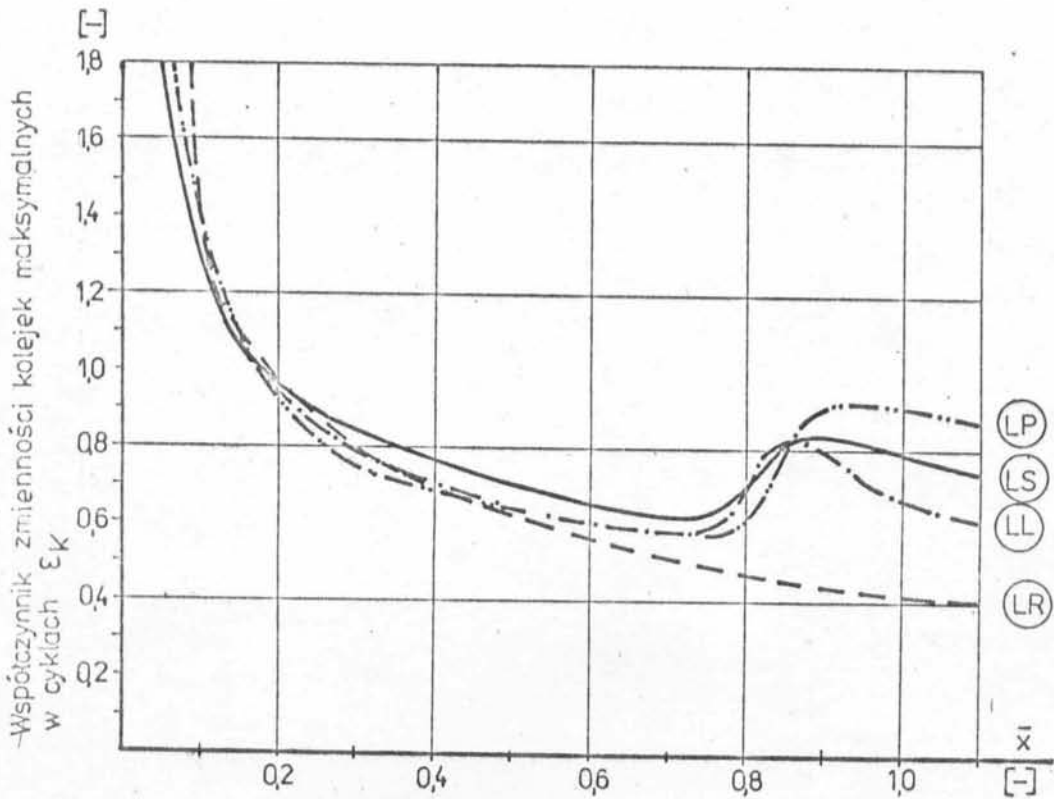
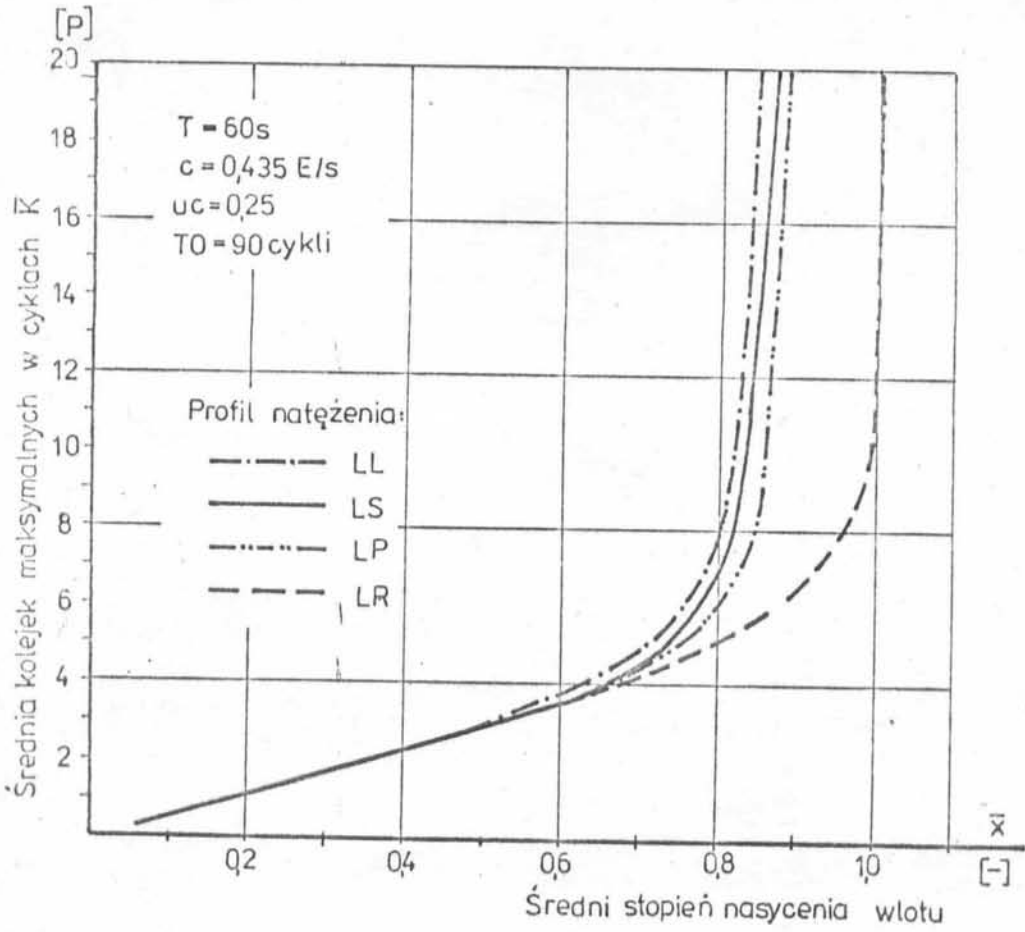


Rys. 5.9. Zależność między średnimi kolejkami maksymalnych w cyklach a natężeniem ruchu /profil LS/ i udziałem sygnału zielonego efektywnego w cyklu

Profil natężenia (LR)



Rys. 5.10. Zależność między średnimi maksymalnymi w cyklach a natężeniem ruchu /profil LR/ i udziałem sygnatu zielonego efektywnego w cyklu

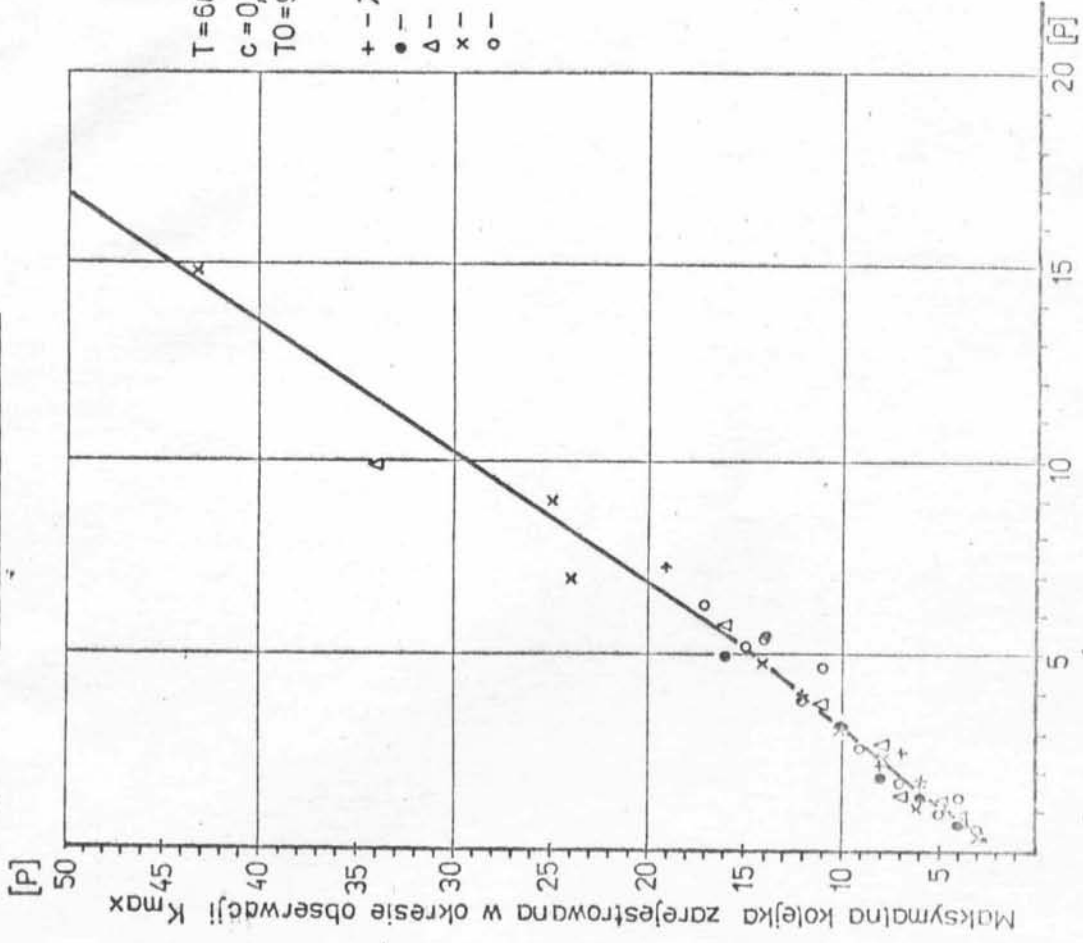


Rys. 5.11. Porównanie statystyk rozkładów maksymalnych kolejek w cyklach dla różnych profili i wartości natężeń potoku dopływającego

bowiem jeżeli bierzemy pod uwagę większą wartość λ a kolejka \bar{K} nie ulega zmianie, to ze względu na krótszy czas jej trwania /krótszy sygnał czerwony/ straty czasu \bar{d} muszą być mniejsze. W okolicach wartości $\bar{x} = 0,8$, w przypadku potoków niestacjonarnych, następuje wzrost rozproszenia ε_K kolejek maksymalnych w cyklach okresu obserwacji T_0 , ponieważ oprócz cykli, w których kolejki wahają się w zakresie właściwym stanowi równowagi, pojawia się grupa cykli, w których z uwagi na stopień nasycenia wlotu $x/IC/ > 1,0$ następuje znaczny przyrost kolejek /por. rys. 5.3.a,b,c/. Porównanie statystyk \bar{K} i ε_K rozkładów kolejek maksymalnych w cyklach /rys. 5.11/ wykazuje podobne, jak w przypadku rozkładów strat czasu, zależności między statystykami \bar{K} i ε_K właściwymi poszczególnym rodzajom potoków. Kryterium kolejek maksymalnych w cyklach wskazuje, analogicznie jak i kryterium strat czasu, wartość $\bar{x} = 0,75$ jako krytyczną przy ustalaniu dopuszczalnych natężeń ruchu na wlocie.

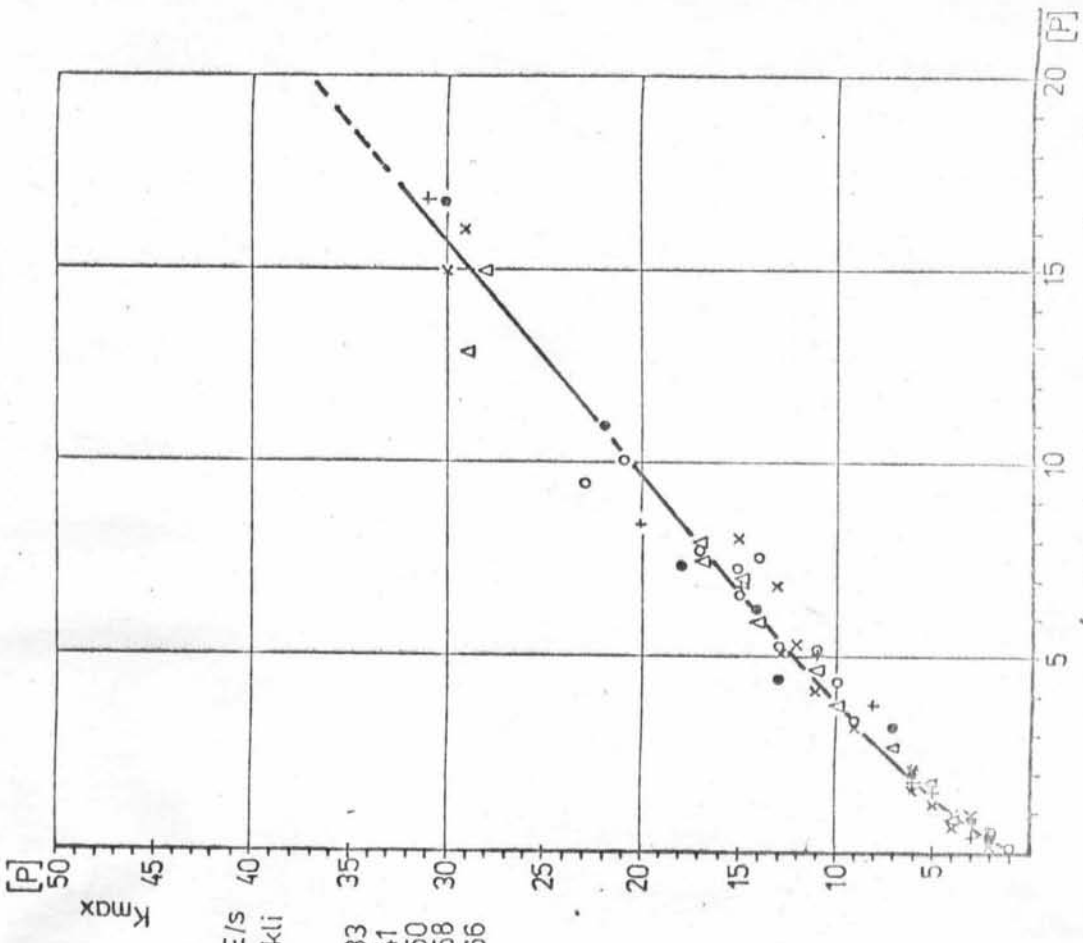
Większe rozproszenie kolejek występujące przy dużych wartościach stopnia nasycenia wlotu \bar{x} w przypadku potoków niestacjonarnych /rys. 5.11/ wskazuje, że kolejki maksymalne odniesione do całego okresu obserwacji T_0 będą w tym przypadku również większe niż przy założeniu ruchu stacjonarnego. Zależności maksymalnej kolejki K_{max} zarejestrowanej w okresie obserwacji T_0 od średniej kolejek maksymalnych w cyklach \bar{K} w przypadku potoków stacjonarnego i niestacjonarnego, przedstawione na rys. 5.12, potwierdzają to przypuszczenie. Linie określające stosunek K_{max}/\bar{K} przy $\bar{K} > 5$ przyjmują nachylenia ok. 3 : 1 i 2 : 1 odpowiednio dla przypadku potoku niestacjonarnego LS i stacjonarnego LR. Wykresy stosunków K_{max}/\bar{K} w funkcji średniego stopnia nasycenia wlotu \bar{x} , uzyskane dla profili natężenia ruchu LS i LR, przedstawiono na rys. 5.14 zamieszczonym w aneksie. Zależności te wykazują, że

Profil natężenia (LS)



Średnia kolejek maksymalnych w cyklach \bar{R}

Profil natężenia (LR)



Średnia kolejek maksymalnych w cyklach \bar{R}

$T = 60s$
 $c = 0,435E/s$
 $T_0 = 90$ cykli
 $+$ - $\lambda = 0,33$
 \bullet - 0,41
 Δ - 0,50
 x - 0,58
 o - 0,66

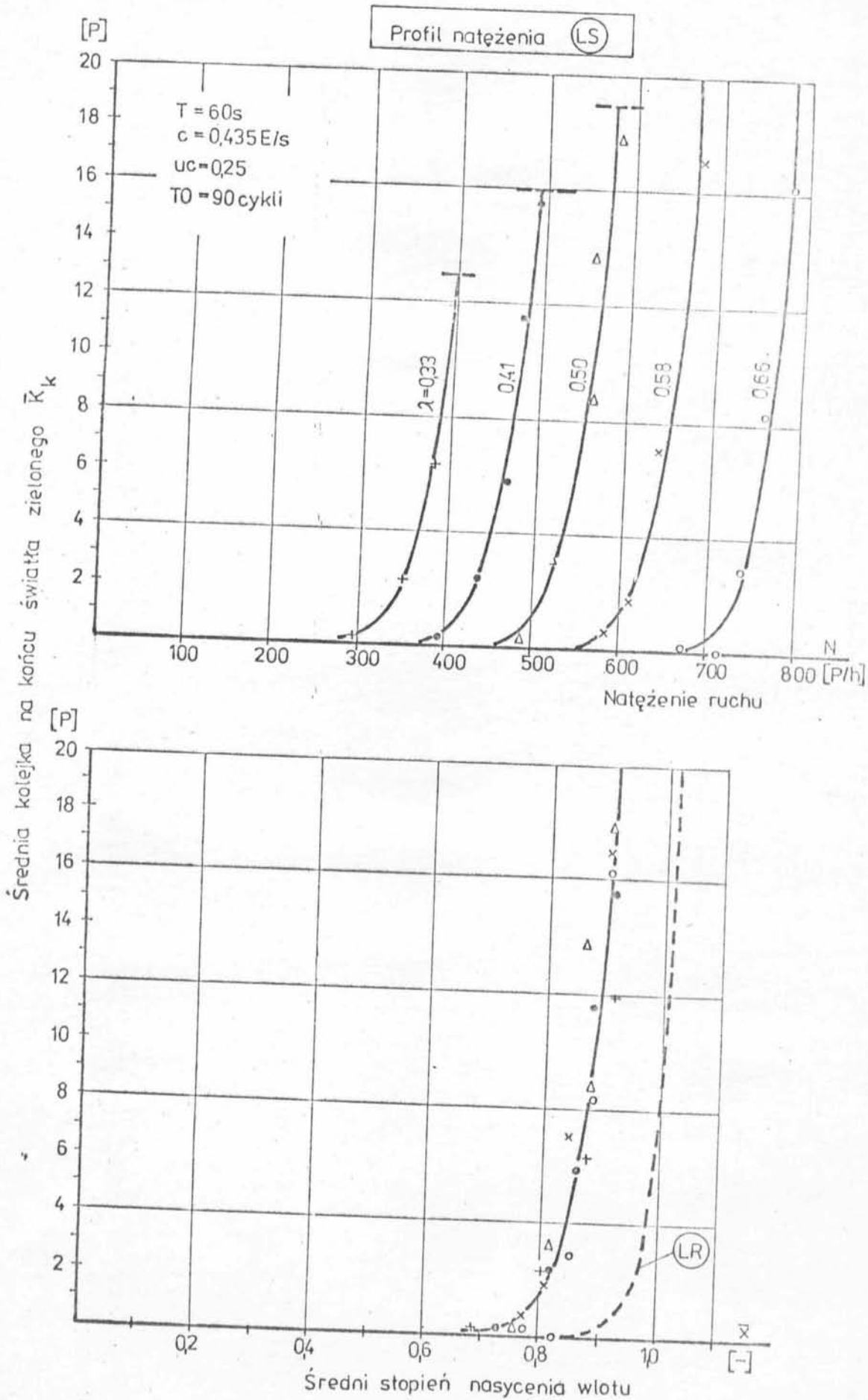
rys. 3.10. Zależność maksymalnej kolejki zarejestrowanej w okresie obserwacji T_0 od średniej kolejek maksymalnych w cyklach w przypadku potoków o profilach natężenia LS i LR

nie uwzględnianie rzeczywistych wahań ruchu w badaniach efektywności sterowania, powoduje znaczne zaniżenie szacunku maksymalnej kolejki K_{\max} . Przy takiej samej wartości średniej kolejek maksymalnych w cyklach \bar{K} , faktyczna /przy uwzględnieniu niestacjonarności ruchu/ kolejka maksymalna K_{\max} w okresie obserwacji będzie większa niż określona przy założeniu potoku stacjonarnego.

5.3.3. Kolejki na końcu sygnału zielonego

Kolejki na końcu sygnału zielonego występują w sytuacji, gdy natężenie potoku dopływającego przewyższa przepustowość wlotu w cyklach. Charakteryzują one niekorzystne warunki ruchu, niską efektywność sterowania, wykazując konieczność oczekiwania na możliwość przejazdu przez skrzyżowanie dłużej niż jeden cykl.

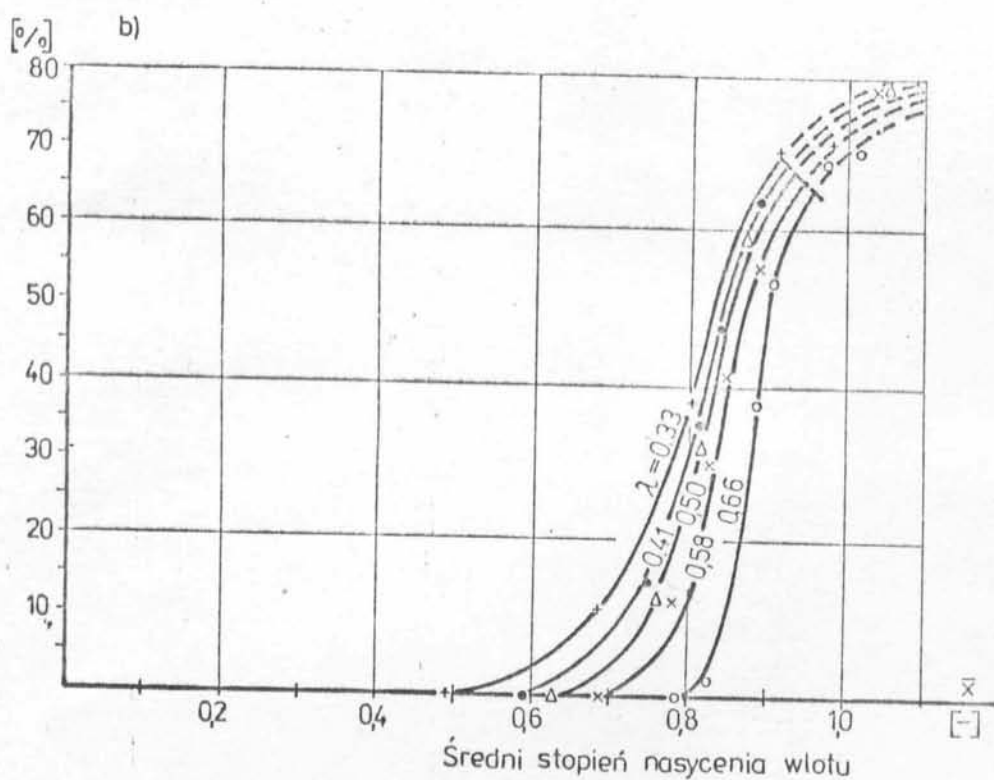
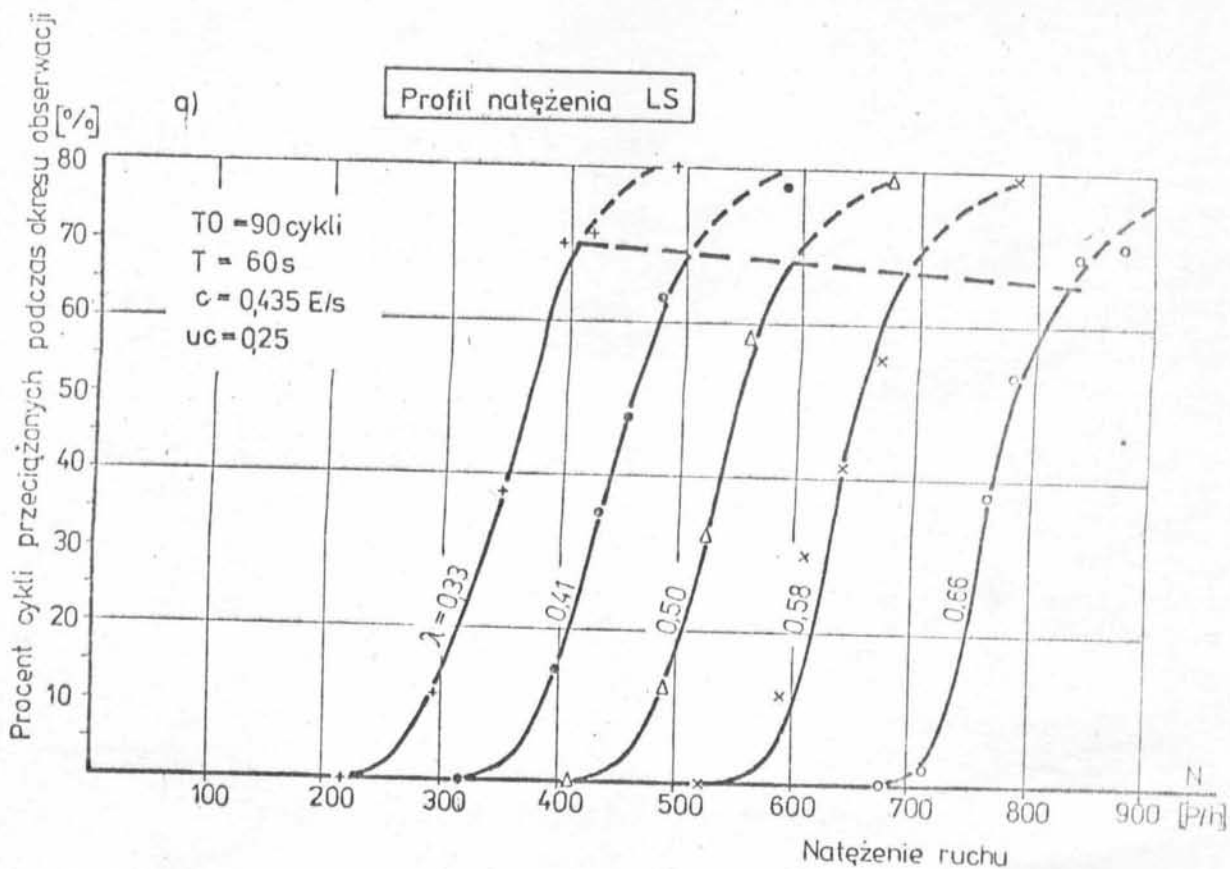
Zależność średniej kolejki na końcu światła zielonego \bar{K}_K od natężenia ruchu oraz średniego stopnia nasycenia wlotu, przy różnych wartościach udziału sygnału zielonego w cyklu pokazano na rys. 5.13. Zakres analizy tych zależności ograniczono do wartości natężeń, przy których w ostatnim cyklu okresu obserwacji T_0 , na końcu sygnału zielonego nie występuje jeszcze kolejka, czyli do przypadków, kiedy kolejki w końcowych cyklach okresu obserwacji pozostają w stanie równowagi. Odpowiada to sytuacji, w której warunki ruchu występujące w rozważanym okresie obserwacji nie oddziałują na okres następny. Krzywe $\bar{K}_K = f/N/$ zaczynają się przy relatywnie wysokich wartościach natężeń i pokazują, że przy dalszym wzroście natężenia następuje bardzo szybki przyrost średniej kolejki na końcu sygnału zielonego. Z zależności $\bar{K}_K = f/\bar{x}/$ wynika, że kolejki na końcu sygnału zielonego pojawiają się w przypadku potoku niestacjonarnego przy $\bar{x} \approx 0,7$ a ich bardzo szybki przyrost następuje dla $\bar{x} > 0,75$. Analogiczne wartości \bar{x} odnoszące się do potoku stacjonarnego są o ok. 0,2 większe.



Rys. 5.13. Zależność średniej kolejki na końcu sygnału zielonego od natężenia ruchu lub średniego stopnia nasycenia wlotu oraz udziału sygnału zielonego efektywnego w cyklu

Dla pełniejszego zobrazowania warunków ruchu na wlocie skrzyżowania, charakteryzowanych przez przeciążenia cykli, analizie poddano również czas trwania przeciążeń, wyrażony procentem cykli przeciążonych w okresie obserwacji. Jako cykl przeciążony uznawano każdorazowo taki cykl, w którym występowała niezerowa kolejka na końcu sygnału zielonego. Zależności między procentem cykli przeciążonych w okresie obserwacji $/T_0 = 90$ cykli/ a natężeniem ruchu oraz średnim stopniem nasycenia wlotu przy różnych udziałach sygnału zielonego efektywnego w cyklu przedstawiono na rys. 5.14. Linia przerywana przecinająca poszczególne krzywe na wykresach, wyznacza w punktach przecięć odpowiadające poszczególnym wartościom λ graniczne natężenia, powyżej których kolejki, będące efektem przeciążeń w okresie obserwacji T_0 , będą się przenosić poza ten okres. Duże tempo przyrostu procentu cykli przeciążonych powodowane jest faktem, że kolejki zostające w poszczególnych cyklach na końcu sygnału zielonego stanowią dodatkowe obciążenie następnych cykli. W efekcie przeciążenia, pojawiające się w pierwszej kolejności w "szczytowym" przedziale okresu T_0 , przenoszą się szybko na następujące po nim przedziały czasu. Procent cykli przeciążonych rośnie więc szybko. W momencie, gdy proces przenoszenia się dodatkowych obciążeń /w postaci kolejek na końcu sygnału zielonego/ obejmie ostatni cykl okresu T_0 - co następuje przy granicznej wartości natężenia - tempo przyrostu liczby cykli przeciążonych przy dalszym wzroście natężenia maleje /rys. 5.14/ z uwagi na to, że kolejne przeciążenia cykli powodowane są już wyłącznie dopływającym ruchem i obejmują cykle poprzedzające "szczytowy" przedział.

Wartości $\bar{x} = 0,75$, wskazanej jako krytyczna przy okazji analizy strat czasu i kolejek maksymalnych w cyklach, odpowiada procent cykli przeciążonych zmieniający się w zakresie $/22 \pm 0/\%$



Rys. 5.14. Zależność między procentem cykli przeciążonych w okresie obserwacji a natężeniem ruchu /a/ oraz średnim stopniem nasycenia wlotu /b/

odpowiednio przy λ rosnącym od 0,33 do 0,66 /rys. 5.14.b/.
 Niezerowe kolejki w ostatnim cyklu okresu obserwacji T_0 pojawiają się przy średnim stopniu nasycenia $\bar{x} = 0,91 + 0,96$ zależnie od wartości λ .

5.3.4. Zatrzymania

W przeprowadzonych badaniach symulacyjnych jako miarę zatrzymań brano procent pojazdów zatrzymanych w poszczególnych cyklach $Z/IC/$:

$$Z/IC/ = \frac{LZ/IC/}{LO/IC/} \cdot 100 \quad [\%] \quad /5.6/$$

gdzie: $LO/IC/$ - liczba pojazdów obsłużonych w cyklu o nr $IC [P]$,
 $LZ/IC/$ - liczba pojazdów zatrzymanych, spośród obsłużonych w cyklu o nr $IC [P]$.

Średnią z procentów pojazdów zatrzymanych w poszczególnych cyklach obliczano wg wzoru:

$$\bar{Z} = \frac{T \cdot \sum_{IC=1}^{T_0/T} Z/IC/}{T_0} \quad [\%] \quad /5.7/$$

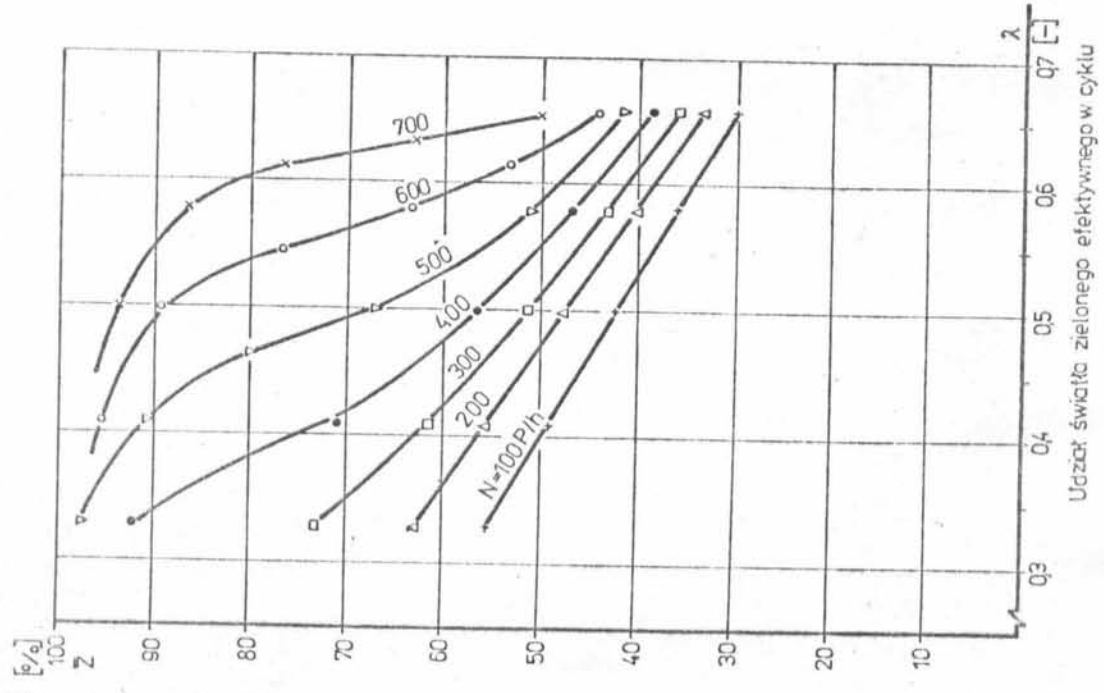
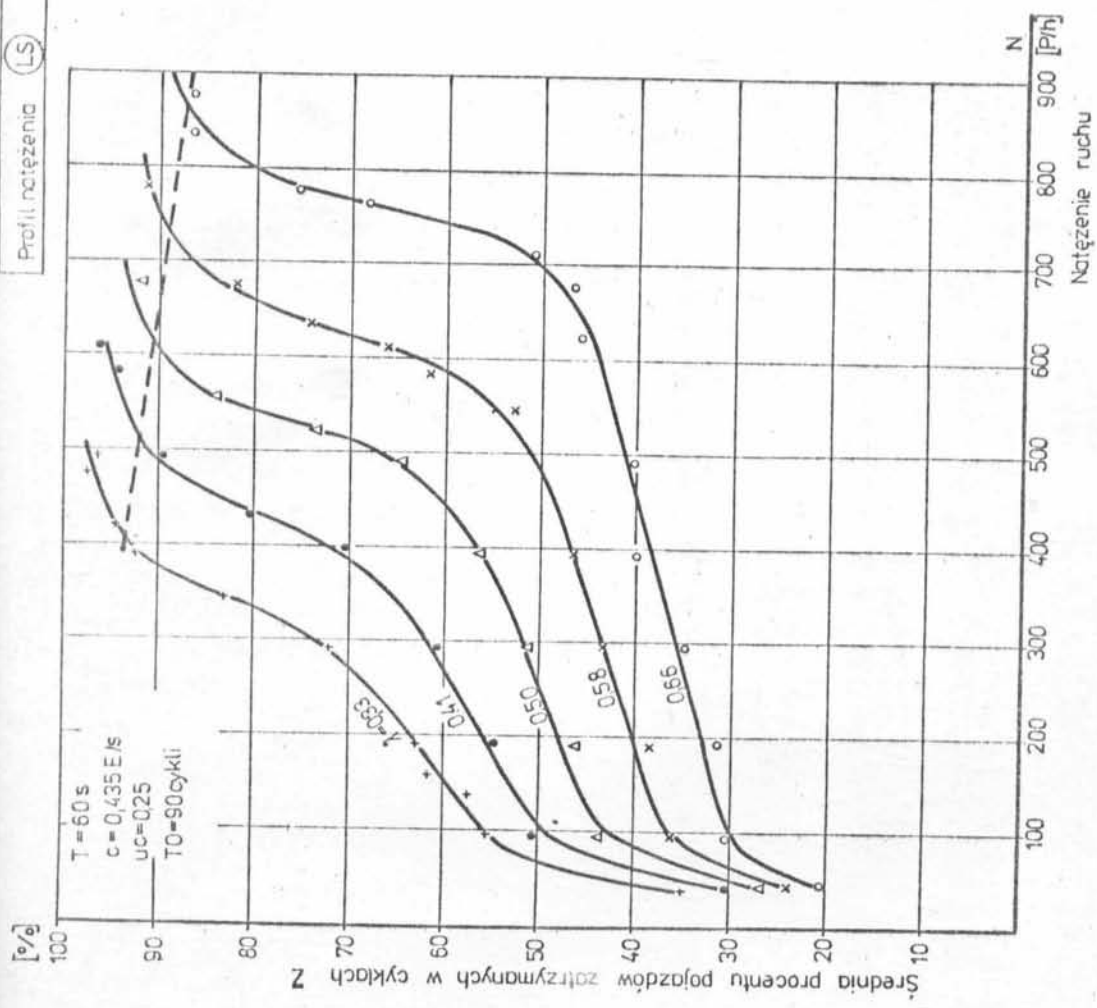
gdzie: $Z/IC/$ - jak we wzorze /5.6/,

- pozostałe oznaczenia jak we wzorze /5.1/.

Zależności tak obliczonych średnich procentów pojazdów zatrzymanych w cyklach okresu obserwacji od natężenia ruchu oraz udziału sygnału zielonego efektywnego w cyklu przedstawiono na rys. 5.15 - dla profilu natężenia LS oraz na rys. 5.16 - dla profilu LR.

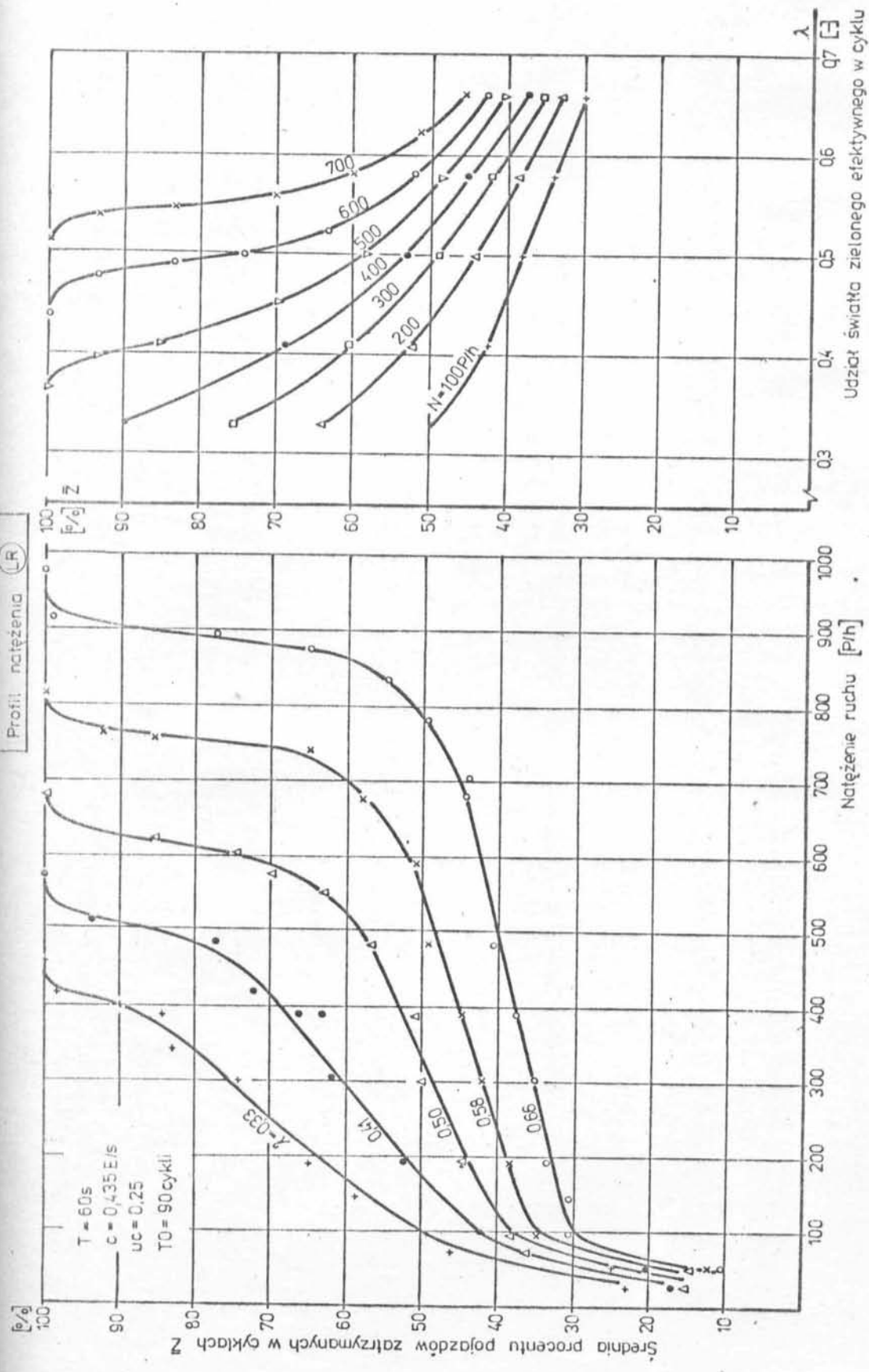
Większe tempo przyrostu wartości \bar{Z} w przedziale natężeń ok. $100 + 150 P/h$ /zależnie od wartości λ / poniżej granicy przepustowości /linia przerywana na rys. 5.15/, spowodowane jest szybkim przyrostem kolejek w tym zakresie natężeń /por.rys. 5.9 i 5.10/, a zatem i liczbą pojazdów zatrzymanych. Zmiana tempa

Profil natężenia (LS)



Udział światła zielonego efektywnego w cyklu

Rys. 5.15. Zależność między średnimi procentami pojazdów zatrzymanych w cyklach a natężeniem ruchu /profil LS/ i udziałem sygnału zielonego efektywnego w cyklu



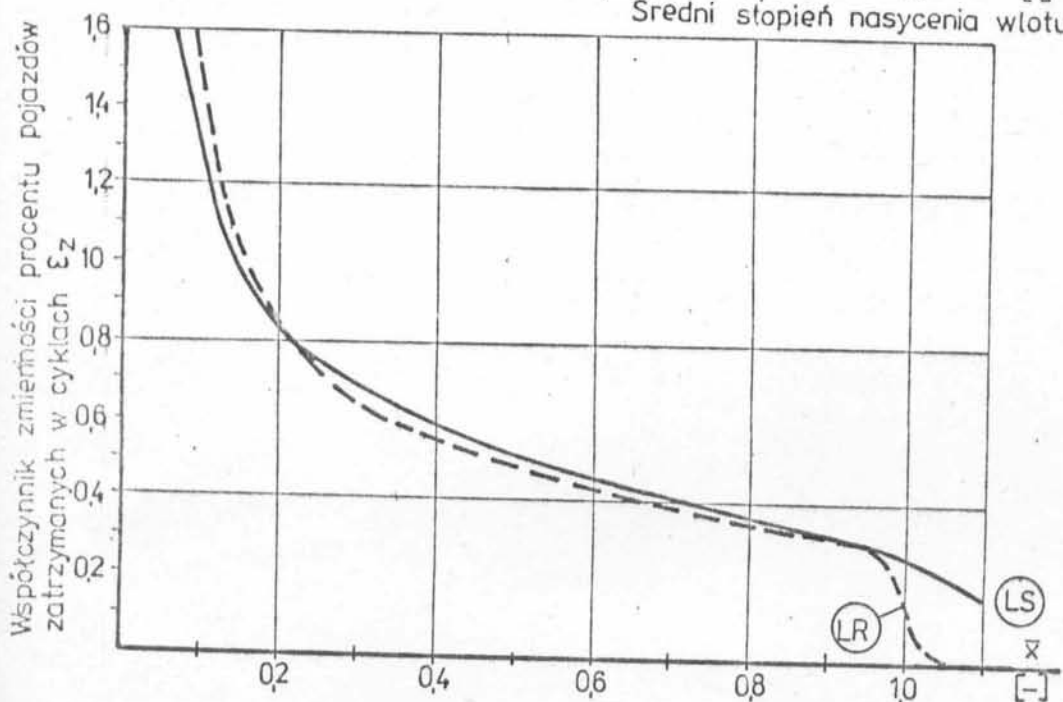
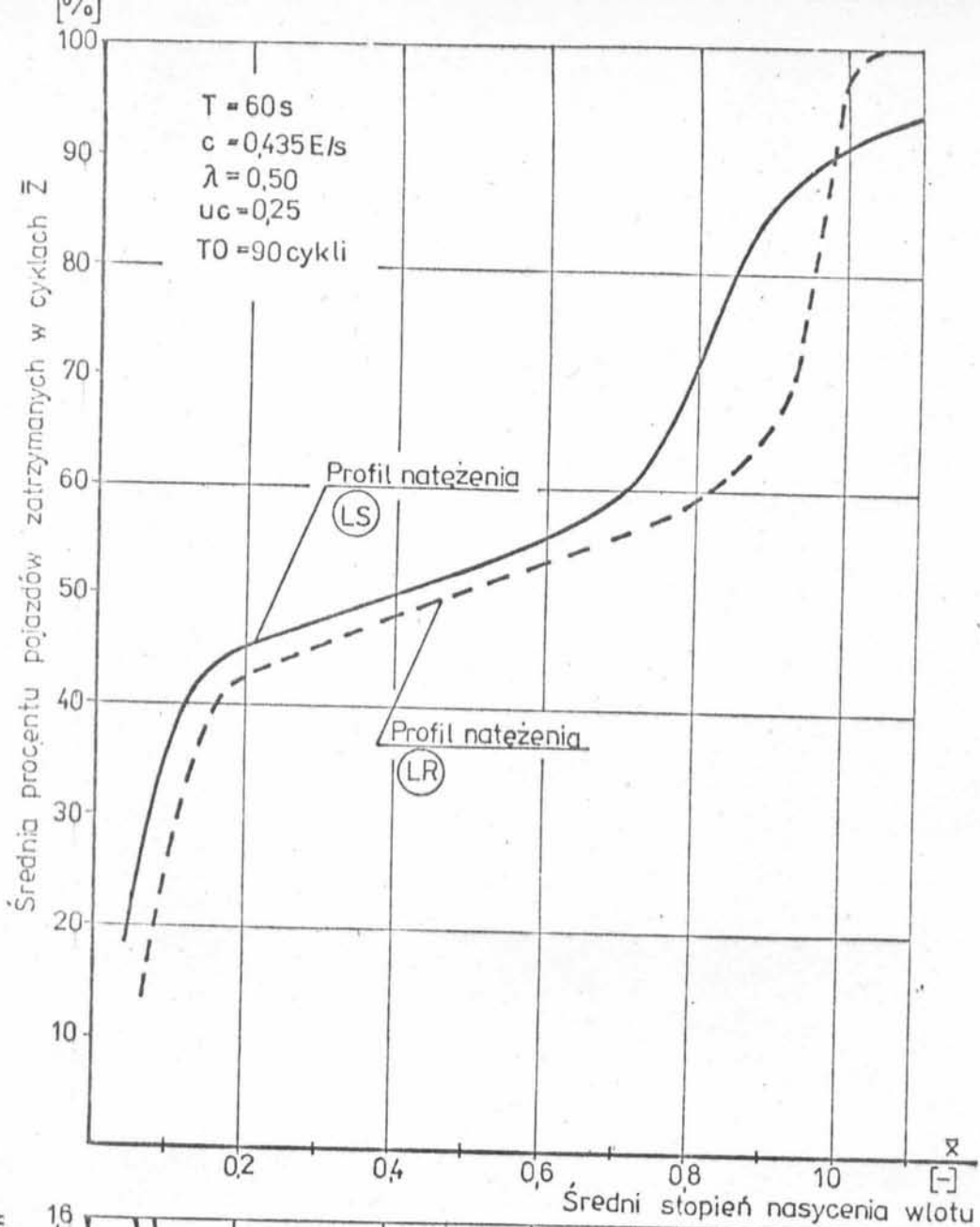
Rys. 5.16. Zależność między średnimi procentami pojazdów zatrzymanych w cyklach a natężeniem ruchu /profil LR/ i udziałem sygnału zielonego efektywnego w cyklu

przyrost \bar{Z} w przypadku potoku niestacjonarnego /LS/, przypada na przedział wartości $\bar{x} = 0,70 + 0,80$ /rys. 5.15 w aneksie/ a w przypadku potoku stacjonarnego na $\bar{x} = 0,85 + 0,95$ /rys. 5.16 w aneksie/. Przy ruchu niestacjonarnym wartości $\bar{x} = 0,75$, zależnie od udziału sygnału zielonego efektywnego w cyklu - $\lambda = 0,33 + 0,66$, odpowiadają wartości $\bar{Z} = 76 + 46\%$. Charakterystyczny jest znaczny wpływ udziału sygnału zielonego efektywnego w cyklu na wielkość \bar{Z} /rys. 5.20 i 5.21/.

Porównanie statystyk \bar{Z} i ξ_Z rozkładów zatrzymań w cyklach, w przypadku ruchu stacjonarnego i niestacjonarnego /rys. 5.17/, przy $\lambda = 0,50$ wykazuje, że przy uwzględnieniu wahań ruchu /profil natężenia LS/ średnia \bar{Z} przyjmuje większe wartości w zakresie \bar{x} od 0 do ok. 1,0 a jej przebieg wyraźnie różni się od przypadku z potokiem stacjonarnym, począwszy od wartości $\bar{x} \cong 0,70$. Znamionym jest, że w przypadku potoku niestacjonarnego, przy natężeniu osiagającym wartość przepustowości / $\bar{x} = 1,0$ / \bar{Z} wynosi ok. 90%, a więc wzrost natężenia średniego w okresie obserwacji do granicy przepustowości nie przesądza o konieczności zatrzymywania się wszystkich pojazdów w danym okresie obserwacji.

Przebieg wykresów współczynnika zmienności ξ_Z w funkcji \bar{x} , uzyskanych przy obu rodzajach potoków ruchu, nie różni się istotnie w zakresie wartości \bar{x} nie przekraczających 1,0. Po przekroczeniu $\bar{x} = 1,0$ współczynnik zmienności ξ_Z znacznie szybciej osiąga wartość zero /we wszystkich cyklach okresu T_0 100% pojazdów obsłużonych zatrzymuje się/ w odniesieniu do profilu LR niż LS.

Analiza podstawowych zależności procentów pojazdów zatrzymanych w cyklach oraz ich rozkładów wykazuje, że uwzględnienie wahań natężenia w dopływającym potoku ruchu w widoczny sposób wpływa na wielkość zatrzymań. Przyjęcie za podstawę badań stacjonar-



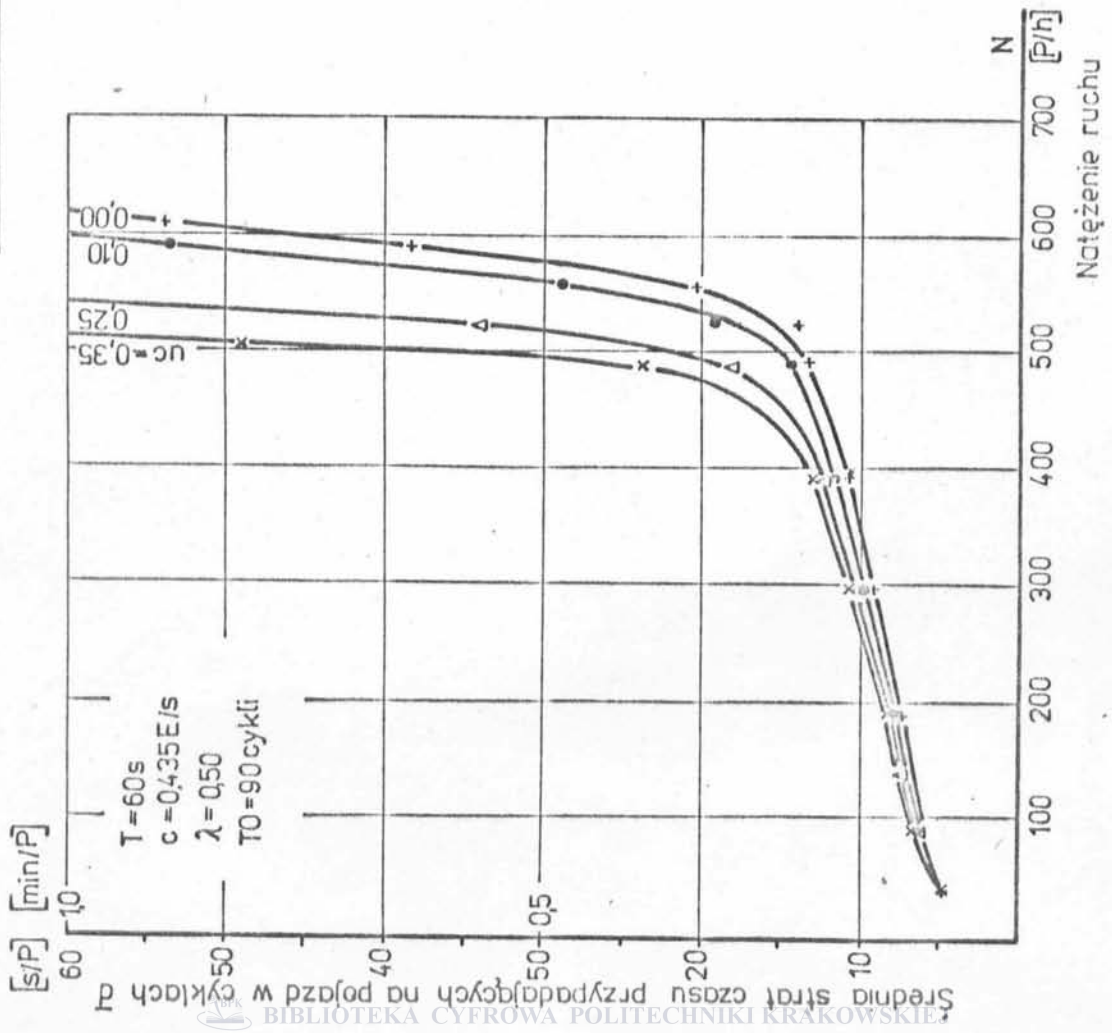
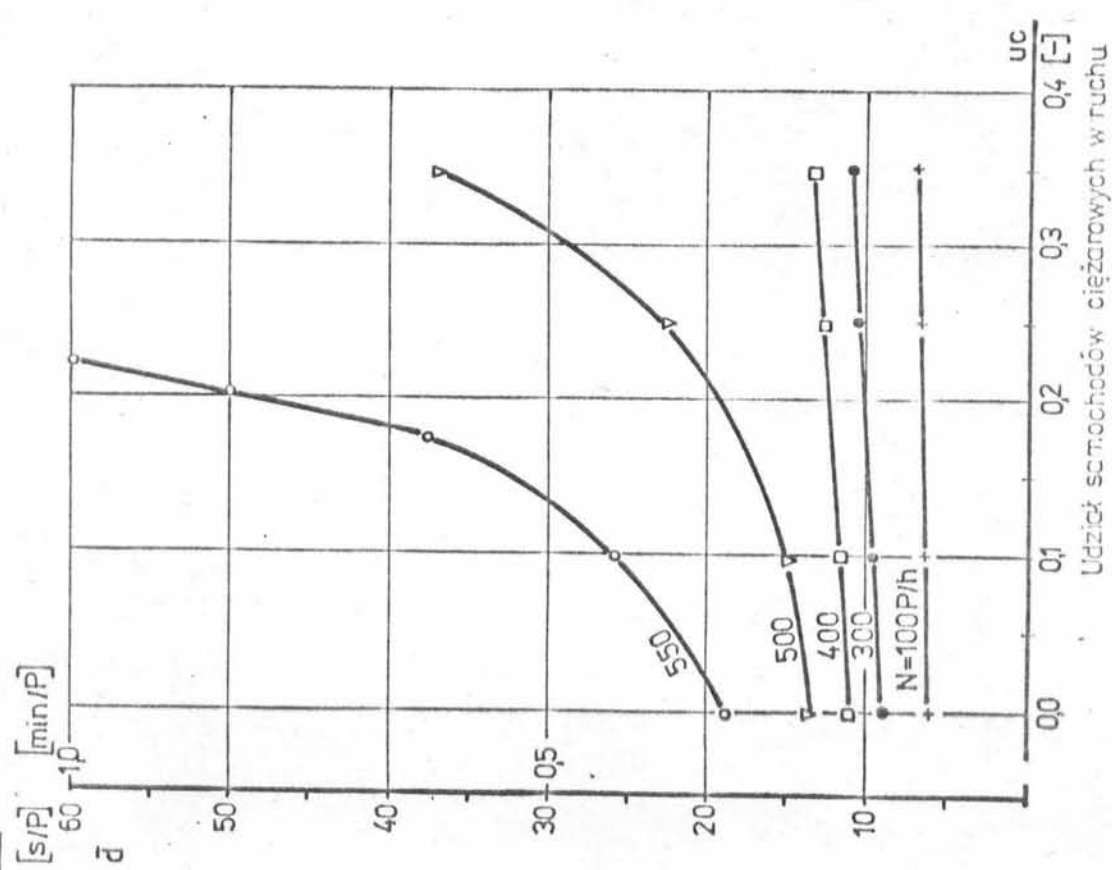
Rys. 5.17. Porównanie statystyk rozkładów zatrzymań pojazdów w cyklach dla stacjonarnego /LR/ i niestacjonarnego /LS/ potoków ruchu i różnych stopni nasycenia wlotu

nego charakteru ruchu powoduje zniżenie wartości \bar{Z} dla $\bar{x} < 1,0$.

5.4. Wpływ struktury rodzajowej ruchu na efektywność sterowania

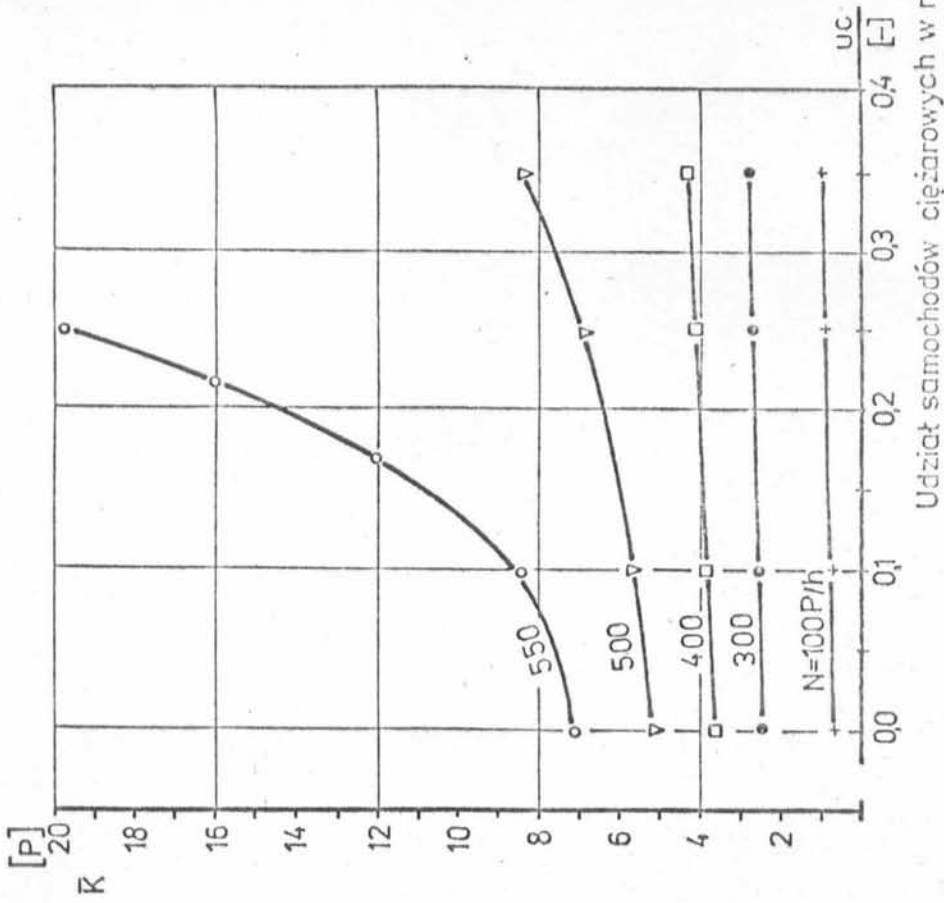
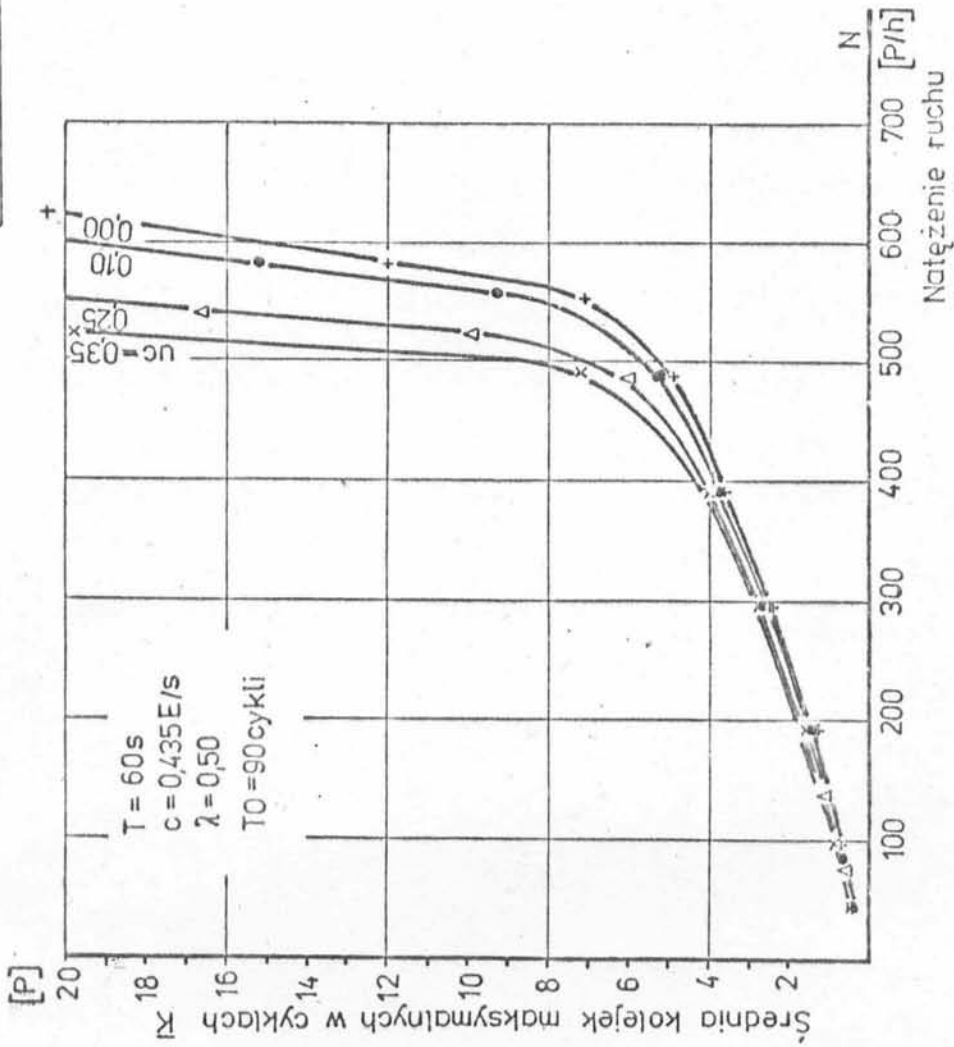
Za podstawę badań i analiz zaprezentowanych w p. 5.3 przyjęto potoki, w których udział samochodów ciężarowych stanowił $u_c = 25\%$ uznając, że taka wielkość u_c dobrze reprezentuje strukturę rodzajową ruchu licznej grupy skrzyżowań. Dla przeanalizowania wpływu jaki posiada wielkość udziału samochodów ciężarowych w potoku na podstawowe mierniki oceny efektywności sterowania /straty czasu i kolejki/ wykonano parę serii obliczeń symulacyjnych przyjmując inne wartości u_c . Wpływ udziału samochodów ciężarowych w ruchu na zależność $\bar{d} = f/N$, w przypadku profilu natężenia LS i $\lambda = 0,50$, pokazano na rys. 5.18. Wielkość wpływu u_c na średnią strat czasu przypadających na pojazd w cyklach \bar{d} nie jest stała, zwiększa się ona wraz ze wzrostem wartości natężenia N . Bardzo duży wpływ zwiększenia udziału samochodów ciężarowych w potoku występuje w zakresie natężeń, przy których następuje szybki przyrost strat czasu /powyżej natężenia granicznego odpowiadającego wartości $\bar{x} \cong 0,75$ - patrz p. 5.3.1/. Analogiczne rezultaty uzyskano analizując średnie kolejek maksymalnych w cyklach \bar{k} w funkcji natężenia ruchu /rys. 5.19/.

Szczególnie niekorzystny wpływ wzrostu udziału samochodów ciężarowych w potoku występuje w sytuacji, gdy zaczynają się pojawiać okresowe przeciążenia $\bar{x} > 0,7$. Z uwagi na dłuższe czasy obsługi samochodów ciężarowych, wraz ze wzrostem u_c ilość obsłużonych pojazdów spada, potęgując tym samym przeciążenia i ich efekty. Rosną więc kolejki i straty czasu znacznie szybciej niż w przypadku mniejszych natężeń, kiedy to kolejki w całym okresie obserwacji pozostają w stanie równowagi. Wpływ udziału samocho-



Rys. 5.18. Wpływ udziału samochodów ciężarowych w ruchu na średnie straty czasu przypadających na pojazd w cyklach dla różnych wartości natężenia ruchu / profil LS/

Profil natężenia (LS)



Rys. 5.19. Wpływ udziału samochodów ciężarowych w ruchu na średnie kolejki maksymalnych w cyklach dla różnych wartości natężenia ruchu /profil LS/

dów ciężarowych w ruchu na podstawowe mierniki sprawności skrzyżowania jest nie tylko funkcją wielkości tego udziału ale również wielkości natężenia ruchu.

Zależności $\bar{K} = f/\bar{x}$ oraz $\bar{d} = f/\bar{x}$ przedstawiono na rys. 5.17 zamieszczonym w aneksie. Zmniejszanie się wielkości \bar{K} i \bar{d} wraz ze wzrostem u_c przy danej wartości \bar{x} , wytłumaczyć można na bazie zależności, jakie zachodzą między parametrami występującymi we wzorze na stopień nasycenia $\bar{x} = \bar{q}/\lambda \cdot s$ a udziałem samochodów ciężarowych w ruchu u_c oraz kolejkami \bar{K} i stratami czasu \bar{d} . Wzrost u_c powoduje zmniejszenie się natężenia nasycenia s . W tej sytuacji, aby wartość stopnia nasycenia \bar{x} pozostała nie zmieniona, zmaleć musi natężenie \bar{q} , co pociąga za sobą spadek wartości \bar{K} oraz \bar{d} /patrz rys. 5.6 i 5.9/.

6. OCENA TEORETYCZNYCH FORMUŁ DLA SZACOWANIA STRAT CZASU W ŚWIETLE REZULTATÓW BADAŃ SYMULACYJNYCH

Straty czasu jako jeden z najważniejszych mierników jakości obsługi na skrzyżowaniu, a tym samym sprawności funkcjonowania skrzyżowania, od dawna były przedmiotem badań prowadzonych w różnych krajach. Teoretyczne poszukiwania zmierzały do opracowania w miarę zwięzłych matematycznych formuł strat czasu, umożliwiających szybkie ich szacowanie w konkretnych przypadkach. Z uwagi na znaczne trudności z wyznaczeniem na drodze empirycznej rzeczywistych strat, w szerokim zakresie zmienności warunków ruchu na skrzyżowaniach, były one w większości weryfikowane metodami symulacyjnymi, bazującymi w głównej jednak mierze na tych samych założeniach, które posłużyły do wyprowadzenia formuł, przy czym główne uproszczenie dotyczyło przyjęcia stacjonarności ruchu.

Poniżej dokonany zostanie przegląd najistotniejszych, z punktu widzenia rozwoju jak i praktycznego wykorzystania metod określania strat czasu, oraz porównanie oszacowanych przy ich wykorzystaniu strat z rezultatami własnych badań symulacyjnych przeprowadzonych w odniesieniu do ruchu traktowanego jako stacjonarny jak i niestacjonarny.

6.1. Straty czasu przy ciągłym i stałym dopływie ruchu

Podstawą najwcześniejszych rozważań teoretycznych w zakresie modelowego odwzorowania ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją stałoczasową, było założenie nieprzerywanego, stałego dopływu ruchu [2], [31], [62], [82] o natężeniu q [E/s] równym średniemu natężeniu w obserwowanym potoku. Równocześnie przyjmowano, że pojazdy opuszczają skrzyżowanie ze stałą intensywnością s [E/s]. Przy takich założeniach liczba pojazdów w kolejce zmienia się

w cyklu wg linii OXY /rys. 6.1/. Liczba pojazdów dojeżdżających do kolejki, do chwili gdy osiągnie ona stan zerowy, reprezentowana jest przez odcinek OZ linii o nachyleniu q , zaś liczba pojazdów odjeżdżających z kolejki przez odcinek WZ linii o nachyleniu s . Ponieważ pozioma odległość między tymi liniami w dowolnym punkcie przedstawia stratę czasu jednego z pojazdów w kolejce, to powierzchnia ΔOWZ reprezentuje sumę strat wszystkich pojazdów w cyklu. Dla określenia tych strat wygodnie jest operować ΔOXY , który pod względem powierzchni jest równoważny ΔOWZ . Tak więc sumaryczne straty czasu w cyklu D wyniosą:

$$D = \frac{s \cdot q \cdot R^2}{2/s - q} \quad /6.1/$$

pod warunkiem, że $q \cdot T < s \cdot /T - R/$ /następuje całkowite rozładowanie kolejki w cyklu/. Po podzieleniu przez liczbę pojazdów dojeżdżających w cyklu wynoszącą $q \cdot T$, otrzymuje się średnią stratę czasu d każdego z pojazdów w cyklu:

$$d = \frac{s \cdot R^2}{2T/s - q} \quad /6.2/$$

co można zapisać w równoważnej postaci:

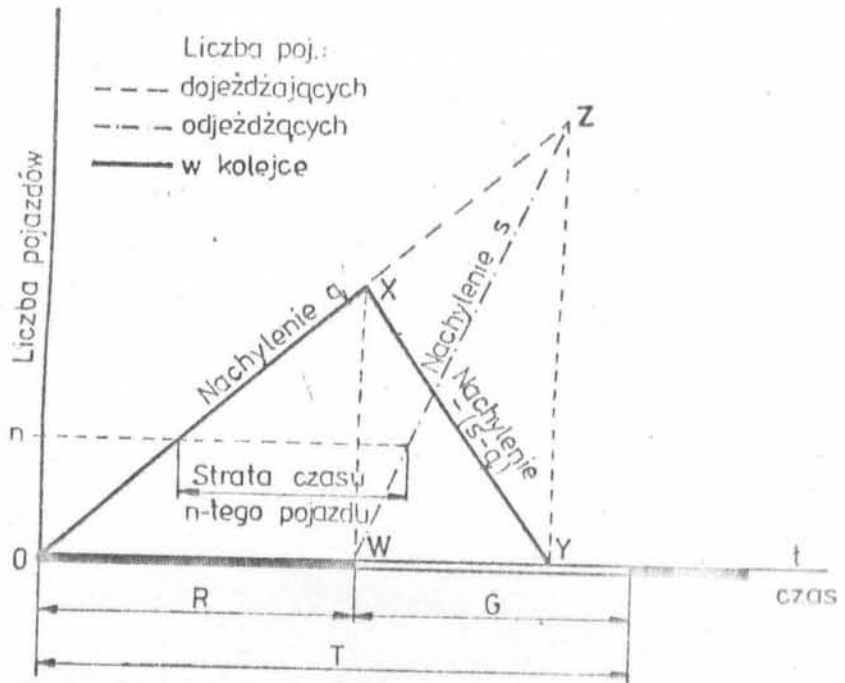
$$d = \frac{T}{2} \frac{1 - \lambda^2}{1 - \lambda x} \quad /6.3/$$

gdzie: T - długość cyklu [s],

λ - stosunek długości sygnału zielonego do długości cyklu,

x - stopień nasycenia wlotu.

Formuła /6.2/ wiązana jest z nazwiskiem Claytona, który w 1941 r. opracował jeden z pierwszych modeli ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją o stałym programie [62]. Wyrażenie /6.3/ stanowi jeden z członów wielu późniejszych formuł, pozwalających dokładniej szacować straty czasu.



Rys. 6.1. Analiza zmienności kolejki przy ciągłym, stałym dopływie ruchu /wg [2]/

6.2. Straty czasu wg teorii masowej obsługi

Pas ruchu na wlocie skrzyżowania można uznać jako jednokanałowy system masowej obsługi. Przy założeniu, bliższego rzeczywistości niż w modelu Claytona, poissonowskiego procesu zgłoszeń i w dalszym ciągu stałego czasu obsługi, mamy do czynienia, wg klasyfikacji Kendalla, z systemem M/D/1 [84]. Jeżeli zgłoszenia pojazdów opisane są jednorodnym procesem Poissona, to prawdopodobieństwo, że w interwale potrzebnym na obsługę 1 pojazdu $\tau = 1/\lambda \cdot s$ przyjedzie k pojazdów wyniesie:

$$P_k/\tau/ = e^{-\frac{q}{\lambda \cdot s}} \cdot \frac{(\frac{q}{\lambda \cdot s})^k}{k!}$$

przy czym: q - oznacza intensywność przybyć pojazdów [E/s],

$\frac{1}{\lambda \cdot s}$ - stały czas obsługi pojazdu [s].

Przy tych założeniach wyprowadzić można wzór na średnią stratę czasu, jaką ponosi w systemie pojedynczy pojazd [84]:

$$d = \frac{q}{2(1 - \frac{q}{\lambda \cdot s})} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot s} \quad \text{dla } q < \lambda \cdot s \quad /6.4/$$

Wykorzystując zależność $x = \frac{q}{\lambda \cdot s}$ wzór ten można zapisać w następującej postaci:

$$d = \frac{x^2}{2q(1-x)} \quad \text{dla } x < 1 \quad /6.5/$$

gdzie: x - stopień nasycenia wlotu,

q - natężenie potoku dopływającego [E/s].

6.3. Straty czasu w przypadku stacjonarnego, poissonowskiego strumienia zgłoszeń

Model ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją o stałym programie opracowany przez Webstera /1958 r./ zakładał:

- stacjonarny ruch na wlocie skrzyżowania,
- dopływ pojazdów zgodnie z rozkładem Poissona /współczynnik $I = 1/$,
- obsługę pojazdów podczas efektywnego sygnału zielonego ze stałym, dla każdego pojazdu, czasem.

Teoretyczne rozważania oraz badania symulacyjne, bazujące na powyższych założeniach, umożliwiły wyprowadzenie następującego wzoru na średnią stratę czasu przypadającą na pojazd:

$$d = \frac{T/1-\lambda/2}{2/1-\lambda x/} + \frac{x^2}{2q/1-x/} - 0,65 \frac{T}{q^2} / \frac{1}{3} \cdot x^{/2+5\lambda/} \quad /6.6/$$

gdzie: - oznaczenia jak we wzorach /6.3/ i /6.5/.

Wzór ten składa się z trzech członów, z których dwa pierwsze pokrywają się z przedstawionymi w p. 6.1 i 6.2 formułami /6.3/ oraz /6.5/. Uwzględniają one straty czasu powstające w przypadku stałego dopływu pojazdów w jednakowych odstępach czasu /człon pierwszy/, jak również wynikające z losowego charakteru dopływu /człon drugi/. Te dwa wyrażenia brane razem do szacowania strat czasu dawały jednak zbyt duże straty w porównaniu z otrzymanymi przez Webstera w trakcie symulacji przebiegu stacjonarnych, stochastycznych potoków ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją. Wielkość tego zawyżenia określił Webster w postaci wyrażenia zapisanego jako trzeci człon w równaniu /6.6/.

Wzór /6.6/ znalazł szerokie, praktyczne zastosowanie do określania strat czasu na skrzyżowaniach z sygnalizacją o stałym pro-

gramie. Dla ułatwienia obliczeń poszczególne jego wyrażenia zostały stabelaryzowane; opracowano też nomogramy. Odpowiednie tablice podają m.in. prace [56], [57], [70], [80]. Ponieważ w większości przypadków trzeci człon równania /6.6/ przyjmuje wartości wynoszące 5 + 15 procent straty czasu oszacowanej, przy wykorzystaniu dwóch pierwszych członów, dla przybliżonych obliczeń podał Webster następującą, uproszczoną formułę:

$$d = 0,9 \left\{ \frac{T/1-\lambda/2}{2/1-\lambda x/} + \frac{x^2}{2q/1-x/} \right\} \quad /6.7/$$

Przy takich samych założeniach, jakich użył Webster w modelu ruchu na skrzyżowaniu, Mc Neil /1968 r./ wyprowadził wzór na straty czasu, który można zapisać w postaci:

$$d = \frac{T/1-\lambda/2}{2/1-\lambda x/} + \frac{1-\lambda}{2/1-\lambda x/} \left\{ \frac{2K_k}{q} + \frac{2-\lambda x}{s/1-\lambda x/} \right\} \quad /6.8/$$

gdzie: K_k - oznacza graniczną wartość średniej kolejki na końcu sygnału zielonego w cyklach, których liczba zmierza do nieskończoności.

Wg Mc Neila, dla przypadku nienasyconego wlotu $/x < 1/$, przy którym graniczna wartość kolejki K_k istnieje, obowiązuje warunek:

$$K_k \leq \frac{x}{2/1-x/} \quad /6.9/$$

Miller dla określania wielkości kolejek K_k podał /1969 r./ następujący wzór:

$$K_k \cong \frac{\exp[-1,33/\lambda.T.s/2/1-x/x^{-1}]}{2/1-x/} \quad /6.10/$$

Numeryczne testowanie wykazało, że szacowanie strat czasu wg formuły /6.8/ przy użyciu wyrażenia Millera /6.10/ na K_k zwykle daje bardziej dokładne rezultaty niż zastosowanie formuł Webstera /6.6/ i /6.7/.

Pierwszy człon we wzorze Mc Neilla, podobnie jak i odpowiedni człon formuły Webstera, określa straty czasu w przypadku dopływu pojazdów w stałych odstępach czasu /por. wzór /6.3//.

6.4. Straty czasu wg modeli ruchu charakteryzujących stacjonarny strumień zgłoszeń współczynnikiem I

Z uwagi na różnice, jakie występują między właściwościami stochastycznymi rzeczywistych potoków dopływających do skrzyżowania i odnoszącymi się do procesu Poissona, niektórzy autorzy, rezygnując z poszukiwania bardziej dokładnych rozkładów opisujących przybycia pojazdów, wprowadzili w opracowanych modelach ruchu współczynnik I określający charakter dopływającego potoku. Współczynnik I wyraża stosunek wariancji do wartości średniej rozkładu częstości przejazdów przez dany przekrój /por. wzór /2.10//. Zgłoszenia pojazdów traktowano w dalszym ciągu jako stacjonarne w czasie.

6.4.1. Model Millera

Miller /1964 r./ w swoim modelu, nie tylko dopływ, ale również odpływ ruchu ze skrzyżowania, przyjął jako proces stochastyczny. Rozkłady liczb pojazdów dojeżdżających i przekraczających linię stop w interwałach czasu brał z obserwacji. Charakter dopływającego potoku określał za pomocą współczynnika I. Przy takich założeniach wyprowadził wyrażenie na średnią stratę czasu przypadającą na 1 pojazd w postaci [55], [56], [63]:

$$d = \frac{T/1-\lambda/2}{2/1-\lambda x} + \frac{1-\lambda}{2/1-\lambda x} \cdot \left\{ \frac{I/2x-1/q}{1-x} + \frac{I-1+\lambda x}{s} \right\} \quad /6.11/$$

przy czym, jeżeli $x < 0,5$ środkowy człon należy zastąpić przez zero.

Miller, uwzględniając wzór /6.10/ na wielkość kolejki K_k , podał również drugie wyrażenie na średnią stratę czasu [30]:

$$d = \frac{T/1-\lambda/2}{2/1-\lambda x} + \frac{1-\lambda}{2q/1-\lambda x//1-x} \cdot \exp\left[-1,33/\lambda T s/\sqrt{1-x//x}\right] \quad /6.12/$$

W obu wyrażeniach pierwszy człon odpowiada /6.3/.

6.4.2. Model Newella

Newell /1965 r./ zakładając stochastyczny charakter zarówno dopływu jak i odpływu ruchu scharakteryzował rozproszenia występujące w obu tych procesach za pomocą współczynnika I nazwanego współczynnikiem wariancji /wariancja/średnia/. Odnosi się on do zmiennej losowej [31] wyrażonej jako: $A/T - D/G$, czyli do różnicy między liczbą pojazdów A/T przybywających do skrzyżowania w czasie cyklu T, a liczbą pojazdów D/G opuszczających skrzyżowanie podczas sygnału zielonego G.

Formuła średnich strat czasu wyprowadzona przez Newella ma postać [30], [31], [82]:

$$d = \frac{T/1-\lambda/2}{2/1-\lambda x} + \frac{I/1-\lambda/2s}{2s/1-\lambda x/2} + \frac{I \cdot H/\mu \cdot x}{2q/1-x} \quad /6.13/$$

gdzie: H/μ - funkcja otrzymana przez numeryczne całkowanie równania typu Wienera-Hopfa

$$H/\mu = \frac{2\mu^2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\operatorname{tg}^2 \theta}{\exp\left\{\frac{\mu^2}{2\cos^2 \theta}\right\} - 1} d\theta$$

$$\mu = /1-x/ \sqrt{\frac{sG}{I}}$$

Wartości funkcji H/μ zmieniają się [30] od 1 przy $\mu \rightarrow 0$ do około 0,25 przy $\mu = 1$ i zmierzają do zera przy $\mu \rightarrow \infty$

6.4.3. Model Sosina

Sosin /1975 r./ przyjął model teoretyczny ruchu na skrzyżowaniu [67], w którym stochastyczny potok dopływający charakteryzowany był za pomocą współczynnika I, zaś odpływ traktowany był jako proces deterministyczny, określony przez stały odstęp między pojazdami opuszczającymi skrzyżowanie. Wyprowadzony na bazie rozważań teoretycznych wzór na średnią stratę czasu ma postać:

$$d = \frac{T/1-\lambda/2}{2/1-\lambda x/2} + \frac{1-\lambda}{2/1-\lambda x/2} \cdot \left\{ \frac{I./2x-1/}{q/1-x/} + \frac{I-1}{s} \right\} \quad /6.14/$$

przy czym, podobnie jak w równaniu /6.11/, dla $x \leq 0,5$ środkowy człon równania jest równy zero.

Badania empiryczne wykazały, że określone teoretycznie przy wyprowadzaniu wzoru /6.14/ i wchodzące w jego skład wyrażenie na średnią kolejkę na końcu sygnału zielonego $/K_k/$, niezbyt dokładnie określa obserwowane w rzeczywistości wartości K_k . Dla wyeliminowania rozbieżności została wyznaczona funkcja regresyjna, określająca różnicę między teoretycznymi i empirycznymi wartościami K_k . Ostatecznie wyrażenie na średnią kolejkę na końcu sygnału zielonego przedstawione zostało [67] w postaci:

$$K_k = \frac{/2x-1/.I}{2/1-x/} - 0,12.q.T + 0,35 \quad /6.15/$$

z następującymi warunkami:

$$x > 0,5 \quad /6.16/$$

$$\text{oraz } \frac{/2x-1/.I}{2/1-x/} > 0,12.q.T - 0,35 \quad /6.17/$$

Jeżeli któryś z tych warunków nie jest spełniony to K_k należy przyjąć zero.

Biorąc pod uwagę wyrażenie /6.15/ podał Sosin tzw. teoretyczno-empiryczną formułę na średnią stratę czasu:

$$d = \frac{q/1-\lambda/2}{2/1-\lambda x} + \frac{1-\lambda}{2/1-\lambda x} \cdot \left\{ \frac{I./2x-1/}{q/1-x} - \frac{2/0,12.q.c-0,35/}{q} + \frac{I-1}{s} \right\} /6.18/$$

Jeżeli którakolwiek z nierówności /6.16/ i /6.17/ nie jest spełniona, wówczas należy obliczać średnią stratę czasu korzystając z pierwszego członu równania, który jest identyczny z /6.3/ i wyraża stratę czasu w przypadku jednakowych odstępów czasu między dojeżdżającymi pojazdami. Do obliczeń praktycznych sugeruje Sosin odrzucenie w równaniu /6.18/ ostatniego, mało znaczącego członu.

6.5. Ogólne formuły strat czasu

W rozwoju analitycznych formuł strat czasu na skrzyżowaniu istotne miejsce zajmują podane w ogólnej formie wyrażenia odnoszące się do szerokiego zakresu zmienności parametrów, charakteryzujących warunki ruchu. Obejmują one zarówno stany nienasycone jak i przesycone wlotów. Podlegają modyfikacji w zależności od przyjmowanych założeń precyzujących procesy ruchowe na skrzyżowaniu.

6.5.1. Wlot nienasycony / $x < 1$ /

W sytuacji, gdy kolejki na wlocie skrzyżowania pozostają w stanie równowagi, możliwe jest wg Doherty'ego [15], w odniesieniu do różnych typów skrzyżowań /nie tylko z sygnalizacją świetlną/, stosowanie wzoru Pollaczka-Chinczyna na średnie straty czasu przypadające na pojazd:

$$d = A + \frac{B}{c} \cdot \frac{x}{1-x} \quad /6.19/$$

gdzie: A - stała, przedstawiająca średnią stratę czasu przy bardzo małych natężeniach ruchu,

B - stała, zależna od przyjętych modeli zgłoszeń i obsługi pojazdów,

c - przepustowość wlotu $[E/s]$ $/c = \lambda \cdot s/$.

Dla skrzyżowania z sygnalizacją Doherty sugeruje przyjmowanie stałej A równej:

$$A = \frac{T}{2} \cdot /1 - \lambda/^2 \quad /6.20/$$

Prowadząc badania symulacyjne Doherty stwierdził, że w przypadku modelu zgłoszeń Poissona /lub bardzo zbliżonego do niego/ na odosobnionym skrzyżowaniu z sygnalizacją, wartość stałej B należy przyjmować w granicach 0,55 + 0,60, przy czym wartość B = 0,55 minimalizuje różnice między symulowanymi i szacowanymi za pomocą wzoru /6.19/ stratami czasu.

Wzór Pollaczka-Chinczyna dotyczy przypadków, gdy wlot pozostaje nienasycony, czyli natężenie ruchu do ok. 0,9 przepustowości, kiedy to, przy założeniu stacjonarności dopływającego ruchu, stan równowagi, w odniesieniu do kolejek i strat czasu, może być jeszcze osiągnięty.

6.5.2. Wlot przesycony $/x > 1/$

Kiedy stopień nasycenia wlotu x przekroczy 1 nie istnieje stan równowagi, w związku z czym średnie straty czasu i średnia długość kolejek zależą od długości branego pod uwagę interwału czasowego t /czasu obserwacji/. Kiedy x przekroczy wartość ok. 1,1 proces ruchu, jak wskazuje Neuberger [15], może być traktowany deterministycznie i w sytuacji, gdy na początku rozważanego okresu t nie ma kolejki to średnią stratę czasu d po upływie czasu t można określić wzorem:

$$d = A + \frac{t}{2} \cdot /x - 1/ \quad /6.21/$$

gdzie: A - jak we wzorze /6.19/.

Gdy x jest bliskie jednośc $/0,9 < x < 1,1/$, deterministyczne podejście nie może być stosowane ze względu na stochastyczną naturę zgłoszeń. Wtedy bowiem, mimo że kolejka będzie rosnać, przyrost nie będzie odbywał się z tempem $/x - 1/ \cdot c$, jak w przypadku deterministycznym.

6.5.3. Dowolny stan nasycenia wlotu

Przedstawione w p. 6.5.1 i 6.5.2 formuły strat czasu odnoszą się odpowiednio do stanów nasycenia charakteryzowanych przez $x < 1$ oraz $x > 1$. Praktycznie w sytuacji, gdy natężenia ruchu na wlocie skrzyżowania osiągają i przekraczają przepustowość wlotu $/x \cong 0,9 + 1,1/$ nie ma możliwości szacowania strat czasu przy zastosowaniu wzorów /6.19/ i /6.21/. Dla wypełnienia tej luki Doherty /1975 r./ wyprowadził ogólny wzór na średnią stratę czasu przypadającą na pojazd [15] :

$$d = A + \frac{N - M}{4c} \quad /6.22/$$

gdzie: $M = 2 \cdot B + t \cdot c \cdot /1 - x/$

$$N = /M^2 + 8 \cdot B \cdot c \cdot t \cdot x/^{1/2}$$

A, B - stałe, jak we wzorze /6.19/,

c - przepustowość wlotu $[E/s]$,

t - długość okresu czasu, z którego warunki ruchu bierze się pod uwagę $[s]$,

x - stopień nasycenia wlotu.

Wzór /6.22/ odnosi się do okresu t, w którym potok można uznać za stacjonarny /stałe średnie tempo zgłoszeń/. Okres ten poza

tym musi się zaczynać w momencie, gdy brak jest kolejki na końcu sygnału zielonego w cyklu /kolejka początkowa dla tego okresu wynosi zero/. Budowa wzoru /6.22/ wskazuje, że straty czasu zależą od długości interwału t , do którego się odnoszą. Doherty badał tę zależność wykazując, że dla niskich wartości x straty czasu d bardzo szybko osiągają stan równowagi /nie zmieniają się w miarę przyrostu czasu t /, natomiast gdy x osiąga wartość 1 czas potrzebny do osiągnięcia równowagi dąży do nieskończoności.

Straty czasu obliczane wzorem Doherty'ego dla stopni nasycenia wlotu $x \leq 0,9$ praktycznie pokrywają się ze stratami obliczonymi przy użyciu formuły Pollaczka-Chinczyna /6.19/, a po przejściu do stanu przesyconego / $x > 1,1$ / zbliżają się do strat określonych ze wzoru Neubergera /6.21/. Dla przetestowania wzoru /6.22/ przeprowadzona była również symulacja warunków ruchu na wlocie pojedynczego skrzyżowania z sygnalizacją stałoczasową. W trakcie symulacji dopływający do skrzyżowania potok modelowany był procesem Poissona, bowiem stosując różne inne rozkłady przybyć pojazdów nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy rezultatami symulacji. Badania symulacyjne wykazały, że ogólny wzór na straty czasu /6.22/ daje dobre oszacowanie strat czasu d dla wszystkich poziomów nasycenia wlotu. Stwierdzono równocześnie, że dla niskich natężeń ruchu dokładniejszy jest wzór Webstera /6.6/.

6.6. Straty czasu przy założeniu zmiennego natężenia dopływającego ruchu

Oczywistym jest, że założenie stałego średniego natężenia ruchu w całym okresie obserwacji, jest zbyt dużym uproszczeniem w odniesieniu do okresów ruchu szczytowego /por. rys. 1.6/. Jak wykazano w rozdziałach 2 i 5, okres taki winien być reprezen-

towany przez interwały $t_{si} = 5$ min, podczas których średnie natężenie ruchu \bar{q} pozostaje stałe /patrz rys. 2.25/. Szacowanie strat czasu można odnieść więc do takich właśnie interwałów.

Przedstawione w p. 6.5 ogólne formuły strat czasu wyprowadzone zostały jednak przy wzięciu pod uwagę założenia, że na początku rozważanego okresu brak jest kolejki początkowej /kolejki na końcu sygnału zielonego/. Ponieważ w okresie obserwacji, przynajmniej w odniesieniu do części interwałów, warunek ten nie będzie spełniony, problem sprowadza się do znalezienia wyrażenia na średnie straty czasu, jakie ponoszą pojazdy podczas interwału t o stałym średnim natężeniu w sytuacji, gdy na początku tego interwału jest kolejka K_0 . Jest to więc zagadnienie poszukiwania funkcji strat czasu $d/x, t, K_0/$. Problem ten w sposób teoretyczny analizował Catling /1977 r./ [15].

Zakładając, że \bar{d}_1 jest średnią stratą każdego spośród x_1 .c.t. pojazdów zgłaszających się podczas i -tego interwału o długości t , średnia strata czasu w okresie obserwacji wyniesie:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n /x_i \cdot \bar{d}_1/}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad /6.23/$$

gdzie: x_i - stopień nasycenia wlotu w i -tym interwale czasu,
 n - liczba interwałów t w okresie obserwacji.

Dla obliczenia wartości \bar{d}_1 do wyrażenia /6.23/ potrzebna jest znajomość funkcji $K/x, t, K_0/$ umożliwiającej określanie długości kolejki na końcu każdego interwału t . Zakładając, że w kolejnych interwałach /każdy o długości t / okresu obserwacji wystąpią nasycenia wlotu x_1, x_2, \dots, x_n oraz, że na początku tego okresu jest kolejka K_0 , dla każdego interwału obliczyć trzeba wartości

$K_i = K/x_i, t, K_{i-1}/$ oraz $\bar{d}_i = d/x_i, t, K_{i-1}/$. Problem podjęty przez Catlinga sprowadzał się więc do wyprowadzenia wyrażen opisujących funkcje $d/x, t, K_0/$ oraz $K/x, t, K_0/$, przy uwzględnieniu wszystkich możliwych stanów nasycenia wlotu. Końcowe formuły strat czasu przypadających na pojazd w interwale t , jakie uzyskał Catling, w odniesieniu do czterech przypadków, charakteryzujących się różnymi warunkami ruchowymi, zestawiono w tabelicy 6.1. Rozważane przypadki to:

- I stan przesycony $/x \geq 1/$,
- II stan nienasycony $/x < 1/$, a początkowa długość kolejki jest mniejsza niż graniczna jej długość osiągnana w stanie równowagi,
- III stan nienasycony, a początkowa długość kolejki jest większa niż graniczna jej długość osiągnana w stanie równowagi i interwał czasu t nie jest na tyle długi, aby długość kolejki spadła do tej wartości,
- IV warunki jak w przypadku III z tym, że czas potrzebny do osiągnięcia przez kolejkę granicznej długości jest mniejszy od długości interwału t .

Przeprowadzone przez Catlinga badania symulacyjne wykazały, że korelacja między stratami czasu wyznaczonymi przy zastosowaniu wzoru /6.23/ dla potoków o zmiennym natężeniu w okresie obserwacji i stratami uzyskanymi z symulacji jest bardzo silna $/r^2 = 0,99/$. W przebiegach symulacyjnych wykorzystywano przede wszystkim paraboliczny profil natężenia ruchu, determinujący zmienne w czasie nasycenie wlotu:

$$x/t/ = \frac{3\bar{x}}{2} - \frac{3\bar{x}}{2} \cdot \sqrt{\frac{2t}{T_0}} - 1/2 \quad /6.24/$$

gdzie: $x/t/$ - stopień nasycenia wlotu w czasie t ,

\bar{x} - średni stopień nasycenia w ciągu całego okresu T_0 .

Celem symulacji, oprócz weryfikacji wyprowadzonych wzorów, było

Formuły strat czasu obowiązujące w różnych warunkach ruchowych - wg Catlinga [15]

Przypadek	Warunki	$d(x, t, K_0)$	$K(x, t, K_0)$
I	$x \geq 1$	$\frac{1}{t} [(t+t') \cdot d(x, t+t') - t' \cdot d(x, t')]$	$K(x, t+t')$
II	$x < 1$ i $K_0 \leq K1(x)$	gdzie t' jest takie, że $K(x, t') = K_0$	
III	$x < 1$ oraz $K_0 > K1(x)$ i $t \leq \frac{K_0 - K1(x)}{(1-x)c}$	$A - \frac{1}{2} (1-x) + \frac{K_0}{c}$	$K_0 - (1-x) \cdot c \cdot t$
IV	$x < 1$ oraz $K_0 > K1(x)$ i $t > \frac{K_0 - K1(x)}{(1-x)c}$	$A + \frac{K1(x)}{x \cdot c} + \frac{[K_0 - K1(x)][x(K_0 + K1(x)) - 2K1(x)]}{2 \cdot x \cdot c^2 \cdot t \cdot (1-x)}$	$K1(x)$

Gdzie: $d(x, t, K_0)$ - średnie straty czasu przypadające na każdy z pojazdów przybywających do skrzyżowania w interwale t o średnim stopniu nasycenia wlotu x i początkowej kolejce długości K_0 ,

$K(x, t, K_0)$ - długość kolejki na końcu interwału t /przy warunkach jak wyżej/,

$d(x, t) \equiv d(x, t, 0)$ - średnie straty czasu w interwale t o stopniu nasycenia wlotu x i bez początkowej kolejki / $K_0=0$ / /określane np. ze wzoru (6.22) /,

$K(x, t) \equiv K(x, t, 0)$ - długość kolejki po okresie czasu t ze stopniem nasycenia wlotu x i bez początkowej kolejki. Można ją wyliczyć np. ze wzoru:

$$K(x, t) = \frac{1}{\alpha} (\beta^2 + 2 \cdot x^2 \cdot c^2 \cdot t^2 \cdot \alpha \cdot B)^{\frac{1}{2}} - \beta$$

w którym: $\alpha = 2(c \cdot t - B)$,

$$\beta = c \cdot t [(1-x)c \cdot t + 2 B \cdot x]$$

B i c - jak we wzorze (6.19)

$K1(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} K(x, t)$ - graniczna długość kolejki osiągnięta w stanie równowagi, czyli tylko w przypadku gdy $x < 1$,

$$K1(x) = \frac{B \cdot x^2}{1-x}$$

t' - długość hipotetycznego interwału, po upływie którego kolejka osiąga długość K_0 przy założeniu, że w interwale tym średni stopień nasycenia wynosił x a na jego początku nie było kolejki,

A - stała jak we wzorze (6.19)

również zbadanie wpływu liczby interwałów o stałym średnim stopniu nasycenia wlotu, na które podzielony jest okres obserwacji T_0 , na straty czasu. Otrzymane rezultaty wykazały, że dla celów praktycznych wystarczający jest podział okresu ze zmiennym natężeniem na interwały 5 do 10 min. reprezentowane stałą wartością natężenia. Okazało się również, że przyjęcie potoku za stacjonarny w okresie T_0 , przy średnim stopniu nasycenia wlotu $\bar{x} = 0,9$ daje ok. 6-krotnie niższe straty czasu niż uzyskane w przypadku zmiennego w czasie nasycenia wlotu danego równaniem /6.24/ - uzyskano odpowiednio $d = 0,6$ i $3,7$ min/P.

6.7. Porównanie i ocena różnych formuł strat czasu w świetle rezultatów własnych badań symulacyjnych

Dokonany przegląd teoretycznych formuł umożliwiających szacowanie strat czasu na odosobnionym skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną o stałym programie objął wyrażenia, które mogą być przydatne do celów praktycznych.

Przedstawiona w pierwszej kolejności formuła Claytona stanowi jeden z zasadniczych członów później wyprowadzonych wyrażeń, takich jak np. wyrażenia Webstera i Newella, oba wyrażenia Millera a także oba wyrażenia Sosina. Mimo, że została ona wyprowadzona przy daleko idących założeniach upraszczających, to w znacznie bardziej rozbudowanych formułach, stanowi ona człon decydujący o wielkości strat czasu przy mniejszych natężeniach $/x < 0,5/$. Zasadniczym mankamentem formuły Claytona jest nieuwzględnianie strat czasu pojazdów, które nie opuściły skrzyżowania w jednym cyklu, co w rzeczywistości ma miejsce przy wyższych wartościach stopnia nasycenia wlotu. Stąd m.in. straty czasu szacowane wzorem Claytona przy większych natężeniach ruchu są znacznie zaniżone.

Wzór Webstera znalazł szerokie praktyczne zastosowanie.

Na formule tej bazuje angielska metoda RRL projektowania programu sygnalizacji. W porównaniu z modelem Claytona uwzględnia on losowość dopływającego ruchu oraz poprawkę niwelującą rozbieżności między sumą strat otrzymywanych z wyrażenia Claytona i wyprowadzonego wg zasad obsługi masowej a stratami określonymi w przebiegach symulacyjnych.

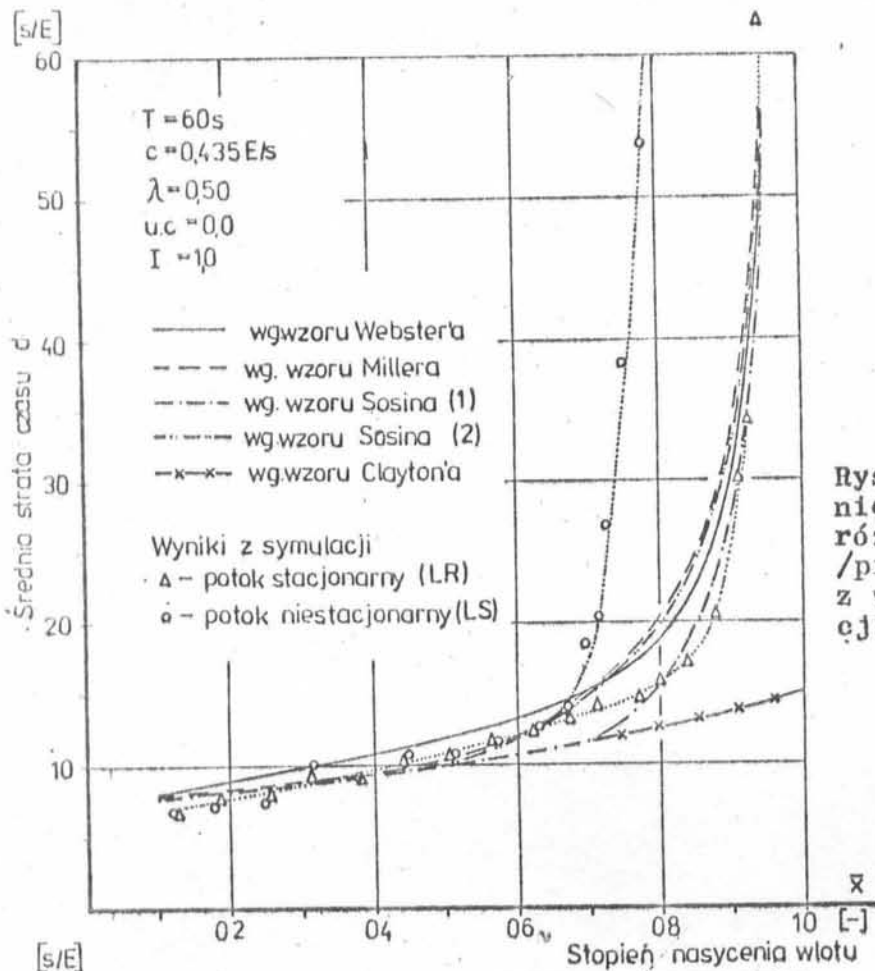
Formułę odmiennej postaci, lecz opartą na identycznym modelu ruchu na skrzyżowaniu jak w przypadku Webstera, wyprowadził Mc Neil. Podstawowym założeniem w obu tych przypadkach jest przyjęcie dopływu pojazdów zgodnego z rozkładem Poissona. Takie założenie oznacza, że potok dopływający do skrzyżowania charakteryzuje się współczynnikiem $I = 1,0$ /bowiem w rozkładzie Poissona wariancja i wartość średnia są sobie równe/. Rzeczywisty ruch zazwyczaj charakteryzuje się współczynnikiem $I \neq 1$ /por. p. 2.3.3 oraz rys. 2.8/, a więc faktyczne rozkłady liczb pojazdów zgłaszających się w interwałach czasu na wlocie skrzyżowania różnią się od rozkładu Poissona. Rozważono więc również grupę formuł, wyprowadzonych w oparciu o modele Millera, Newell'a i Sosina, mających wspólną cechę - wykorzystanie współczynnika I w celu identyfikacji ruchu na wlocie skrzyżowania.

Miller i Sosin, oprócz wzorów wyprowadzonych w czysto teoretyczny sposób, podali również formuły teoretyczno-empiryczne. Empirycznej weryfikacji poddali oni w zasadzie teoretyczne formuły na średnie koleki na końcu sygnału zielonego, stwierdzając niezgodność rezultatów otrzymywanych przy ich zastosowaniu z danymi uzyskanymi z obserwacji.

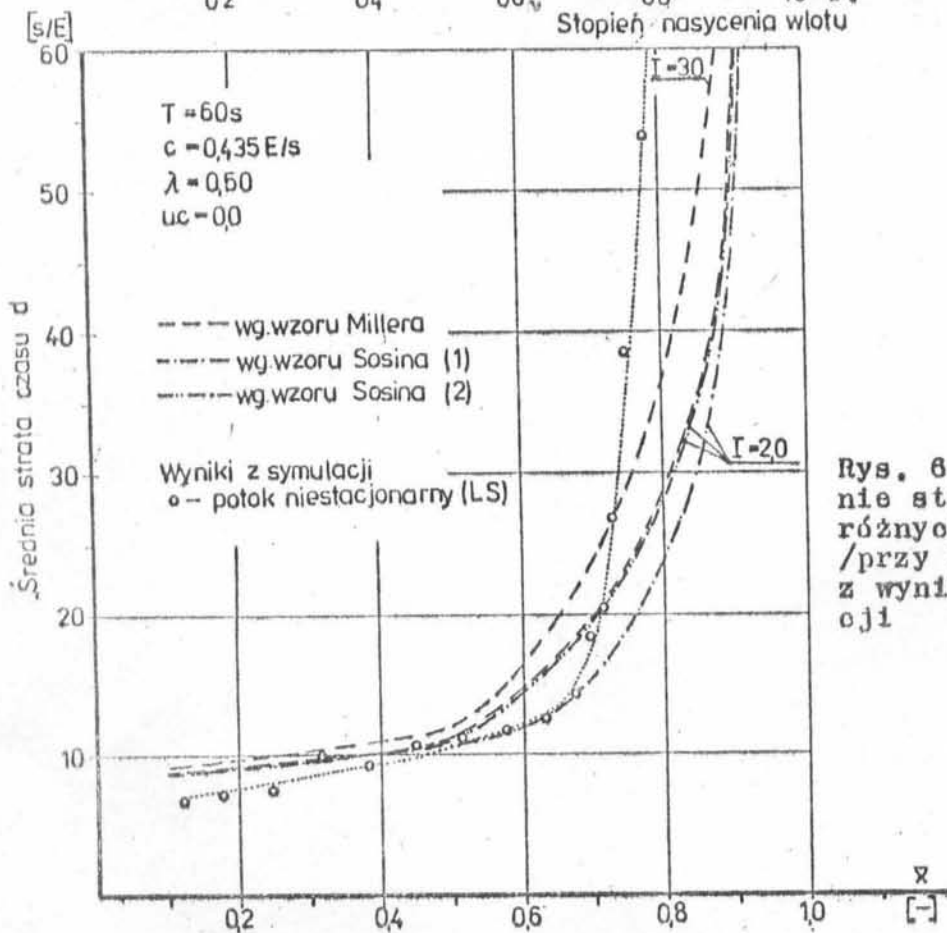
Formuła podana przez Newella jest bardzo kłopotliwa w praktycznym zastosowaniu w przypadku nie posiadania stabilizowanych wartości funkcji H/μ . Została ona wyprowadzona przy wzięciu pod

uwagę faktu, że straty czasu pojazdów nie zależą istotnie od szczegółowych stochastycznych cech modelowanego procesu ruchu. Newell utrzymywał, że największym założeniem upraszczającym przy wyprowadzaniu formuły było przyjęcie rozkładu różnic przybywających i odjeżdżających pojazdów w cyklach jako normalnego [31]. To założenie jednakże, w porównaniu z przyjęciem stacjonarności ruchu, wydaje się mniej istotne. Porównanie wartości uzyskanych przy zastosowaniu wzorów Newella i Webstera wykazało [82], że różnią się one w granicach 3 do 4 procent.

Na rys. 6.2 dokonano porównania zależności średnich strat czasu d od stopnia nasycenia wlotu \bar{x} otrzymanych przy zastosowaniu formuł: Webstera /6.6/, Millera /6.11/, Sosina - 1 /6.13/, Sosina - 2 /6.14/ oraz Claytona /6.3/. Zrezygnowano z umieszczenia na rysunku krzywej wg Mc Neila, gdyż przy wybranych arbitralnie parametrach sterowania $T = 60$ s, $\lambda = 0,50$ /, będących podstawą sporządzonych wykresów, różni się nieznacznie od krzywej wg Webstera. Dla zapewnienia, w odniesieniu do wszystkich formuł, identycznej charakterystyki potoku ruchu - przyjęto $I = 1,0$. W zakresie $x = 0,0 + 0,5$ krzywe wg Millera i Sosina praktycznie pokrywają się z krzywą uzyskaną wg najprostszej formuły strat czasu Claytona. Wzór Webstera daje w tym zakresie większe wartości d . Dla wyższych stopni nasycenia wlotu $/x \geq 0,7/$ wzory Millera i Sosina - 2 określają wartości strat czasu niewiele odbiegające od uzyskanych z wzoru Webstera. Formuła teoretyczno-empiryczna Sosina, przy konkretnych warunkach, dla których sporządzono wykresy, dla $x > 0,5$ daje mniejsze wartości strat czasu, przy czym początkowo /do $x = 0,7/$ pokrywają się one z wynikami wg Claytona. Rezultaty uzyskiwane z teoretycznej formuły Sosina /6.14/ w całym zakresie wartości x praktycznie pokrywają się z uzyskanymi z formuły Millera /6.11/. Na rys. 6.2 naniesiono również własne wyniki



Rys. 6.2. Porównanie strat czasu wg różnych formuł /przy $I = 1,0$ / z wynikami symulacji



Rys. 6.3. Porównanie strat czasu wg różnych formuł /przy $I = 2,0$ i $3,0$ / z wynikami symulacji

uzyskane z symulacji przy założeniu potoków stacjonarnego /LR/ i niestacjonarnego /LS/ /krzywe kropkowane/. Porównanie z pozostałymi krzywymi wykazuje, że:

- dla x mniejszego od ok. 0,6 wyniki symulacji bliskie są wartościom strat czasu szacowanym wg Millera, Sosina i Claytona,
- przy wyższych wartościach stopnia nasycenia krzywa odnosząca się do stacjonarnego potoku ruchu leży najbliższej krzywej wg Sosina - i /wzór teoretyczno-empiryczny/,
- krzywa uzyskana w przypadku uwzględnienia wahań ruchu /potok LS/ dla $x > 0,7$ wyraźnie odbiega od pozostałych przyjmując znacznie większe wartości.

Zgodność wyników symulacji w odniesieniu do potoku stacjonarnego z wyprowadzonymi zasadniczo na drodze teoretycznej formułami różnych autorów potwierdza poprawność przyjętych założeń ruchowych jak i opracowanego numerycznego modelu ruchu. Wyniki symulacji, w porównaniu z powszechnie stosowanym do szacowania strat czasu wzorem Webstera, wskazują że w przypadku potoku stacjonarnego formuła Webstera daje zbyt wysokie /rzędu $1 + 3 s/E$ / średnie straty czasu. W sytuacji, gdy rozważane są natomiast przypadki niestacjonarne, formuły teoretyczne poprawnie szacują straty przy średnim stopniu nasycenia wlotu nie przekraczającym wartości ok. 0,65.

Wyrażenia Millera i Sosina mają możliwość uwzględnienia większego rozrzutu liczb pojazdów przybywających w cyklach, cechującego godziny ruchu szczytowego, przez współczynnik I . Na rys. 6.3 zestawiono krzywe wg Millera i Sosina /1 i 2/ dla $I = 2,0$ oraz dodatkowo dla $I = 3,0$ wg Millera. W tym przypadku uzyskano zgodność wyników z symulacji jedynie z krzywą wg wzoru teoretyczno-empirycznego Sosina i to w niewielkim zakresie zmienności stopnia nasycenia wlotu $\bar{x} = 0,5 + 0,65$ /. Pomimo, że krzywa wykreślona na podstawie wyników symulacji dotyczy potoku

zmiennego w czasie dla którego I przyjmuje przeciętnie wartości w zakresie $0,90 + 1,30$, to okazuje się, że przyjęcie do wzoru Millera nawet wartości $I = 3,0$ daje znacznie mniejsze straty przy \bar{x} większym od ok. $0,75$. Straty czasu przy mniejszych wartościach stopnia nasycenia wlotu są zaś wyraźnie przeszacowane.

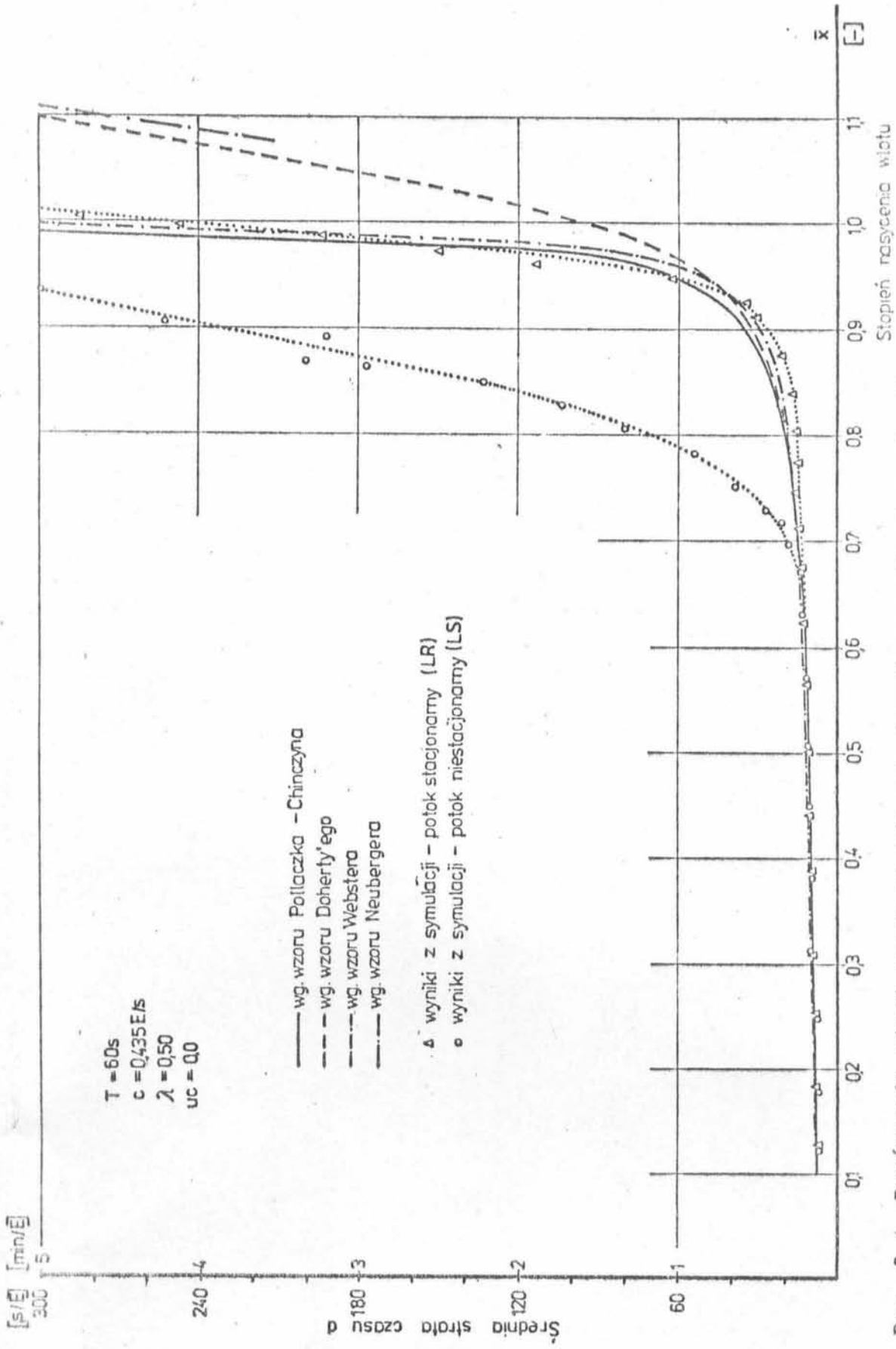
Dokonane porównanie wykazuje, że stosowanie rozważanych formuł strat czasu w odniesieniu do godzin ruchu szczytowego, charakteryzujących się zazwyczaj wysokimi wartościami średniego stopnia nasycenia wlotu oraz niestacjonarnością ruchu, powodować będzie znaczne zaniżanie strat czasu. Przyjęcie zaś przykładowo stopnia nasycenia odpowiadającego wartości \bar{x} z okresu 15 min. o najwyższym natężeniu, spowoduje zawyżenie strat czasu, gdy \bar{x} będzie bliskie $1,0$ lub wykroczenie poza zakres stosowalności formuł, wyprowadzonych na bazie modeli systemu w stanie ustalonym, gdy $\bar{x} > 1,0$. Przy mniejszych wartościach stopnia nasycenia wlotu $\bar{x} < 0,5$ losowość dopływu jak i jego niestacjonarność mają znaczenie drugorzędne. W tym zakresie nasycenia wlotu dopływ może być traktowany jako ciągły i stały /model Claytona/ a uzyskane przy tym znacznym uproszczeniu straty czasu stanowią dobre przybliżenie do rzeczywistych.

Szczegółowe porównanie formuł Webstera /6.6/, Millera /6.11/ i /6.12/ oraz Newella /6.13/ w szerokim zakresie zmienności parametrów dokonał Hutchinson /1972 r./ [30]. Wziął on pod uwagę również zmodyfikowane wyrażenie Webstera, które jest analogiczne do /6.7/ lecz drugi człon mnożony jest przez I. Ocenie poddał także wpływ małych zmian parametrów $\pm 5\%$ w odniesieniu do natężenia potoku dopływającego oraz natężenia nasycenia, $\pm 1\%$ w odniesieniu do długości sygnału zielonego efektywnego/ na rezultaty otrzymywane przy użyciu formuły Webstera /6.6/. W konkluzji Hutchinson podał, że nie jest łatwo dać odpowiedź, które z porównywanych wyra-

zeń daje najlepszą ocenę strat czasu, bowiem same błędy pomiarowe przy określaniu parametrów ruchu oraz rzeczywistych strat czasu powodują większe procentowo odchylenia wartości strat czasu szacowanych wg Webstera, niż procent o jaki różnią się od nich straty określone wg pozostałych formuł.

Porównanie zaprezentowanych w p. 6.5 formuł strat czasu wg Pollaczka-Chinczyna /6.19/, Neubergera /6.21/ i Doherty'ego /6.22/ z wynikami symulacji przedstawiono na rys. 6.4. Dodatkowo na wykres naniesiono krzywą wg Webstera /6.6/. Wszystkie formuły wykazują dużą zgodność z wynikami symulacji w przypadku stacjonarnym dla $\bar{x} < 0,7$. Przy wyższych wartościach stopnia nasycenia najbliższe wyniki w stosunku do uzyskanych z symulacji daje formuła Pollaczka-Chinczyna, która jednakże w pewnych zakresach wartości \bar{x} bardziej odbiega od wyników symulacji niż krzywa wg Webstera. Formuły Doherty'ego i Neubergera w sytuacji, gdy średnie natężenie przekracza wartość przepustowości / $\bar{x} > 1,0$ /, znacznie zaniżają straty czasu przypadające na pojazd. Wszystkie z porównywanych na rys. 6.4 krzywych $d = f/\bar{x}$, określonych z teoretycznych formuł, dla $\bar{x} > 0,7$ bardzo odbiegają od wyników symulacji uzyskanych przy uwzględnieniu wahań ruchu charakterystycznych dla godzin ruchu szczytowego /profil natężenia LS/.

Generalnie więc żadna z ocenianych formuł nie nadaje się do szacowania strat czasu w przypadku ruchu charakteryzującego się wahaniami natężenia właściwymi szczytowym godzinom. W tej sytuacji pozostaje jedynie kłopotliwa analiza "techniką mikro" sugerowana już w pracy [62] a polegająca na prowadzeniu obliczeń w krótkich interwałach czasu, wewnątrz których ruch może być traktowany jako stacjonarny. Odpowiednie wzory do określania strat czasu w takich interwałach, w zależności od występujących w nich warunków ruchowych, podał Catling /tablica 6.1/. Przeciętną stratę czasu przy-



Rys. 6.4. Porównanie strat czasu wg różnych formuł z wynikami symulacji

padającą na pojazd w całym okresie obserwacji /okresie ruchu szczytowego/ określa się, w przypadku zastosowania tej techniki obliczeń, z wzoru /6.23/. Przybliżone porównanie strat czasu, wyznaczonych metodą symulacyjną dla potoków niestacjonarnych /LS/, z obliczonymi techniką opracowaną przez Catlinga potwierdziło dużą zgodność rezultatów i przydatność tej metody do szacowania strat czasu przy zmiennym w czasie natężeniu ruchu. Jednak adaptacja tej metody do praktycznego stosowania jest raczej nierealna, z uwagi na wysoki stopień skomplikowania techniki obliczeniowej. Catling, dla zapewnienia ekonomicznego korzystania z tej metody, sugeruje opracowanie odpowiednich tabel, zawierających zestawienia strat czasu i długości kolejek, w zależności od parametrów skrzyżowania /geometryczne i sterowania/, natężeń ruchu i długości interwałów czasowych.

7. SYNTEZA PRACY

7.1. Podsumowanie i ocena efektów pracy

W niniejszej pracy - zgodnie z jej głównym celem określonym we wstępie - zbadano i określono wpływ wahań ruchu /jego niestacjonarności/ występujących w godzinach szczytowych na efektywność sterowania ruchem na wlocie skrzyżowania, za pomocą sygnalizacji o stałym programie. Efektywność sterowania oceniano przy użyciu różnych mierników - takich jak: straty czasu, kolejki, zatrzymywania i przeciążenia cykli - odnosząc uzyskane rezultaty do sprawności funkcjonowania skrzyżowania, na którym zakłada się stacjonarne potoki ruchu. Badaniami objęto - stanowiące zdecydowaną większość wśród skrzyżowań z sygnalizacją - skrzyżowania odosobnione, na których ruch sterowany jest za pomocą sygnalizacji o stałym programie.

Dla osiągnięcia zasadniczego celu pracy niezbędne było:

- wprowadzenie i określenie wskaźników umożliwiających opis wahań ruchu w wartościach liczbowych,
- zbadanie i scharakteryzowanie wahań ruchu dopływającego do skrzyżowania,
- określenie typowych dla godzin szczytowych profili natężenia ruchu,
- zamodelowanie potoku ruchu z wahaniami jego natężenia adekwatnymi do występujących w rzeczywistości,
- dokonanie identyfikacji procesów ruchu i opracowanie modelu ruchu na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją, umożliwiającego przeprowadzenie przedmiotowych badań.

Celowość podjęcia tematu - obejmującego zagadnienia związane z opisem potoku ruchu oraz oddziaływaniem wahań jego natężenia na sprawność funkcjonowania skrzyżowania z sygnalizacją - wynika z dokonanego przeglądu literatury oraz potrzeb praktyki. Stoso-

wane obecnie w praktyce metody projektowania geometrycznego, programowania sygnalizacji jak i oceny warunków ruchu na skrzyżowaniu bazują na ustaleniach dokonanych w głównej mierze przy założeniu stochastycznych lecz niezmiennych w czasie potoków ruchu. Przeprowadzone badania empiryczne wykazały, że występujące w rzeczywistości, szczególnie podczas godzin ruchu szczytowego wahania, wykluczają możliwość traktowania potoku ruchu jako stacjonarnego. Pierwszorzędne znaczenie ma więc ocena, do jakiego stopnia poprawne są te metody a także jaka jest efektywność istniejących rozwiązań.

Problematykę podjętych w pracy badań ukierunkowano na zagadnienie efektywności sterowania ruchem, dążąc do stworzenia podstaw dla jej prawidłowej oceny a przez to racjonalnej modernizacji istniejących rozwiązań.

Dla zrealizowania tych zamierzeń przeprowadzono badania empiryczne oraz symulacyjne ruchu na skrzyżowaniu. Pomiaru na rzeczywistych poligonach przeprowadzono techniką ręczną, filmową i w niewielkim zakresie telewizyjną. Dla opracowania rezultatów pomiarów wykorzystano aparat rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. Znaczną część obliczeń w tym zakresie wykonano przy zastosowaniu ETO.

Najistotniejsze działania badawcze objęły:

Określenie wskaźników umożliwiających opis wahań ruchu

Dla scharakteryzowania zmienności natężenia ruchu w czasie w wartościach liczbowych zdefiniowano różne wskaźniki odnoszące się do szeregu czasowego natężenia ruchu. W wyniku przeprowadzonych pomiarów natężeń ruchu /z interwałami rejestracji 1 i 5 min./ i wykonanych obliczeń określono wartości poszczególnych wskaźników odnoszących się do różnych potoków ruchu. Umożliwiło to przeprowa-

dzenie regresyjnej analizy zależności wartości poszczególnych wskaźników od średniego natężenia ruchu jak również współzależności między nimi. Ocena ustalonych zależności jak również praktycznej przydatności wskaźników, umożliwiła wybór wskaźników najbardziej odpowiednich do charakterystyki natężenia ruchu w okresie obserwacji. Są to: średnia liczba pojazdów \bar{q} w interwale rejestracji t_r , oraz współczynnik zmienności ξ . W pewnych przypadkach przydatnym również może być względny zakres wahań unormowanych WZWU.

Określenie interwałów pomiarowych i typowych profili zmienności natężenia ruchu w czasie

Analiza wielkości interwału, w którym dokonuje się w czasie pomiaru rejestracji liczb pojazdów przejeżdżających przekrój drogi, umożliwiła określenie takiej jego długości, która jest wystarczająco dokładna do oceny tendencji zmian natężenia ruchu w okresie obserwacji, jak również dla odwzorowania potoku ruchu w procesie modelowania numerycznego. Interwał ten wynosi $t_r = 5$ min. Ruch w takim interwale traktowany jest jako stacjonarny, a więc interwał o stałej intensywności strumienia przyjęto $t_{si} = t_r = 5$ min. Wykresy szeregów czasowych natężenia ruchu rejestrowanego w interwałach 5 min., a także obliczone dla nich wskaźniki wahań natężenia, wskazały na istnienie potoków różniących się nieznacznie pod względem zmienności natężenia w czasie. Analiza porównawcza umożliwiła wybór trzech, charakterystycznych dla godzin szczytowych, profili natężenia, które w unormowanej formie przedstawiono na rys. 2.25.

Modelowanie potoku ruchu o zmiennym w czasie natężeniu

Proces zgłoszeń pojazdów, realizowany w przekroju drogi znajdującym się poza zasięgiem wpływu kolejki, jaka ustawia się na wlo-

cie przed linią stop, rozwiązano jako proces stochastyczny, stacjonarny w przedziałach. Rozkład odstępów czasowych między pojazdami w potoku, w poszczególnych przedziałach t_{si} , przyjęto jako wykładniczy przesunięty. Opracowane procedury przewidują generowanie zgłoszeń w przypadku krótkich interwałów $t_{si} \leq 1$ min. - z dokładnym określeniem średniej intensywności wyjściowej strumienia - jak i uproszczony sposób generowania przy dłuższych interwałach /np. $t_{si} = 5$ min./ . W danych wejściowych do generowania potoku niestacjonarnego niezbędne jest zadanie; natężenia ruchu w $[P/h]$, minimalnego odstępu czasowego między pojazdami w $[s]$ oraz relatywnych wartości intensywności strumienia w kolejnych interwałach t_{si} okresu obserwacji T_0 . Specjalna procedura umożliwia obliczanie wszystkich wskaźników charakteryzujących wahania natężenia wygenerowanego potoku ruchu.

Dokonana ocena wygenerowanych potoków ruchu /wykresów zmienności natężenia oraz wskaźników charakteryzujących jego wahania/ wykazała, że uzyskane z generatora linie przebiegu natężeń mogą być uznane za dobrą reprezentację zmian natężenia rzeczywistych potoków. Wykazano również, że dla modelowego odwzorowania wahań ruchu występujących w godzinach szczytowych mniej istotny jest dokładny opis rozkładu odstępów czasowych w potoku - pierwszoplanowe znaczenie posiada wyjściowy profil natężenia ruchu.

Identyfikacja procesów ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją

W wyniku przeprowadzonych badań empirycznych oraz analiz statystycznych zidentyfikowano szereg zmiennych losowych wchodzących w zakres złożonego procesu stochastycznego, jakim jest ruch na skrzyżowaniu. W szczególności określono:

- probabilistyczną charakterystykę kolejności występowania rodzajów pojazdów w potoku,

- rozkład czasu przejazdu odcinka wlotowego i jego parametry, przy uwzględnieniu wpływu stanu sygnałów oraz rodzaju pojazdu,
- długości stanowisk pojazdów w kolejce oraz ich rozkład,
- czasy ruszenia pojazdów na poszczególnych pozycjach w kolejce po zapaleniu się sygnału zielonego,
- odstępy czasowe na linii stop między pojazdami z rozładowującej się kolejki.

Określenie tych parametrów losowych dało racjonalne podstawy do zbudowania modelu ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją o stałym programie. W modelu szczególny nacisk położono na dokładne odwzorowanie tworzenia się i rozładowania kolejki, bowiem od adekwatności tych procesów zależy dokładność szacowania mierników oceny efektywności sterowania. Duża szczegółowość odwzorowania procesów ruchu umożliwi ponadto ocenę istotności uproszczeń stosowanych przy modelowaniu skrzyżowania. Dokonana, na bazie rzeczywistych danych, weryfikacja opracowanego modelu, pozwoliła uznać model ten za poprawny.

Właściwe badania wpływu wahań ruchu na efektywność sterowania

Badania te wykonano wykorzystując opracowany model symulacyjny skrzyżowania. Wyniki przebiegów symulacyjnych umożliwiły opracowanie zależności podstawowych mierników oceny efektywności sterowania od natężenia ruchu i udziału sygnału zielonego efektywnego w cyklu lub od stopnia nasycenia wlotu. Zależności takie określono dla każdego z przyjętych, na podstawie badań empirycznych, profili natężenia - reprezentujących ruch w godzinach szczytu - oraz dodatkowo dla ruchu stacjonarnego.

Znaczne rozbieżności rezultatów badań symulacyjnych uzyskanych przy uwzględnieniu rzeczywistych wahań ruchu oraz przy założeniu stacjonarnego potoku ruchu, obserwowane w zakresie wyższych wartości stopni nasycenia wlotu, wskazują na istotny wpływ wahań

ruchu na efektywność sterowania wyrażoną przez takie mierniki jak: straty czasu, kolejki, zatrzymania itp. Nieuwzględnienie wahań ruchu prowadzi do znacznego zniżenia wartości wszystkich rozważanych mierników sprawności funkcjonowania skrzyżowania dla stopnia nasycenia wlotu $\bar{x} > 0,7$. Przy wzroście \bar{x} do wartości 0,9 różnice są już kilkakrotne.

Analiza opracowanych zależności podstawowych mierników oceny efektywności sterowania od średniego stopnia nasycenia wlotu \bar{x} , pozwoliła na podanie praktycznych wskazań odnośnie wymiarowania jak i eksploatacji skrzyżowań.

Ocena teoretycznych formuł dla szacowania strat czasu

W pracy przytoczono najistotniejsze z teoretycznych formuł umożliwiających szacowanie strat czasu na skrzyżowaniu z sygnalizacją o stałym programie, dokonując równocześnie ich analizy porównawczej. Prawie wszystkie z rozważanych wzorów na straty czasu wyprowadzone zostały przy założeniu stacjonarności ruchu, przy czym niektórzy autorzy, dla lepszego oddania rzeczywistego charakteru ruchu, wprowadzili w nich wskaźnik I. Dla wykazania przydatności tych wzorów do obliczania strat czasu w sytuacji, gdy potoki na skrzyżowaniu są niestacjonarne, przeprowadzono porównanie rezultatów uzyskanych przy ich zastosowaniu z wynikami przebiegów symulacyjnych przeprowadzonych przy uwzględnieniu wahań ruchu jak i przy założeniu jego niezmienności w czasie. Przeprowadzona analiza wykazała, że wzory te mogą być stosowane przy małych i średnich natężeniach ruchu $\bar{x} < 0,7$, kiedy to wpływ wahań ruchu na sprawność funkcjonowania skrzyżowania jest niewielki. Porównanie strat czasu obliczonych z poszczególnych wzorów z wynikami symulacji, przeprowadzonej przy założeniu stacjonarnego ruchu stanowiło dodatkową weryfikację opracowanego

modelu symulacyjnego. Potwierdziła ona poprawność modelu.

Do najważniejszych osiągnięć teoretycznych niniejszej pracy można zaliczyć:

- zbadanie krótkoterminowych wahań ruchu i udowodnienie tezy o istotnym wpływie niestacjonarności ruchu na efektywność sterowania /w zakresie nasycenia wlotu $\bar{x} > 0,7/$,
- opracowanie modeli wahań ruchu,
- opracowanie metody uwzględniania niestacjonarności ruchu w badaniach symulacyjnych,
- określenie probabilistycznej charakterystyki struktury rodzajowej potoku i sposobu odwzorowania jej w modelu symulacyjnym.

Praktyczne znaczenie ma określenie:

- interwału rejestracji zmian natężenia ruchu umożliwiających prawidłową ocenę efektywności ruchu,
- przeciętnego czasokresu ruchu szczytowego, oraz
- wskazań odnośnie wymiarowania /przepustowość praktyczna/ i eksploatacji skrzyżowań /dopuszczalne nasycenie wlotu/.

Bardzo przydatnym dla celów praktycznych jest również opracowany program EMPIR na EMC, który umożliwia obliczanie w szybki sposób wskaźników charakteryzujących zmienność ruchu w czasie, wizualną ocenę zarejestrowanego w trakcie pomiaru szeregu czasowego natężenia ruchu, a także określanie zasadniczych parametrów potoku /jak średnie natężenie i relatywne intensywności w przedziałach czasowych/ umożliwiającą odtworzenie go w modelu symulacyjnym.

Nowe w warunkach krajowych podejście do modelowego odwzorowania struktury rodzajowej w potoku ruchu, pozwala na uzyskiwanie nie tylko żądanego udziału uc samochodów ciężarowych w potoku ale także pokrywającej się z rzeczywistością kolejności pojazdów.

Określenie w badaniach empirycznych najistotniejszych dla modelowania ruchu na skrzyżowaniu parametrów o charakterze losowym, umożliwiło w miarę szczegółową identyfikację procesów ruchu w mo-

delu symulacyjnym skrzyżowania. Wyniki symulacji pozwoliły zaś na ustalenie zależności funkcyjnych, podstawowych mierników oceny efektywności sterowania od parametrów ruchu i sterowania. Zależności te przedstawiono w postaci wykresów, pozwalających na ocenę wpływu wahań ruchu na efektywność sterowania, jak również praktyczne określanie w indywidualnych przypadkach efektywności sterowania, wyrażonej przez straty czasu, kolejki, przeciążenia cykli itp. Zakres praktycznego wykorzystania tych zależności ogranicza opracowanie ich tylko dla jednej długości cyklu tj. $T = 60$ s. W sytuacji, gdy rzeczywiste warunki ruchu wykraczają poza zakres warunków branych pod uwagę przy określaniu prezentowanych w pracy zależności, można posłużyć się programem symulacyjnym SYGNAL-2, umożliwiającym określanie zarówno przeciętnych wartości mierników sprawności skrzyżowania oraz parametrów ich rozkładów, jak i zmienności w cyklach okresu obserwacji.

7.2. Wnioski końcowe

Zasadnicze wnioski, wynikające z przeprowadzonych w niniejszej pracy badań i analiz, dają się podzielić na dwie grupy;

- dotyczącą opisu potoku ruchu w zakresie wahań jego natężenia oraz parametrów umożliwiających numeryczne modelowanie, oraz
- odnoszącą się do oceny wpływu wahań ruchu na efektywność sterowania jego przebiegiem na skrzyżowaniu z sygnalizacją o stałym programie.

Wnioski dotyczące charakterystyki potoku ruchu

1. Probabilistyczny opis potoku ruchu winien uwzględniać niestacjonarność procesu przy równoczesnym uproszczeniu opisu odstępów czasowych między pojazdami w potoku. Poszukiwanie skomplikowanych postaci rozkładów opisujących dokładnie rzeczywiste rozkłady odstępów czasowych w potokach jest bardzo

trudne i niecelowe, z uwagi na bardzo mały wpływ dokładności opisu na szacowane metodą symulacyjną mierniki sprawności skrzyżowania.

2. Występujące na wlotach skrzyżowania wahania natężenia ruchu rejestrowanego w krótkich interwałach czasu można skwantyfikować stosując zaproponowane wskaźniki, z których najważniejsze to współczynnik zmienności i względny zakres wahań unormowanych. Jako reprezentatywne wskaźniki, charakteryzujące wielkość natężenia ruchu oraz jego zmienność w okresie obserwacji, wytypowano średnią liczbę pojazdów w interwale rejestracji \bar{q} oraz współczynnik zmienności ε w okresie obserwacji.
3. Analiza wskaźników charakteryzujących wahania ruchu w poszczególnych godzinach okresu szczytowego wskazuje, że niejednokrotnie ruch w godzinach sąsiadujących z zegarową godziną szczytu podlega większym wahanom niż w godzinie o maksymalnym natężeniu. Wobec niewielkiej zazwyczaj różnicy natężenia w tych godzinach, przy projektowaniu czy ocenie sprawności sygnalizacji, należy brać pod uwagę ruch odnoszący się do okresu 2-ech lub 3-ech godzin szczytowych. Wskazuje to równocześnie na potrzebę prowadzenia odpowiednio długich pomiarów natężenia ruchu na skrzyżowaniach.
4. Interwał rejestracji $t_r = 5$ min. jest optymalny dla oceny tendencji zmian natężenia w okresie obserwacji, jak również w celu identyfikacji ruchu w procesie modelowania numerycznego. W interwale takim proces dopływu ruchu może być uznany za stacjonarny.
5. Dla opisu zmienności natężenia ruchu w czasie, a tym samym i jego modelowania, nie wystarczy znajomość wartości wskaźni-

ków charakteryzujących wahania natężenia, niezbędny jest profil natężenia ruchu w okresie obserwacji. Dla rzeczywistych potoków ruchu występujących w godzinach szczytu wyznaczyć można pewne typowe profile natężenia ruchu. W niniejszej pracy określono trzy unormowane profile charakterystyczne dla ruchu szczytowego, których podstawę stanowi okres 90 min.

6. Badania w zakresie struktury rodzajowej potoku wykazały brak typowych form zmienności udziału samochodów ciężarowych $u_c/t/$ w okresach ruchu szczytowego oraz brak związku między linią zmienności $u_c/t/$ i $q/t/$. Określone na drodze empirycznej prawdopodobieństwa warunkowe kolejności występowania rozważanych dwóch rodzajów pojazdów w potoku umożliwiają dokładne odwzorowanie modelowe struktury rodzajowej potoku w szerszym zakresie niż miało to miejsce w dotychczasowych modelach ruchu.
7. Przyjęta w "Wytycznych projektowania ulic", przy projektowaniu stref akumulacji pojazdów, średnia długość stanowiska pojazdu w kolejce 5,6 m jest za mała. Pomiarzy wykazały, że długość ta wynosi 6,1 m dla samochodu osobowego oraz 10,9 m dla samochodu ciężarowego. Wyniki te wskazują na konieczność dokonania poprawek w najnowszych wytycznych.
8. Odstępy czasowe między pojazdami z kolejki na linii stop są zmienną losową, w związku z czym przepustowość wlotu nie jest wartością stałą, będzie się zmieniać w pewnym zakresie. Wyznaczone na skrzyżowaniach w Krakowie odstępy czasowe między pojazdami znajdującymi się na dalszych pozycjach w kolejce wynoszą; 2,3 s w przypadku s.o. i 3,5 s w przypadku s.c.
9. Porównanie czasów obsługi samochodów osobowych i ciężarowych, jak również długości stanowisk pojazdów w kolejce na wlocie

skrzyżowania pozwoliło na ustalenie współczynnika ekwiwalentnego dla samochodów ciężarowych. Według obu kryteriów wynosi on $e_0 = 1,8$.

Wnioski dotyczące oceny wpływu wahań ruchu na efektywność sterowania

1. Opracowany model symulacyjny ruchu na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją o stałym programie stanowi dogodnie narzędzie do badania efektywności sterowania w przypadku niestacjonarnych potoków ruchu. Statystyczne opracowanie wyników symulacji pozwala na ocenę rozkładów mierników efektywności sterowania. W odniesieniu do niestacjonarnych potoków ruchu istotne jest nie tylko określenie przeciętnych wartości mierników, ale ich zmienności w czasie i rozkładów.
2. Dokonując porównania zależności strat czasu \bar{d} , kolejek \bar{K} oraz \bar{K}_k i zatrzymań \bar{Z} od stopnia nasycenia wlotu \bar{x} , przy założeniu potoków niestacjonarnych i stacjonarnego, stwierdzono wyraźny wpływ wahań ruchu na wartości tych podstawowych mierników efektywności sterowania w zakresie $\bar{x} > 0,7$. Nieuwzględnienie wahań ruchu w tym zakresie nasycenia wlotu sprawia, że oszacowane wartości mierników sprawności skrzyżowania są znacznie zaniżone w stosunku do rzeczywistych. A zatem efektywność sterowania uznana na tej podstawie za zadowalającą w rzeczywistości może być już nie do przyjęcia.
3. Przy małych wartościach stopnia nasycenia wlotu $\bar{x} < 0,5$ losowość dopływu jak również jego niestacjonarność mają drugorzędne znaczenie. W tym zakresie nasycenia wlotu dopływ może być traktowany jako ciągły i stały a uzyskane przy tym uproszczeniu straty czasu nie odbiegają od wyznaczonych przy uwzględ-

nieniu dokładnej reprezentacji potoku.

4. Tempo powstawania szczytu natężenia ruchu i jego zaniku, w przypadku unormowanych profili natężenia ruchu o identycznym rozstępie wartości natężenia, nie ma istotnego wpływu na efektywność sterowania.
5. Niekorzystne oddziaływanie wahań ruchu na efektywność sterowania wskazuje na to, że powinno się unikać nasycenia wlotu wyższego niż $\bar{x} = 0,75$. Powyżej tej wartości warunki ruchu na skrzyżowaniu bardzo szybko się pogarszają.
6. Poprzedni wniosek umożliwia podanie praktycznego zalecenia projektowego: program sygnalizacji przeznaczony do eksploatacji w godzinach ruchu szczytowego należy projektować przyjmując przepustowość praktyczną o 25% niższą od przepustowości maksymalnej $/C_{pr} = 0,75 \cdot C/$.
7. Kolejki na końcu sygnału zielonego w cyklach, w okresie ruchu szczytowego zaczynają się pojawiać przy nasyceniu $\bar{x} \cong 0,7$. Jeżeli średni stopień nasycenia przekroczy wartości $\bar{x} = 0,91 + 0,96$ odpowiednio dla $\lambda = 0,33 + 0,66$, kolejka będąca efektem przeciążenia w okresie $T_0 = 90$ min. przenosi się poza ten okres.
8. W przypadku profilu natężenia charakterystycznego dla okresu szczytowego, w momencie osiągnięcia przez natężenie /odniesione do okresu godziny/ wartości przepustowości maksymalnej $/\bar{x} = 1,0/$, zatrzymaniu podlega średnio ok. 90% pojazdów w poszczególnych cyklach. Dla wartości $\bar{x} = 0,75$, wskazanej jako wartość graniczna nasycenia wlotu /wniosek 5/, $\bar{z} \cong 65\%$.

9. Teoretyczne formuły strat czasu wyprowadzone przez różnych badaczy przy założeniu stacjonarności ruchu można stosować również w przypadku ruchu niestacjonarnego, lecz w ograniczonym zakresie - dla $\bar{x} < 0,7$.
10. Charakterystyka dopływającego potoku, w teoretycznych formułach strat czasu, za pomocą współczynnika I, w przypadku niestacjonarnych potoków, nie umożliwia dokładnego szacowania strat czasu.
11. Dobry szacunek strat czasu można uzyskać dokonując obliczeń wg metody Catlinga, lecz procedura obliczeniowa jest bardzo pracochłonna.

7.3. Kierunki dalszych prac

Obszerność podjętej tematyki, wynikająca ze znacznej ilości parametrów determinujących przebieg ruchu na skrzyżowaniu z jednej strony oraz ograniczony zakres pracy z drugiej strony sprawiły, że praca niniejsza nie wyczerpuje całości problematyki związanej z efektywnością sterowania ruchem na skrzyżowaniu w sytuacji, gdy dopływające potoki są niestacjonarne. Pozostaje do zbadania szereg interesujących i ważnych dla teorii i praktyki zagadnień. W szczególności wskazać można następujące kierunki prac:

1. Dalsze badania z wykorzystaniem automatycznej aparatury dla weryfikacji opracowanych modeli i rozbudowy programu SYGNAL-2.
2. Zweryfikowanie określonych w pracy związków występujących między wskaźnikami określającymi zmienność ruchu w czasie, na bazie szerokiego zestawu danych z pomiarów, z uwzględnieniem wpływu czynników determinujących wahania ruchu.

3. Wykorzystanie opracowanego instrumentu badawczego dla kwantyfikacji warunków ruchu /poziomy swobody ruchu/ na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną.
4. Określenie poprawności metod projektowania sygnalizacji stałoczasowej i zasad jej eksploatacji wobec stwierdzonego wyraźnego wpływu wahań ruchu na efektywność sterowania i ewentualna weryfikacja procedur obliczeniowych.
5. Opracowanie procedury obliczania globalnych strat czasu przy sterowaniu sygnalizacją z uwzględnieniem wahań ruchu w dłuższym okresie czasu, np. w ciągu roku.
6. Zastosowanie modelu niestacjonarnego ruchu na skrzyżowaniu do badania funkcjonowania skrzyżowań z sygnalizacją aktualizowaną a także do badania sprawności skrzyżowań bez sygnalizacji.

B I B L I O G R A F I A

- [1] Allsop R.E.: Effects of errors in lost times on the delay to traffic at an isolated road junction controlled by fixed-time traffic signals. *Transportation Research*, vol.7, 1973.
- [2] Allsop R.E.: Festzeitsteuerung von Lichtsignalanlagen. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 21, 1980.
- [3] Allsop R.E.: Sensitivity of delay at a fixed-time traffic signal to small errors in the observations used for calculating the signal settings. Elsevier, New York 1972.
- [4] Androsch W.: Untersuchungen zur Signalfolge an Knotenpunkten. *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, Heft 200, Bonn - Bad Godesberg 1976.
- [5] Bång K.L.: Optimal control of isolated traffic signals. *Traffic Eng and Control*, July 1976.
- [6] Benjamin J.R., Cornell C.A.: Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów. WNT, Warszawa 1977.
- [7] Bly P.H.: A computer simulation of an intersection with a bus lane. *RRL Report*, LR 570, 1973.
- [8] Bobrowski D.: Probabilistyka w zastosowaniach technicznych. WNT, Warszawa 1980.
- [9] Brandt S.: Metody statystyczne i obliczeniowe analizy danych. PWN, Warszawa 1974.
- [10] Branston D.: A comparison of observed and estimated queue lengths at oversaturated traffic signals. *Traffic Eng and Control*, July 1978.
- [11] Breitenstein J.: Analyse und Weiterverfolgung gemessener Zeitreihen als Entscheidungsgrundlage für

Verkehrsbeeinflussungsmassnahmen. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 247, Bonn - Bad Godesberg 1978.

- [12] Briggs T.: Time headways on crossing the stop-line after queueing at traffic lights. Traffic Eng and Control, May 1977.
- [13] Brilon W., Brannolte U.: Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf zweispurigen Strassen mit Gegenverkehr. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 239, Köln 1977.
- [14] Bronsztejn I.N., Siemiendiajew K.A.: Matematyka, poradnik encyklopedyczny. PWN, Warszawa 1976.
- [15] Catling I.: A time - dependent approach to junction delays. Traffic Eng and Control, November 1977.
- [16] Chodur J., Tracz M., Gondek S. i inni: Zastosowanie symulacji do wypracowania metod sterowania ruchem w arteriach wlotowych. Kraków 1979 /praca niepublikowana, wykonana na zlecenie CZDP/.
- [17] Datka S., Tracz M.: Przewodnik do ćwiczeń z inżynierii ruchu. Wyd. Politechniki Krakowskiej 1974.
- [18] Dubowicka A., Tracz M.: Symulacja procesów ruchu drogowego na EMC. Drogownictwo 10, 1976.
- [19] Ezekiel M., Fox K.A.: Metody analiza korrelacji i regresji. Izdatielstwo "Statistika", Moskwa 1966.
- [20] Federal Highway Administration: Vehicle detector placement for high - speed, isolated traffic - actuated intersection control. Vol.2 Manual of theory and practice, Washington, May 1977.
- [21] Gleue A.W.: Grundsätze und Signalprogrammberechnung. Strassenverkehrstechnik, Heft 2, 1977.

- [22] Glück K., Schelzke R.: Startzeit und Zeitlücken an signalgesteuerten Knoten. Strasse und Autobahn 8, 1960.
- [23] Gondek S., Tracz M.: Badanie sprawności skrzyżowań z pierwszeństwem przejazdu leżących w strefie oddziaływań sąsiednich skrzyżowań z sygnalizacją. Symposium nt.: Identyfikacja i sterowanie ruchem drogowym. Kraków 1979.
- [24] Gordon G.: Symulacja systemów. WNT, Warszawa 1974.
- [25] Grahl S.: Regelungsposten oder Lichtsignalanlage? Die Strasse, Heft 5, 1980.
- [26] Greń J.: Statystyka matematyczna, modele i zadania. PWN, Warszawa 1975.
- [27] Hansson A.: SIGSIM: a simulation model for signalized intersections. International symposium on traffic control systems, Berkeley, California, August 1979.
- [28] Hellwig Z.: Elementy rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. PWN, Warszawa 1975.
- [29] Hobbs F.D., Richardson B.D.: Problemy inżynierii ruchu. WKE, Warszawa 1971.
- [30] Hutchinson T.P.: Delay at a fixed time traffic signal - II: numerical comparisons of some theoretical expressions. Transportation science, August 1972.
- [31] Inose H., Hamada T.: Road traffic control, University of Tokyo Press, 1975.
- [32] Janiczak B., Karcz T.: Analiza warunków ruchu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną stałoprogramową w okresie doby. Praca dyplomowa magisterska, Kraków 1981.
- [33] Kimber R.M., Hollis E.M.: Peak-period traffic delays at road junctions and other bottlenecks. Traffic Eng and Control, October 1978.

- [34] Kimber R.M., Hollis E.M.: Traffic queues and delays at road junctions. TRRL Report, LR 909, 1979.
- [35] Klijnhout J.J.: A digital simulation model for single intersections with traffic lights. Traffic Eng and Control, August 1971.
- [36] Kockelke W.: Reaktions- und Bremsverhalten an Lichtsignalanlagen. Strassenverkehrstechnik, Heft 1, 1980.
- [37] Kroman T.: Symulacja ruchu potoku pojazdów: - skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Biblioteka Drogownictwa, WKE, Warszawa 1980.
- [38] Krystek R.: Analiza rozkładów odstępów czasu między pojazdami. Drogownictwo 7-8, 1972.
- [39] Krystek R.: Charakterystyka ruchu potoku pojazdów. Drogownictwo 10, 1969.
- [40] Krystek R.: Natężenie ruchu jako podstawowe kryterium projektowania dróg i ulic. Drogownictwo 6, 1969.
- [41] Krystek R.: Symulacja ruchu potoku pojazdów: - wprowadzenie do symulacji systemów. Biblioteka Drogownictwa, WKE, Warszawa 1980.
- [42] Krystek R.: Syntetyczny wskaźnik jakości ruchu ulicznego jako kryterium sterowania. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Budownictwo Lądowe nr 34, 1980.
- [43] Krystek R., Sosin J., Wrześniowski Z.: Badania ruchu na skrzyżowaniach z wyspą centralną. Drogownictwo 5, 1974.
- [44] Kurzak H.: Steuerung und Bewertung verkehrsabhängiger Signalanlagen im Stadtstrassennetz. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 172, Bonn 1974.
- [45] Leibbrand K.: Gewagte Vereinfachungen - die Schwäche vieler Verkehrsmodelle. Strassenverkehrstechnik, Heft 4, 1979.

- [46] Lewinowski Cz.: Matematyczna analiza wyników badań przeprowadzonych w laboratoriach drogowych. Prace Centralnego Ośrodka Badań i Rozwoju Techniki Drogowej, 4, 1970, WKŁ, Warszawa.
- [47] Majcherowa G. i inni: Podstawy obliczeń statystycznych na maszynach cyfrowych. Politechnika Krakowska, Kraków 1978.
- [48] Martin F.F.: Wstęp do modelowania cyfrowego. PWN, Warszawa 1976.
- [49] Mensebach W.: Podstawy inżynierii ruchu drogowego. WKŁ, Warszawa 1978.
- [50] Michel E.: Verkehrsmessungen im Bereich eines städtischen Strassenknotenpunktes. Die Strasse, Heft 9, 1973.
- [51] Nikisch J.A.: Predykcje natężenia ruchu. II Konferencja Instytutu Transportu Politechniki Warszawskiej, 1978.
- [52] Nikisch J.A.: Predykcja wybranych parametrów ruchu ulicznego. Praca doktorska, Instytut Automatyki Politechniki Poznańskiej, Poznań 1981.
- [53] Otnes R.K., Enockson L.: Analiza numeryczna szeregów czasowych. WNT, Warszawa 1978.
- [54] Papoulis A.: Prawdopodobieństwo, zmienne losowe i procesy stochastyczne. WNT, Warszawa 1972.
- [55] Pavel G.: Planen von festzeitgesteuerten Signalanlagen an Einzelknotenpunkten. Strassenverkehrstechnik, Heft 1, 1969.
- [56] Pavel G.: Planen von Signalanlagen für den Strassenverkehr. Kirschbaum Verlag, Bonn - Bad Godesberg, 1974.

- [57] Pitzinger P., Sulzer E.R.: Lichtsignalanlagen für den Strassenverkehr. Bauverlag GMBH, Viesbaden und Berlin 1968.
- [58] PN-74/N-01051: Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna - nazwy, określenia i symbole. Wydawnictwa normalizacyjne, Warszawa 1975.
- [59] Retzko H.G., Schütze P.: Zur Berechnung von Überlastungswahrscheinlichkeit und Wartezeit an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen. Strassenverkehrstechnik, Heft 2, 1975.
- [60] Retzko H.G., Tonke F.: Delays at priority intersections under non-stationary traffic flow conditions. Traffic Eng and Control, Dezember 1979.
- [61] Rumsey A.F., Hartley M.G.: Simulation of a pair of intersections. Traffic Eng and Control, March/April 1972.
- [62] Sagi G.S., Campbell L.R.: Vehicle delay at signalized intersections. Traffic Engineering, February 1969.
- [63] Schmaabel W.: Wartezeitoptimierung bei festzeitgesteuerten Strassenknoten. Die Strasse, Heft 1, 1980.
- [64] Schütze P.: Graphische Ermittlung von Überlastungswahrscheinlichkeit und Auslastungsfaktor für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage. Strassenverkehrstechnik, Heft 6, 1977.
- [65] Smith E.: Design capacity for urban roads. Traffic Eng and Control, August 1970.
- [66] Sosin J.: Algorytmy predykcji natężenia ruchu. Sympozjum nt.: Identyfikacja i sterowanie ruchem drogowym, Kraków 1979.

- [67] Sosin J.: Analiza strat czasu i optymalizacja długości cyklu sygnalizacyjnego na skrzyżowaniach izolowanych z sygnalizacją o stałym programie. Praca doktorska, Instytut Budownictwa Lądowego Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1975.
- [68] Sosin J.A.: Delays at intersections controlled by fixed-cycle traffic signals. Traffic Eng and Control, August/September 1980.
- [69] Sosin J.: Model symulacyjny ruchu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Drogownictwo 1, 1977.
- [70] Sosin J.: Straty czasu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną o stałym programie. Drogownictwo 12, 1974.
- [71] Stamm J.M.: Untersuchungen zur Festlegung von Dimensionierungsbelastungen. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 218, 1976.
- [72] Suchorzewski W.: Wybrane zagadnienia inżynierii ruchu. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej 1977.
- [73] Szydlowski H. i inni: Teoria pomiarów. PWN, Warszawa 1974.
- [74] Tafel H.J., Kumm W.: Entwicklung eines automatischen optimalen Verkehrsbeeinflussungssystems auf Schnellstrassen. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 241, Bonn - Bad Godesberg 1977.
- [75] Theis T.J.: Untersuchung der Raum-Zeit-Beziehungen der werktäglichen Verkehrsstärken im Stadtbereich und Stadtnahen Bereich. Strassenverkehrstechnik, Heft 1, 1977.
- [76] Tracz M.: Model symulacji wlotu skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. II Konferencja Instytutu Transportu Politechniki Warszawskiej 1978.

- [77] Tracz M.: Ocena sprawności skrzyżowań drogowych metodą symulacji. Politechnika Krakowska Budownictwo Lądowe, Zeszyt Naukowy nr 9, Kraków 1979.
- [78] Tracz M.: Wahania natężeń ruchu na sieci ulicznej Krakowa. Czasopismo Techniczne 6M, PWN, Warszawa-Kraków, 1972.
- [79] Volk W.: Statystyka stosowana dla inżynierów. WNT, Warszawa 1973.
- [80] Webster F.V., Cobbe B.M.: Traffic signals. HMSO, London 1966.
- [81] Windolph J., Berthold J.: Anfahrzeitlücken und Anfahrzeitbedarf an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten. Die Strasse, Heft 12, 1969.
- [82] Yagar S.: Minimizing delays for transient demands with application to signalized road junctions. Transportation Research, vol.11, 1977.
- [83] Ziobroń W.: Metody statystyczne. Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, Kraków 1976.
- [84] Zitek F.: Stracony czas - elementy teorii obsługi masowej. PWN, Warszawa 1974.

