

Na prawach rękopisu

**INSTYTUT INŻYNIERII LĄDOWEJ  
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ**

**Raport serii PRE nr 41 / 99**

**PRZEPUSTOWOŚĆ  
ELEMENTÓW SIECI  
KOMUNIKACJI ZBIOROWEJ**

**Maciej Kruszyna**

**Promotor: Dr hab. inż. Antoni Szydło, profesor Politechniki Wrocławskiej**

**Słowa kluczowe:**

**badania ruchu,**

**modelowanie ruchu,**

**miejska komunikacja zbiorowa.**



**Praca doktorska**

**WROCŁAW 1999**

## SPIS TREŚCI:

|          |                                                                                                                                                 |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>WSTĘP .....</b>                                                                                                                              | <b>2</b>  |
| 1.1      | UZASADNIENIE CELOWOŚCI BADAŃ .....                                                                                                              | 2         |
| 1.2      | STAN OBECNY I TENDENCJE ROZWOJOWE KOMUNIKACJI ZBIOROWEJ.....                                                                                    | 3         |
| 1.3      | TEZA I CEL PRACY .....                                                                                                                          | 6         |
| 1.4      | ZAKRES PRACY .....                                                                                                                              | 6         |
| 1.5      | WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ STOSOWANYCH W PRACY.....                                                                                            | 8         |
| <b>2</b> | <b>PRZEGLĄD MODELI RUCHU POJAZDÓW I OCENA ICH PRZYDATNOŚCI DO<br/>OKREŚLENIA PRZEPUSTOWOŚCI ELEMENTÓW SIECI KOMUNIKACJI<br/>ZBIOROWEJ .....</b> | <b>11</b> |
| 2.1      | KLASYFIKACJA MODELI .....                                                                                                                       | 11        |
| 2.2      | MODELOWANIE RUCHU W SIECI .....                                                                                                                 | 12        |
| 2.3      | MODELOWANIE RUCHU OGÓLNEGO W ELEMENTACH SIECI .....                                                                                             | 13        |
| 2.4      | MODELOWANIE RUCHU POJAZDÓW KOMUNIKACJI ZBIOROWEJ W ELEMENTACH SIECI .....                                                                       | 16        |
| 2.5      | PODSUMOWANIE .....                                                                                                                              | 18        |
| <b>3</b> | <b>POMIARY ZAKRESU ZMIENNOŚCI PARAMETRÓW OPISUJĄCYCH RUCH W<br/>MODELOWANYM FRAGMENTE SIECI .....</b>                                           | <b>20</b> |
| 3.1      | PARAMETRY OKREŚLAJĄCE STRUMIEŃ POJAZDÓW DOJEŻDŻAJĄCYCH DO SKRZYŻOWANIA .....                                                                    | 20        |
| 3.1.1    | <i>Odstępy między pojazdami na wlotach skrzyżowania .....</i>                                                                                   | <i>20</i> |
| 3.1.2    | <i>Długość sygnału zielonego.....</i>                                                                                                           | <i>24</i> |
| 3.1.3    | <i>Regularność wyboru kanału docelowego.....</i>                                                                                                | <i>25</i> |
| 3.2      | PARAMETRY OKREŚLAJĄCE PRZEJAZD POJAZDÓW PRZEZ ODCINEK MIĘDZYWĘZŁOWY .....                                                                       | 27        |
| 3.2.1    | <i>Prędkość pojazdów i jej zróżnicowanie.....</i>                                                                                               | <i>27</i> |
| 3.2.2    | <i>Czas wymiany pasażerów na przystanku.....</i>                                                                                                | <i>30</i> |
| <b>4</b> | <b>DETERMINISTYCZNY MODEL RUCHU W SIECI KOMUNIKACJI ZBIOROWEJ DLA<br/>ŚRÓDMIEŚĆ DUŻYCH MIAST.....</b>                                           | <b>34</b> |
| 4.1      | MODEL CHARAKTERYSTYCZNEGO FRAGMENTU SIECI.....                                                                                                  | 34        |
| 4.2      | DETERMINISTYCZNY MODEL RUCHU.....                                                                                                               | 36        |
| 4.3      | STRATY CZASU I PRZEPUSTOWOŚĆ W PRZEKROJACH KRYTYCZNYCH.....                                                                                     | 38        |
| 4.3.1    | <i>Przekrój typu SK.....</i>                                                                                                                    | <i>38</i> |
| 4.3.2    | <i>Przekrój typu PR.....</i>                                                                                                                    | <i>49</i> |
| 4.3.3    | <i>Przekrój typu PS.....</i>                                                                                                                    | <i>51</i> |
| 4.3.4    | <i>Przekrój typu SP.....</i>                                                                                                                    | <i>59</i> |
| <b>5</b> | <b>BADANIA SYMULACYJNE WPŁYWU ZMIENNOŚCI PARAMETRÓW RUCHU NA<br/>PRZEPUSTOWOŚĆ.....</b>                                                         | <b>62</b> |
| 5.1      | IDEA BADAŃ .....                                                                                                                                | 62        |
| 5.2      | OPIS MODELU STOCHASTYCZNEGO .....                                                                                                               | 63        |
| 5.2.1    | <i>Założenia do modelu .....</i>                                                                                                                | <i>63</i> |
| 5.2.2    | <i>Opis zastosowanych generatorów zmiennych losowych.....</i>                                                                                   | <i>66</i> |
| 5.2.3    | <i>Parametry modelu.....</i>                                                                                                                    | <i>68</i> |
| 5.2.4    | <i>Struktura programu.....</i>                                                                                                                  | <i>70</i> |
| 5.3      | WYNIKI BADAŃ.....                                                                                                                               | 76        |
| 5.3.1    | <i>Przekroje typu SK.....</i>                                                                                                                   | <i>76</i> |
| 5.3.2    | <i>Przekroje z przystankiem (PR, PS, SP) .....</i>                                                                                              | <i>83</i> |
| 5.4      | SKORYGOWANE WARTOŚCI PRZEPUSTOWOŚCI.....                                                                                                        | 86        |
| 5.5      | PRZYKŁAD WERYFIKACJI WYNIKÓW BADAŃ.....                                                                                                         | 90        |
| <b>6</b> | <b>PODSUMOWANIE.....</b>                                                                                                                        | <b>93</b> |
| 6.1      | UWAGI OGÓLNE .....                                                                                                                              | 93        |
| 6.2      | KIERUNKI DALESZYCH BADAŃ.....                                                                                                                   | 94        |
| <b>7</b> | <b>LITERATURA .....</b>                                                                                                                         | <b>95</b> |



# 1 WSTĘP

## 1.1 Uzasadnienie celowości badań

Zatłoczenie komunikacyjne miast jest obok zagadnień bezpieczeństwa publicznego największą bolączką współczesnej egzystencji. Problemy transportowe dotyczą większej części populacji generując straty czasu i degradując środowisko. Bezpośrednią przyczyną powstawania utrudnień w ruchu jest wzrost ilości poruszających się samochodów przy niedorozwoju sieci komunikacyjnej, czyli niewystarczającej przepustowości ulic i skrzyżowań, a także przy złym sterowaniu ruchem lub jego braku. Wydawałoby się, że skutecznym sposobem zaradzenia tym dolegliwościom jest rozbudowa infrastruktury: poszerzanie istniejących ulic i budowa nowych, przebudowa skrzyżowań na węzły wielopoziomowe, zwiększanie ilości miejsc postojowych. Doświadczenia zagraniczne przeczą jednak tym obiegowym poglądom [104], [106]. Nie ma możliwości nadążenia z rozbudową infrastruktury za rosnącym ruchem samochodowym. Warto zauważyć, że już sama rozbudowa dróg przyczynia się do intensyfikacji ruchu poprzez oferowanie dogodnych warunków podróży i zniechęcanie do wyboru innych środków transportu. Nowa inwestycja może, paradoksalnie, spowodować jedynie wzrost zasięgu i skali utrudnień ruchowych, co powoduje nacisk na dalszą rozbudowę infrastruktury i powstanie samonakręcającej się spirali.

Kluczowym elementem w kształtowaniu systemów komunikacyjnych miast jest podział zadań przewozowych pomiędzy transport zbiorowy a użytkowników indywidualnych. W krajach Unii Europejskiej przeważa obecnie pogląd o konieczności ograniczenia ruchu samochodowego poprzez ograniczenie przepustowości sieci do wielkości akceptowalnych dla środowiska [100], [104], [106]. Przestrzeń miejska jest zbyt cenna aby marnować ją na urządzenia dla transportu samochodowego [28]. W pracy [17] zawarto analizę skutków nadmiernego wzrostu ruchu samochodowego w Polsce. Jako narzędzia służące zmniejszeniu negatywnych skutków motoryzacji wymienia się [100], [106]: przyjęcie i prowadzenie stanowczej polityki

komunikacyjnej, zmniejszenie potrzeb podróżowania (stymulacja wielofunkcyjnych struktur urbanistycznych, wykorzystanie telematyki, czyli pracy, nauki, handlu bez konieczności podróżowania, za pomocą sieci telefonicznej lub komputerowej), bodźce finansowe (opłaty za przejazd, wzrost ceny benzyny), zakazy parkowania, akcja informacyjno- edukacyjna, **zwiększenie dostępności i efektywności transportu zbiorowego**, zachęcanie do podróży pieszo lub rowerem.

Jak dotąd niewiele można powiedzieć o przepustowości elementów sieci komunikacji zbiorowej: skrzyżowań, przystanków i odcinków międzywęzłowych. W szczególności dotyczy to najnowszych rozwiązań, takich jak wspólny pas ruchu dla tramwajów i autobusów oraz obiektów złożonych, np.: przystanków przesiadkowych. Nie wiadomo jak ruch samochodowy wpływa na przepustowość. Nie jest zbadany wpływ innych czynników zaburzających, co jest szczególnie istotne w przypadku wydzielonego toru ruchu. Nie można określić warunków w jakich decydujący wpływ na przepustowość mają czynniki losowe i odpowiadające im parametry, takie jak: odstępy zgłoszeń, prędkości pojazdów, a kiedy decydują czynniki deterministyczne i odpowiadające im parametry, takie jak: długość cyklu, długości faz, offset. Np. na podstawie badań i obserwacji własnych [64] wysnuć można przypuszczenie, że na przepustowość przystanków silnie wpływa ich sytuowanie względem sygnalizacji świetlnej oraz program tejże sygnalizacji i koordynacja sygnalizacji sąsiednich. Istotny jest fakt, iż w śródmieściach miast, gdzie sterowanie sygnalizacją dotyczy praktycznie wszystkich skrzyżowań, a skrzyżowania te i przystanki są gęsto rozmieszczone, przepustowość przystanków może określać przepustowość całej sieci.

## 1.2 Stan obecny i tendencje rozwojowe komunikacji zbiorowej

W modelu użytecznym dla zagadnień niniejszej pracy uwzględnić należy specyficzne cechy komunikacji zbiorowej. Przeanalizowany zostanie stan obecny oraz tendencje rozwojowe z przestrzeni ostatnich dziesięciu lat z miast Europy Zachodniej oraz najnowsze realizacje i zamierzenia z Polski. Rozważania, a przede wszystkim zbudowany model ograniczone zostaną do opisu sytuacji charakterystycznej dla śródmieść dużych miast o przeciętnej gęstości zabudowy. Za duże uważa się miasta o licznie mieszkańców: 0.5 – 1 mln.

Za główne tendencje występujące już od lat osiemdziesiątych i rzutujące na system komunikacji zbiorowej należy uznać:

- regionalizacja i integracja transportu zbiorowego [57], [90], [91];
- renesans konwencjonalnych środków transportu zbiorowego (autobus i tramwaj) [31];
- rozwój systemów sterowania ruchem [2];
- ewolucja i nowe spojrzenie na termin szybki transport (w szczególności szybki tramwaj) oraz związane z tym nowe podejście do projektowania tras komunikacji zbiorowej [87];

Regionalizacja i integracja transportu zbiorowego oznaczają zwiększenie obszaru oddziaływania miejskiej komunikacji zbiorowej. Podróż może odbywać się na znaczne dystanse (kilkadziesiąt kilometrów) [9], [111] w ramach jednego związku transportowego i na jeden bilet. W Polsce funkcjonuje związek transportowy o znacznym obszarze działania w konurbacji katowickiej [24]. Dla rozważań niniejszej pracy istotna jest możliwość ścisłego połączenia kolei i tramwajów w jeden system wykorzystujący całą infrastrukturę szynową [12], [119].

Pojawienie się tramwajów o niskiej podłodze, cichych i energooszczędnych spowodowało ponowne zainteresowanie tym środkiem transportu. Intensywnie rozbudowuje się i reaktywuje linie tramwajowe w wielu miastach Europy [21], [30], [39], [93], [94], [111]. Wprowadzono także wiele usprawnień w konstrukcji autobusów (niska podłoga, zmniejszenie emisji zanieczyszczeń, zróżnicowanie wielkości taboru) [48]. Spotyka się pojazdy hybrydowe, które mogą korzystać z różnych rodzajów energii [32]. W efekcie konwencjonalne, naziemne środki transportu stały się bardziej atrakcyjne, a w konsekwencji częściej wykorzystywane.

Poprawę płynności ruchu uzyskuje się dzięki wprowadzeniu nowoczesnych metod sterowania ruchem na skrzyżowaniach wraz z detekcją pojazdów komunikacji zbiorowej i bieżącą zmianą programów sygnalizacji oraz zastosowaniu połączenia z wszystkimi pojazdami i możliwości nadzoru oraz sterowania nimi z centrali dyspozytorskiej. Wśród polskich miast we wdrażaniu powyższych metod przoduje obecnie Poznań [49], [50].

Unowocześnienie pojazdów w połączeniu z efektywniejszym sterowaniem ruchem zaowocowało zmianą terminu „szybki tramwaj”. Ponieważ obecnie „szybkość” tramwaju (wysoką prędkość eksploatacyjną) uzyskać można metodami inżynierii ruchu

(poziome wydzielenie z ruchu, priorytety w sygnalizacji), nie są konieczne realizacje związane z wydzieleniem toru na innym poziomie (tunel, wykop, estakada). Decydują w tym wypadku: koszt inwestycji, czas jej realizacji, a także aspekt bliskości komunikacji zbiorowej (odległości od źródeł i celów ruchu). Powszechne staje się wydzielenie z tras komunikacyjnych torów dla komunikacji zbiorowej: torowisk, pasów busowych lub wspólnych pasów autobusowo- tramwajowych. Naziemne trasy komunikacji zbiorowej prowadzone są przez strefy ograniczonego ruchu w obszarach śródmiejskich, często w całkowitej izolacji od ruchu ogólnego. Także w Polsce buduje się obecnie lub planuje takie rozwiązania [26], [49], [52], [63].

Z powyższego przeglądu wynika, że dominującą rolę w systemie transportu zbiorowego dla śródmieść dużych miast mają lub w najbliższym czasie zdobędą naziemne środki transportu: tramwaj i autobus. Postępować będzie ich integracja owocująca prowadzeniem pojazdów po wspólnej trasie co najmniej w obszarze przystanków [30], [61], [62], [67]. Trasy dla tych pojazdów zostaną wyłączone z ruchu ogólnego na całym obszarze. Ograniczona zostanie ilość przejazdów poprzecznych przez trasy. Zaburzenia płynności ruchu występować będą w obszarach skrzyżowań i przystanków.

Ruch pojazdów komunikacji zbiorowej należy analizować jako zawierający pewne cechy ruchu swobodnego (dowolnych pojazdów na wielopasowym odcinku międzywęzłowym) oraz automatycznego (np. dla systemów metra). Z jednej strony potok pojazdów komunikacji zbiorowej jest dość jednorodny (cechuje go mniejsze zróżnicowanie typów pojazdów i ich charakterystyk niż w ruchu ogólnym), porusza się po wydzielonej trasie do której dostęp możliwy jest tylko w miejscach sterowanych sygnalizacją świetlną (występuje mniej zakłóceń ruchu, brak jest pewnych manewrów: wyprzedzania, zmiany pasa ruchu), z drugiej, pojazdy kierowane są przez ludzi, a jazda odbywa się na widoczność (odjazd, przejazd, ruszanie zależą od czynników psychofizycznych). Elementy sterowania ruchem istotnie wpływają na jego charakterystyki, takie jak odstępy między pojazdami, czy straty czasu. Wszystkie te aspekty powinny zostać ujęte w modelu.

### 1.3 Teza i cel pracy

Stosownie do wyznaczonej przepustowości istniejących elementów sieci, takich jak: węzły i odcinki międzywęzłowe oraz usytuowane na nich przystanki, na podstawie znajomości wpływu poszczególnych czynników na przepustowość, określić można maksymalne natężenia ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej, tak aby zachowana została założona płynność ruchu i inne charakteryzujące go parametry. Odwrotnie, projektując poszczególne elementy sieci można ukształtować je stosownie do wymaganych, czy prognozowanych warunków ruchowych, dzięki znajomości przepustowości każdego z elementów i czynników na nią wpływających.

W świetle tak postawionej tezy celem pracy jest opracowanie metody określania przepustowości elementów sieci komunikacji zbiorowej. Analizie podlega odcinek międzywęzłowy z wyseparowanym torem ruchu dla pojazdów komunikacji zbiorowej (wydzielone torowisko, pas busowy lub pas autobusowo- tramwajowy) zamknięty z obu stron skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną. Jest to typowy fragment sieci komunikacyjnej. Poszukiwane są wartości przepustowości maksymalnej oraz warunki (zakres oddziaływania czynników) w jakich możliwe jest jej osiągnięcie. Przepustowość maksymalna oznacza natężenie ruchu teoretycznie możliwe do uzyskania przy optymalnym układzie parametrów charakteryzujących ruch. W praktyce takie natężenia wystąpić mogą jedynie w wyjątkowych miejscach w sieci, np. w punktach węzłowych gdzie dochodzi do przeplatania wielu relacji komunikacyjnych. Zaproponowana metoda bazować ma na modelu ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej odzwierciedlającym specyfikę ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej charakterystyczną dla śródmieść dużych, europejskich miast o liczbie mieszkańców 0.5 – 1 mln. Przedmiotem pracy jest skonstruowanie ww. modelu oraz jego weryfikacja poprzez pomiary w terenie i badania symulacyjne.

### 1.4 Zakres pracy

Niniejszy rozdział jest wstępem do pracy i zawiera: uzasadnienie celowości badań omówienie stanu obecnego i kierunków rozwoju komunikacji zbiorowej w śródmieściach europejskich miast, przedstawienie tezy i celu pracy, jej zawartości oraz wykaz ważniejszych stosowanych oznaczeń.

W rozdziale 2 dokonano przeglądu modeli ruchu pojazdów pod kątem oceny ich przydatności do zagadnienia przepustowości zróżnicowanych elementów sieci drogowej. Omówiono modele sieci oraz jej elementów. Uwzględniono modele deterministyczne i stochastyczne. Szczególny nacisk położono na modelowanie ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej. Pokazano jakich modeli używa się w metodach określania przepustowości. Wytypowano specyficzne cechy jakie powinien uwzględniać model użyteczny do rozwiązania problematyki pracy.

W rozdziale 3 zestawiono wyniki pomiarów zakresu zmienności parametrów opisujących ruch pojazdów komunikacji zbiorowej wykonane we Wrocławiu w latach 1997 – 1999. Dla porównania przytoczono wyniki pomiarów wykonanych w Krakowie, mieście o zbliżonej wielkości i warunkach ruchu. Określono zakres zmienności poszczególnych parametrów oraz warunki w jakich on występuje.

W rozdziale 4 przedstawiono deterministyczny model ruchu w sieci komunikacji zbiorowej. Dla zbudowanego modelu wyznaczono minimalny czas przejazdu i straty czasu. Na podstawie tych wielkości określono przepustowość maksymalną elementów sieci: wlotów na skrzyżowania sterowane sygnalizacją świetlną, przystanków oraz ich kombinacji (przystanek na wlocie albo przystanek na wylocie skrzyżowania). W modelu deterministycznym założono, że parametry opisujące ruch przyjmują stałe i optymalne dla maksymalizacji przepustowości wartości.

Rozdział 5 zawiera wyniki badań wpływu zmienności parametrów ruchu na przepustowość elementów sieci. Badania te wykonano za pomocą symulacji komputerowej na modelu stochastycznym. W efekcie określono zakres zmienności parametrów ruchu, w którym możliwe jest zastosowanie modelu deterministycznego. Dla parametrów o wartościach spoza tego zakresu wyznaczono straty czasu, czas zajęcia przekroju i przepustowość. Przedstawiono przykład weryfikacji wyników badań nawiązujący do postawionej w pracy tezy.

W rozdziale 6 podsumowano dokonania pracy. Odniesiono wyniki uzyskane zaproponowaną metodą do innych metod. Zarysowano dalsze, potencjalne kierunki badań. Pracę zamyka spis literatury oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Powtarzające się w pracy terminy (tor, kanał, relacja) zostały wyróżnione poprzez pogrubienie w miejscu ich definiowania.

## 1.5 Wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w pracy

|          |   |                                                                                                      |
|----------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>A</b> | – | macierz startu;                                                                                      |
| <b>B</b> | – | procent zablokowanych pojazdów;                                                                      |
| <b>C</b> | – | macierz czasów zgłoszeń pojazdów, odniesionych do momentu w cyklu, w przekroju W;                    |
| <b>D</b> | – | macierz danych o segmentach;                                                                         |
| <b>E</b> | – | macierz wyników;                                                                                     |
| $e^4$    | – | czteroelementowy wektor jednostkowy;                                                                 |
| $f(x)$   | – | funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej $x$ ;                                  |
| <b>G</b> | – | zmienna losowa o rozkładzie gamma;                                                                   |
| <b>H</b> | – | macierz zmodyfikowanych odstępów między pojazdami w przekroju W;                                     |
| $h$      | – | odstęp między pojazdami [s/p];                                                                       |
| <b>I</b> | – | macierz danych o ilości pojazdów w relacjach $ij$ ;                                                  |
| $I_p$    | – | ilość osób wsiadających i wysiadających z jednego pojazdu na jednym przystanku;                      |
| $i$      | – | numer kanału źródłowego;                                                                             |
| $j$      | – | numer kanału docelowego;                                                                             |
| $ij$     | – | oznaczenie relacji z kanału $i$ do kanału $j$ ;                                                      |
| <b>K</b> | – | macierz kanałów docelowych dla pojazdów z kanałów źródłowych;                                        |
| $k$      | – | numer pojazdu w kanałach źródłowych;                                                                 |
| $l$      | – | długość, odległość [m];                                                                              |
| <b>M</b> | – | macierz obsługi pojazdów w segmentach;                                                               |
| $m_{xy}$ | – | element macierzy dwuwymiarowej;                                                                      |
| $N$      | – | natężenie ruchu [p/h];                                                                               |
| $n$      | – | ilość obserwacji;                                                                                    |
| $n_L$    | – | ilość linii komunikacji zbiorowej na analizowanym odcinku;                                           |
| $P$      | – | prawdopodobieństwo;                                                                                  |
| PP       | – | przekrój bezpośrednio za przystankiem;                                                               |
| PR       | – | przekrój na początku przystanku dla odcinka międzywęzłowego;                                         |
| PS       | – | przekrój na początku przystanku położonego bezpośrednio przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną; |
| $Q$      | – | przepustowość [p/h];                                                                                 |
| $r$      | – | współczynnik korelacji Pearsona;                                                                     |

- $s$  – numer segmentu;  
 $S$  – straty czasu [s];  
 $S_B$  – straty czasu uwzględniające wzajemne blokowanie pojazdów [s];  
 $S_D$  – dodatkowe straty czasu [s];  
 $S_M$  – czas postoju pojazdów na przystanku położonym bezpośrednio przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną (straty zmodyfikowane) [s];  
 $S_W$  – straty czasu związane z oczekiwaniem na opuszczenie segmentu [s];  
 $SK$  – przekrój przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną;  
 $SP$  – przekrój na początku przystanku położonego bezpośrednio za skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną;  
 $T$  – macierz globalnych czasów zgłoszeń pojazdów w przekroju W;  
 $t_C, t_{CW}, t_{CY}$  – długość cyklu, długość cyklu na skrzyżowaniu W, długość cyklu na skrzyżowaniu Y [s];  
 $t_D$  – czas dojazdu [s];  
 $t_O$  – czas operacyjny [s];  
 $t_{OF}$  – przesunięcie fazowe między początkami cykli dla skrzyżowań W i Y (offset) [s];  
 $t_{OP}$  – czas opuszczenia zajmowanego stanowiska przez pojazd komunikacji zbiorowej [s];  
 $t_s$  – czas przejazdu segmentu  $s$  [s];  
 $t_W$  – czas wymiany pasażerów na przystanku [s];  
 $t_{Wi}, t_{Yj}$  – moment rozpoczęcia się fazy  $i$  na skrzyżowaniu W lub fazy  $j$  na skrzyżowaniu Y liczony od początku cyklu [s];  
 $\Delta t_{Wi}, \Delta t_{Yj}$  – czas trwania fazy  $i$  na skrzyżowaniu W lub fazy  $j$  na skrzyżowaniu Y [s];  
 $t_{WY}$  – czas przejazdu odcinka międzywęzłowego W-Y [s];  
 $t_{ZW_i}, t_{ZY_j}$  – długość sygnału zielonego dla fazy  $i$  na skrzyżowaniu W lub fazy  $j$  na skrzyżowaniu Y [s];  
 $t_{ZP}$  – czas zajęcia przekroju krytycznego [s];  
 $V$  – prędkość [m/s];  
 $W$  – przekrój bezpośrednio za skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną (początek odcinka międzywęzłowego);  
 $W$  – macierz danych o kanałach źródłowych;  
 $w$  – waga;  
 $w_{RN}$  – wskaźnik rozłożenia;



- $w_{ZG}$  – wskaźnik zgodności;
- $X$  – zmienna losowa o rozkładzie normalnym  $N(0,1)$ ;
- $x$  – numer wiersza macierzy;
- $Y$  – przekrój bezpośrednio przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną (koniec odcinka międzywęzłowego);
- $\mathbf{Y}$  – macierz danych o kanałach docelowych;
- $y$  – numer kolumny macierzy;
- $\kappa$  – numer pojazdu na odcinku W-Y;
- $\nu_{ij}, \nu_{SR}, \nu_G$  – wskaźnik obciążenia relacji  $ij$ , średni wskaźnik obciążenia wlotu, graniczny wskaźnik obciążenia wlotu;
- $\mu$  – wartość oczekiwana rozkładu normalnego;
- $\mu_L, \sigma_L$  – parametry rozkładu logarytmnormalnego;
- $\sigma_x, \sigma_x^2$  – odchylenie standardowe i wariancja zmiennej  $x$ ;
- $\mathcal{A}(s)$  – stan segmentu  $s$ .

## **2 PRZEGLĄD MODELI RUCHU POJAZDÓW I OCENA ICH PRZYDATNOŚCI DO OKREŚLENIA PRZEPUSTOWOŚCI ELEMENTÓW SIECI KOMUNIKACJI ZBIOROWEJ**

### **2.1 Klasyfikacja modeli**

Najogólniejsza definicja [76] określa model jako charakterystyczny opis obiektu, systemu bądź procesu podporządkowany celowi badań. Ma on zastąpić rzeczywisty obiekt badań. Badanie obiektów może zasadzać się na metodach [75]: wynikających z aktualnego stanu teorii obiektu, bazujących na opisie matematycznym lub eksperymentalnych, które służą do obserwacji zmian funkcjonowania obiektu. Na tej podstawie określić można podział modeli na teoretyczne i empiryczne.

W zależności od tego, czy w modelowaniu uwzględnia się upływ czasu modele dzieli się na [76]: statyczne (w ustalonym stanie bez upływu czasu) i dynamiczne (opis zmian w czasie). W każdej z tych grup wyróżnić można ponadto opis deterministyczny i stochastyczny (probabilistyczny) [54], [76], [105]. Deterministycznymi nazywa się modele, w których nie występują zmienne losowe, tzn. wszystkie parametry obiektu oraz dane o jego działaniu są pewne. W drugiej grupie modeli odwzorowuje się niepewność informacji. W pracy [54] podano także podział na modele mikroskopowe i makroskopowe. W grupie modeli mikroskopowych uwzględnia się pojedyncze pojazdy, natomiast modele makroskopowe opisują grupy pojazdów.

Przedstawiony niżej przegląd modeli ma za zadanie wskazać te, które są najbardziej przydatne do określenia przepustowości. Omówiono zarówno modele ruchu w skali sieci, jak i modele dotyczące poszczególnych pojazdów. Przedstawiono modele stochastyczne i deterministyczne. Mimo iż w ruchu drogowym obserwuje się znaczny udział zjawisk losowych (zgłoszenia pojazdów, reakcje kierujących itp.) do pewnych zjawisk można zastosować opis deterministyczny. Analiza ruchu pojazdów związana jest z upływem czasu. Opisane modele ruchu zaliczyć więc można do grupy modeli dynamicznych.

Szerzej opisano modele dotyczące ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej. Ich wyróżnienie zasadza się na specyfice funkcjonowania tego systemu transportu oraz

często odmiennych warunkach ruchu. Przedstawiono także szerzej modele ruchu ogólnego w elementach sieci. Metody stosowane w modelowaniu mogą być użyteczne dla problematyki niniejszej pracy.

## 2.2 Modelowanie ruchu w sieci

Najczęściej stosowane makroskopowe modele ruchu to [19], [22], [54]: opis zależności między natężeniem ruchu, gęstością i prędkością (fundamentalne równanie ruchu) [4], [18], [35], [45], [51], [82], model hydrodynamiczny i falowy model ruchu (analogia do strumienia cieczy) [37], [40], [89] oraz analogia do przepływu ciepła [25], [83]. W każdym z tych podejść wyprowadza się równania opisujące ruch, z których wyznaczyć można następujące parametry: prędkość, odstęp między pojazdami. Wyznaczone wielkości są jednakowe dla wszystkich pojazdów w danym momencie. Nie uwzględnia się więc ich losowego zróżnicowania.

Na wstępnym etapie rozwoju metod określania przepustowości próbowano wyznaczyć przepustowość w oparciu o opisane wyżej modele [55]. Przepustowość wyrażano jako funkcję prędkości i odstępów między pojazdami. Badania ruchu wykazały jednak odstępstwo rzeczywistych wartości tych wielkości od uzyskiwanych z modelu. Na przepustowość mają ponadto wpływ czynniki nie uwzględniane w modelach. Obecnie wyniki uzyskiwane z modeli makroskopowych wykorzystuje się jedynie do oszacowania maksymalnej, teoretycznej przepustowości w abstrakcyjnych (wyidealizowanych, uproszczonych) warunkach ruchu [19], [42], [43], [44], [55]. Podejście makroskopowe wykorzystywane jest niekiedy do określenia przepustowości urządzeń ruchu pieszego bądź rowerowego [19], [55].

Makroskopowym modelom ruchu ogólnego odpowiadają modele komunikacji zbiorowej dotyczące całej sieci. W pracy [99] przyporządkowano modele sieci komunikacji zbiorowej do następujących grup: modele analityczne, których celem jest znalezienie optymalnych związków pomiędzy parametrami systemu, takimi jak: odstęp międzypojazdowy i gęstość tras (modele te używają uproszczonych sieci), modele określające z których odcinków sieci należy zbudować linię komunikacyjną, modele optymalizujące trasy bez uwzględniania częstotliwości pojazdów, modele dostosowujące częstotliwość do danego układu tras, modele które w pierwszej

kolejności optymalizują układ tras, dopasowując następnie do niego częstotliwości, modele określające trasy i częstotliwości jednocześnie.

Dla ogólnie postawionego problemu optymalizacji największą użyteczność mają modele dwóch ostatnich typów [99]. Kryterium optymalizacji może być: minimalizacja czasu podróży [74], zapewnienie maksymalnej liczbie pasażerów podróży bez przesiadki [60], minimalizacja ważonych kosztów podróży pasażerów uwzględniająca koszty jazdy, dojścia i oczekiwania na przystanku [1], minimalizacja czasu oczekiwania na przesiadki oraz minimalizacja różnic interwałów dla pojazdów na wspólnym fragmencie trasy [41]. Stosowana jest metodologia wielokryterialnego wspomagania decyzji z funkcją celu uwzględniającą: wykorzystanie taboru, efektywność, koszty eksploatacyjne, prędkość eksploatacyjną, stopień przepełnienia, współczynnik przesiadek, czas oczekiwania i interwał ruchu [128].

Do rozwiązania zagadnień optymalizacji stosuje się najnowsze metody heurystyczne bazujące na megastrategiach: Tabu Search, symulowane wyżarzanie, czy podejście genetyczne [14], [41], a także teorię zbiorów rozmytych poprzez opis wielkości niepewnych (stochastycznych) za pomocą liczb rozmytych [81], [110], [128]. Analiza potoków pojazdów może zasadzać się na różnych podejściach do modelowania sieci (unigraf, multigraf) [127]. Wprowadza się także ruch modułowy polegający na stosowaniu jednakowych częstotliwości dla wszystkich linii [117].

Modele sieci komunikacji zbiorowej służą optymalizacji parametrów związanych z efektywnością ekonomiczną systemu komunikacji zbiorowej. Nie przywiązuje się w nich wagi do zagadnień płynności ruchu lub je się marginalizuje. Z tego powodu opisane wyżej modele nie znajdują zastosowania dla zagadnienia przepustowości.

## 2.3 Modelowanie ruchu ogólnego w elementach sieci

Mikroskopowe modele deterministyczne reprezentują podejście podobne do makroskopowego, z tym że analizie podlegają parametry opisujące ruch poszczególnych pojazdów. W modelu jazdy za liderem [3], [19], [22], [37], [38], [54], [114], [122], [125] zakłada się, że kierowcy reagują na zmiany sposobu jazdy pojazdów ich poprzedzających. Z analizy ruchu wyprowadzić można prędkość pojazdów, przyspieszenia i opóźnienia, a także wielkość odstępów między pojazdami. Odstępy między pojazdami wyznaczone z modeli deterministycznych znajdują wykorzystanie

przy określaniu przepustowości wlotów podporządkowanych na skrzyżowania bez sygnalizacji świetlnej [19], [27], [55] oraz w przypadku włączania się do ruchu na węzłach [43], [55], [113], [118] ponieważ w tych przypadkach analizuje się wielkość luk między pojazdami na drodze głównej pod kątem potrzeb pojazdów włączających się do ruchu (ew. przekraczających potok nadrzędny). W pracy [53] zaproponowano deterministyczny model opisujący straty czasu pojazdów dla skrzyżowań ze skoordynowaną sygnalizacją świetlną.

Stochastyczne podejście do modelowania ruchu w elementach sieci zawarte jest w teorii kolejek systemu masowej obsługi [19], [22], [29], [47], [54], [59], [75], [84], [85], [109], [116]. Losowość ujęta może być w opisie strumienia zgłoszeń albo w regulaminie obsługi (jej czas i warunki). Teoria pozwala wyliczyć parametry ruchu istotne dla zagadnienia przepustowości: rozkład i średnią ilość pojazdów w systemie, rozkład i średni czas obsługi (włącznie ze stratami czasu), rozkład i średnią długość kolejki. Istnieją rozwiązania prostych (najczęściej jednokanałowych) systemów obsługi, które mogą być zastosowane do zagadnień ruchu drogowego. Głównym problemem jest niezgodność empirycznego strumienia zgłoszeń z rozkładem Poissona. Występuje to zwłaszcza w niewielkich odległościach za elementami zakłócającymi płynność ruchu, takimi jak: przystanki, skrzyżowania. Z tego względu nie wykorzystuje się w praktyce teorii kolejek do określenia przepustowości.

W praktycznych formułach na przepustowość w ruchu drogowym dla odcinków międzywęzłowych oraz skrzyżowań sterowanych sygnalizacją świetlną najczęściej wykorzystywane są modele empiryczne [19], [55], [101], [115], [121]. Przepustowość teoretyczną (maksymalną), czasami wyznaczoną z modeli teoretycznych, modyfikuje się za pomocą współczynników, najczęściej zmniejszających, które odpowiadają czynnikom nie uwzględnionym przy wyznaczaniu przepustowości teoretycznej. Czynniki te [19], [42], [43], [55] podzielić można na cztery grupy:

- związane z ruchem: natężenie ruchu analizowanych relacji, a także relacji nadrzędnych, kolidujących, innych użytkowników (pieszych), struktura rodzajowa ruchu, a w szczególności udział pojazdów ciężarowych i autobusów (z uwzględnieniem ewentualnych przystanków w badanym rejonie), struktura kierunkowa ruchu, w tym udział relacji skrętnych oraz pojazdów jadących z przeciwną, prędkość i gęstość ruchu, możliwość parkowania w sąsiedztwie badanego obiektu;

- związane z geometrią: liczba pasów ruchu i ich szerokość, a także odległość od przeszkód bocznych, wielkość badanego obszaru (długość odcinka przeplatania albo pasów włączenia bądź wyłączenia, średnica ronda, odległość między punktami kolizji, długość odcinka o znacznym pochyleniu, długość przejścia dla pieszych), ilość wlotów, odległości widoczności, pochylenie podłużne, promień skrętu;
- związane z organizacją i sterowaniem ruchem: zasady pierwszeństwa przejazdu i oznakowanie, kanalizacja bądź nie, czas trwania światła zielonego w stosunku do długości cyklu;
- inne mające aspekt psychologiczny: skład populacji kierowców i lokalizacja badanego obiektu związana ze znajomością rozwiązania przez użytkowników.

W modelach empirycznych istotna jest właściwa estymacja parametrów modelu [5], [34], [77], [80], [115]. Wykorzystywane są formuły regresji i inne metody wnioskowania statystycznego [5], [86].

Podstawą analiz w warunkach probabilistycznych jest identyfikacja i opis rozkładów zmiennych charakteryzujących ruch: prędkość pojazdów (rozkład normalny) [58] i odstępy między nimi (rozkład wykładniczy) [7], [10], [19], [22], [54], [112], [120]. Spotyka się dokładniejsze podejście: wykorzystanie innych rozkładów w warunkach zakłóceń ruchu [120], rozdział pojazdów na grupy o jednorodnych parametrach ruchu (np. pojazdy osobowe i ciężarowe) [6] i uwzględnienie splotu rozkładów normalnych [92], [108], opis odstępów między pojazdami różnymi rozkładami (wykładniczy przesunięty, hiper Erlanga, logarytmowo-normalny, suma rozkładów wykładniczych) w zależności od natężenia ruchu [27], [36]. Istotna jest także identyfikacja zachowań kierujących pojazdami, np. odnośnie akceptowalnych luk czasowych między pojazdami w potoku nadrzędnym potrzebnych na włączenie się do ruchu z drogi podporządkowanej [11], [33], [34], [46], [84], [88], [101], [102], [122].

Modele symulacyjne wykorzystujące zmienne losowe o znanych rozkładach mają obecnie szerokie zastosowanie i uznawane są za najwierniej odwzorowujące rzeczywistość [8], [13], [15], [23], [72], [78], [102], [103], [122]. Przy złożonych zadaniach symulacyjnych wykorzystuje się sieci neuronowe [16], [20], [73], [74], [77], [95], [124]. Podejmuje się także próby matematycznego opisu strumienia zgłoszeń z wykorzystaniem procesów Markowa [56].

## 2.4 Modelowanie ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej w elementach sieci

Dla ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej opisano następujące wielkości: potok autobusów oraz potok tramwajów [69], [71], [96], [98], potok samochodów jako zaburzenie (zakłócenie) [69], czas przejazdu odcinka międzywęzłowego i przez skrzyżowanie bez zaburzeń [68], proces wymiany pasażerów na przystanku [64], [68], [96], [98], czas przemieszczania się pasażera w obrębie węzła przesiadkowego [68], reakcja kierowców i motorniczych na funkcjonowanie cyklicznej stałoczasowej sygnalizacji świetlnej [68], [69], wybór relacji na wlocie skrzyżowania [69], straty czasu w punktach kolizji związane z przecinaniem się linii komunikacji zbiorowej [65], [68], [69], straty czasu spowodowane koniecznością oddania pierwszeństwa pieszym [68], blokowanie przystanku tramwajowego lub wlotu na skrzyżowanie przez inny (poprzedzający) pojazd komunikacji zbiorowej [69], proces zajmowania stanowiska postojowego (istotne w wypadku kilku, rozdzielonych stanowisk) [69], zakłócenie procesu wymiany pasażerów przez ruch kołowy w strefie przystanku (dotyczy przystanku zlokalizowanego na chodniku) [70], zgłoszenia autobusów różnego typu (różnej długości) [98], zgłoszenia autobusów za wlotem skrzyżowania z sygnalizacją świetlną [97].

Dla strumienia zgłoszeń pojazdów komunikacji zbiorowej wykorzystuje się modelowanie odstępów między pojazdami rozkładem wykładniczym lub gamma [71], [96], [97], przy czym rozkład wykładniczy stosuje się dla potoków o natężeniach większych od 30 pojazdów na godzinę. W przypadku długich odcinków międzywęzłowych i niewielkiej ilości zaburzeń możliwe jest modelowanie odchyłek od rozkładu jazdy rozkładem gamma [107] lub opis zgłoszeń za pomocą rozkładów o zmiennej intensywności [75], [79].

Modelowanie strumienia zgłoszeń za pomocą zmiennych o prostych rozkładach nie znajduje zastosowania w sytuacji występowania istotnych zaburzeń płynności ruchu. W pracy [97] podano analityczne rozwiązanie dla zaburzeń związanych z przejazdem na wprost (jednej relacji) przez skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną. Dla większości bardziej złożonych przypadków nie opracowano jednak jak dotąd rozwiązania analitycznego.

Do modelowania czasów: przejazdu odcinków międzywęzłowych, przejazdu przez obszar skrzyżowania, zajęcia lub opuszczenia stanowiska postojowego stosuje się



rozkład normalny lub logarytmowo-normalny z reguły obustronnie ucięty [66], [68], [71], [99]. Możliwe jest także zastosowanie formuł regresji [99].

Potok samochodów traktowany jest jako zaburzenie ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej. Nie występuje w przypadku całkowitego i trwałego wydzielenia toru dla komunikacji zbiorowej (torowisko tramwajowe o nawierzchni typu kolejowego lub odizolowane: jezdnia dla autobusów, wspólny pas autobusowo – tramwajowy ewentualnie torowisko). W przypadku wydzielenia torowiska tramwajowego w sposób nietrwały (za pomocą oznakowania poziomego) wielkość strat czasu jest zmienną losową o rozkładzie Gamma nie uzależnioną jednak od natężenia ruchu samochodowego (są to ustalenia wstępne z [71]). W przypadku torowiska ogólnodostępnego wielkość strat czasu jest funkcją natężenia ruchu samochodowego [70], [71]. W pracy [70] zaproponowano opis procentowych przejazdów zakłóconych rozkładem normalnym. Obecnie straty czasu tramwajów wskutek ich zakłóconego przejazdu przez samochody proponuje się modelować formułami regresji [68]. Podobnie jest przy uwzględnianiu strat czasu autobusów włączających się do ruchu z zatoki [68].

Proces wymiany pasażerów na stanowisku postojowym modelowany jest przez czas postoju pojazdu komunikacji zbiorowej. Opisuje się go zmienną losową o rozkładzie Gamma. Parametry rozkładu powinny być oszacowane indywidualnie na podstawie pomiarów [71]. Możliwe jest także [68], [71] wyznaczanie średniego czasu postoju z formuły regresji sumującej właściwy czas wymiany i czas operacyjny (rozumiany jako czas otwarcia i zamknięcia drzwi). Współczynniki regresji zależą od rodzaju taboru oraz od usytuowania przystanku w sieci (początkowy, pośredni, końcowy). Liczba pasażerów wsiadających wynika z realizacji strumienia zgłoszeń pasażerów (charakteryzowany jest intensywnością i aproksymowany potokami stacjonarnymi w przedziałach czasu) [68]. Liczba pasażerów wysiadających może być wynikiem modelowania poruszania się pojedynczych pasażerów w sieci albo określa się ją empirycznie. Wielkości te można także oszacować na podstawie obliczeń potencjałów ruchotwórczych, więzby ruchu i jego rozkładu na środki transportu oraz sieć [71]. Długość czasu operacyjnego może być modelowana zmienną losową o rozkładzie Gamma.

W przypadku konieczności przejścia przez jezdnię dla ruchu ogólnego pomiędzy pojazdem a przystankiem (przypadek taki ma miejsce gdy przystanek usytuowany jest na chodniku a torowisko tramwajowe wbudowane jest w jezdnię w pobliżu jej osi)



występuje wydłużenie czasu wymiany pasażerów. W pracy [70] proponuje się dodanie do czasu  $T$  składnika  $A$ . Dla przejścia pasażerów przez jednopasową jezdnię wielkość  $A$  oszacowano na około 6 sekund. Celowe wydaje się przeprowadzenie badań nad wpływem szerokości jezdni, natężenia ruchu samochodów i innych czynników na długość czasu  $A$ . Należy też zbadać losowość tej wielkości. Czas przemieszczania się pasażerów pomiędzy przystankami lub stanowiskami postojowymi w obrębie węzła przesiadkowego modeluje się zakładając normalny rozkład prędkości pieszego przy powiązaniu parametrów tego rozkładu z gęstością ruchu. Istotny jest brak przewężeń na drodze pieszych [68].

Opisane wyżej modele cząstkowych procesów ruchu znalazły zastosowanie przy wyznaczaniu przepustowości przystanków autobusowych zlokalizowanych w zatoce za skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną [98]. Wykazano tam, że w sytuacji zgłoszeń na skrzyżowaniu w losowych momentach cyklu przepustowość przystanków jest zmienna i odbiega od wartości podawanych w wytycznych do projektowania [123].

Istotny problem stanowi modelowanie strat czasu powstających przy oczekiwaniu na wjazd na przystanek lub przejazd przez skrzyżowanie. Straty te w bezpośredni sposób określają przepustowość elementów sieci komunikacji zbiorowej. Wielkość strat jest funkcją czasu obsługi (wymiana pasażerów, program sygnalizacji) oraz odstępów zgłoszeń pojazdów. Modelowanie strat wiąże się więc z modelowaniem procesu zgłoszeń oraz obsługi. Podejmowano próby określenia strat w oparciu o systemy obsługi masowej [116]. Wyniki bardziej zgodne z uzyskiwanymi w drodze pomiarów uzyskuje się jednak z modeli symulacyjnych [68], [69], [71], [116].

## 2.5 Podsumowanie

Metody wyznaczania przepustowości poszczególnych elementów sieci drogowej bazują na różnych modelach ruchu. Uzależnione jest to charakterem ruchu jaki występuje na obiekcie którego przepustowość jest wyznaczana. Dla odcinków międzywęzłowych stosowane są modele ruchu ciągłego, dla innych elementów sieci – modele zakładające przerwy w ruchu. Odzworowując złożoność czynników wpływających na przepustowość oraz ich losowość opisuje się parametry ruchu za pomocą zmiennych losowych o zidentyfikowanych rozkładach. Przy czym wykorzystywane są coraz bardziej skomplikowane rozkłady w celu osiągnięcia jak

największej zgodności z rzeczywistością. W analizach ruchu drogowego ogólnego najpowszechniejsze są modele symulacyjne.

Do oceny przepustowości elementów sieci komunikacji zbiorowej wykorzystywane są modele odmienne od stosowanych dla ruchu ogólnego. Wynika to z cech charakterystycznych różnych środków transportu. Transport zbiorowy cechują pojazdy o większych gabarytach, ale z drugiej strony bardziej jednorodne od spotykanych w ruchu ogólnym. Autobusy, a zwłaszcza tramwaje poruszają się po ściśle określonych trasach, z reguły bez możliwości zmiany (wyboru) pasa ruchu czy relacji. W ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej następują obowiązkowe zatrzymania, na przystankach, co może wiązać się z dodatkowymi stratami czasu. Wszystkie te czynniki mają wpływ na przepustowość i muszą być odwzorowane w modelu.

W Polsce, jak dotąd, nie określano kompleksowo przepustowości dla elementów sieci komunikacji zbiorowej. Nie jest znany model odwzorowujący sieć lub jej typowy fragment, który mógłby posłużyć do rozwiązania problemu postawionego w pracy. Zaproponowana metoda określania przepustowości bazuje na oryginalnym modelu stworzonym dla potrzeb niniejszej pracy. Model ten wykorzystuje metody odwzorowania pewnych elementów sieci i ruchu przedstawione w powyższym przeglądzie. Stanowi jednak nowatorskie podejście do modelowania komunikacji zbiorowej charakterystycznej dla śródmieść dużych miast, uwzględniające kierunki rozwoju tego systemu transportu.

### **3 POMIARY ZAKRESU ZMIENNOŚCI PARAMETRÓW OPISUJĄCYCH RUCH W MODELOWANYM FRAGMENTE SIECI**

W niniejszym rozdziale zestawiono wyniki pomiarów parametrów opisujących ruch pojazdów komunikacji zbiorowej. Uwzględniono tramwaje i autobusy różnych typów. Pomiary wykonano w latach 1997 – 1999 we Wrocławiu. Wyniki z Wrocławia porównano z uzyskanymi w Krakowie – mieście o zbliżonej wielkości. Rozróżniono parametry charakteryzujące strumień pojazdów dojeżdżających do skrzyżowania oraz opisujące przejazd przez odcinek międzywęzłowy. Zadaniem pomiarów jest wyznaczenie zakresu zmienności wielkości stałych (np. długości światła zielonego) oraz identyfikacja rozkładów zmiennych losowych (np. odstępów między pojazdami).

#### **3.1 Parametry określające strumień pojazdów dojeżdżających do skrzyżowania**

##### **3.1.1 Odstępy między pojazdami na wlotach skrzyżowania**

Wykonano pomiary odstępów czasowych między zgłaszającymi się pojazdami na wlotach skrzyżowań. Analizowano tramwaje poruszające się po wydzielonych (trwale lub za pomocą oznakowania poziomego) torowiskach lub po ulicach nie obciążonych dużym ruchem pojazdów indywidualnych (Wrocław: ul. Piłsudskiego, ul. Podwale, ul. Krupnicza, ul. Curie- Skłodowskiej). Uwzględniono także autobusy poruszające się po wspólnym pasie autobusowo- tramwajowym (ul. Podwale przy DT „Podwale”). Wyróżniono kilka typów przekrojów pomiarowych w zależności od usytuowania względem poprzedzającej sygnalizacji świetlnej jako czynnika wpływającego na odstępy między pojazdami. Przekroje „odl 0” usytuowane są bezpośrednio za skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną. Przekroje „odl 100”, „odl 250” i „odl 500” znajdują się w odległości od poprzedzającego je skrzyżowania z sygnalizacją świetlną wyrażonej liczbą umieszczoną po symbolu „odl”. Przekroje „odl ∞” dotyczą miejsc przed którymi nie znajdują się żadne skrzyżowania z sygnalizacją świetlną.

Rozróżnienie typów przekrojów miało za cel pokazanie wpływu sygnalizacji świetlnej oraz odległości od niej na parametry charakteryzujące rozkład odstępów między pojazdami takie jak średnia i odchylenie standardowe, a także na samą postać (opis funkcyjny gęstości) rozkładu.

Przeanalizowano zgodność rozkładów empirycznych z rozkładem gamma, którego gęstość opisuje formuła (3.1), za pomocą testu zgodności  $\chi^2$ . Podano graniczny poziom istotności (Significant Level – SL) przy którym możliwe jest jeszcze przyjęcie hipotezy o zgodności rozkładów, jako wskaźnik „mocy” zgodności. Im niższy jest poziom SL, tym większa jest zgodność rozkładów (bowiem niższe jest prawdopodobieństwo odrzucenia hipotezy o zgodności w sytuacji gdy jest ona prawdziwa).

$$f(h) = \frac{1}{\Gamma(c) \cdot b^c} \cdot x^{c-1} \cdot e^{-\frac{h}{b}}, \quad (3.1)$$

gdzie:

$f(h)$  – gęstość rozkładu gamma,

$\Gamma(c)$  – funkcja gamma Eulera,

$b$  – parametr skali, przyjęto  $b = \sigma_h^2 / h_{SR}$  (wg [97]),

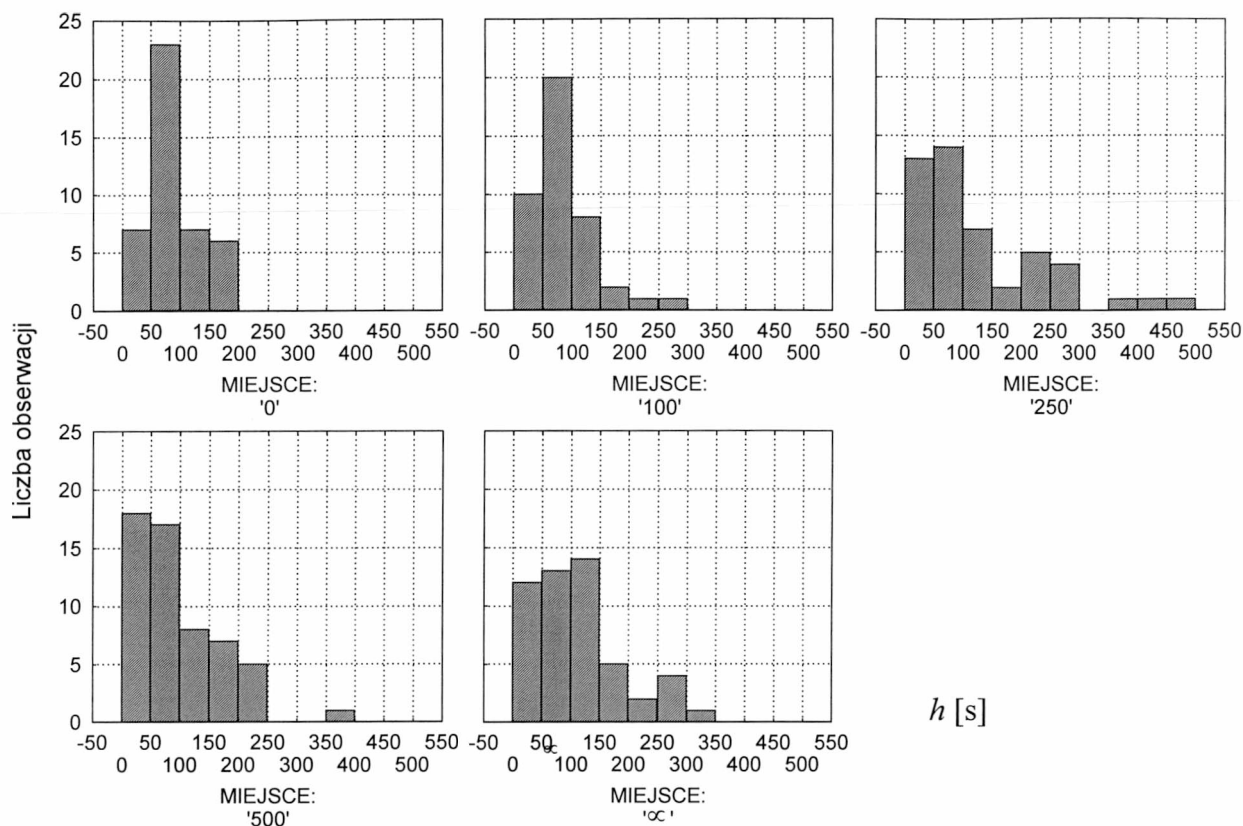
$c$  – parametr kształtu, przyjęto  $c = h_{SR}^2 / \sigma_h^2$  (wg [97]).

Tabela 3.1: Parametry charakteryzujące odstęp między pojazdami w kanałach

| Typ przekroju | $h_{SR}$ | $h_{MIN}$ | $h_{MAX}$ | $\sigma_h$ | $\sigma_h^2$      | $c$  | $b$   | SL   |
|---------------|----------|-----------|-----------|------------|-------------------|------|-------|------|
|               | [s]      | [s]       | [s]       | [s]        | [s <sup>2</sup> ] | --   | --    | --   |
| odl 0         | 79       | 8         | 271       | 60,5       | 3656              | 1,76 | 48,9  | 0,39 |
| odl 100       | 86       | 14        | 232       | 54,2       | 2943              | 2,58 | 34,4  | 0,17 |
| odl 250       | 148      | 10        | 576       | 133,8      | 17902             | 1,25 | 121,5 | 0,17 |
| odl 500       | 95       | 5         | 395       | 80,7       | 6512              | 1,39 | 68,4  | 0,06 |
| odl $\infty$  | 124      | 13        | 379       | 96,0       | 9206              | 1,78 | 75,4  | 0,00 |

W tabeli 3.1 zestawiono parametry charakteryzujące odstęp między pojazdami dla poszczególnych typów przekrojów pomiarowych (wartości średnie dla przekrojów w typie). Podano: odstęp średni ( $h_{SR}$ ), minimalny ( $h_{MIN}$ ), maksymalny ( $h_{MAX}$ ), odchylenie standardowe ( $\sigma_h$ ) i wariancję ( $\sigma_h^2$ ) parametry: kształtu ( $c$ ) i skali ( $b$ ) rozkładu gamma dopasowanego do wartości pomierzonych odstępów oraz graniczny poziom istotności

(SL). Na rysunku 3.1 pokazano histogramy odstępów między pojazdami dla wybranych przekrojów pomiarowych z poszczególnych typów.



Rysunek 3.1: Histogramy odstępów między pojazdami dla różnych typów przekroju

Odstępy między pojazdami mogą być opisane rozkładem gamma z zadowalającą dokładnością z wyjątkiem przekrojów położonych bezpośrednio za skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną, której wpływ silnie oddziałuje na odstępy. Już jednak dla przekrojów odległych od skrzyżowania o 100 metrów możliwy jest opis odstępów rozkładem gamma. Wraz ze wzrostem odległości przekroju pomiarowego od skrzyżowania wzrasta dokładność przybliżenia rozkładu empirycznego odstępów rozkładem gamma.

Podobne wyniki uzyskano w Krakowie. Z materiałów otrzymanych z Instytutu Inżynierii Drogowej i Kolejowej Politechniki Krakowskiej wynika, że odstępy między tramwajami kursującymi po wydzielonym torowisku w przekroju nie poprzedzanym skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną najlepiej opisywane są rozkładem gamma i to niezależnie od sytuacji, czy analizowane są pojazdy jednej, czy wszystkich linii. Dla torowisk wbudowanych w jezdnię i przy obecności dużej ilości skrzyżowań z

sygnalizacją świetlną odstępów między pojazdami opisano z powodzeniem także rozkładem gamma [71].

Dodatkowo przeprowadzono analizę zróżnicowania odstępów zgłoszeń w krótkich przedziałach czasowych (15 minut). Ograniczono się do trzech charakterystycznych miejsc: odl 100, odl 500 i odl  $\infty$ . Wyniki analizy: wartości odchyłeń standardowych ( $\sigma_h$ ) i wariancji ( $\sigma_h^2$ ) odstępów między pojazdami w kolejnych kwadransach, przedstawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2: Zróżnicowanie odstępów między pojazdami w przedziałach 15- minutowych

| Typ przekroju | Nr kolejnego kwadransa | $\sigma_h$ | $\sigma_h^2$      |
|---------------|------------------------|------------|-------------------|
|               |                        | [s]        | [s <sup>2</sup> ] |
| odl 100       | 1                      | 42.3       | 1789              |
|               | 2                      | 30.5       | 930               |
|               | 3                      | 64.2       | 4122              |
|               | 4                      | 81.8       | 6691              |
| odl 500       | 1                      | 89.7       | 8046              |
|               | 2                      | 50.3       | 2530              |
|               | 3                      | 131.3      | 17240             |
|               | 4                      | 60.5       | 3660              |
|               | 5                      | 69.9       | 4886              |
|               | 6                      | 89.2       | 7957              |
|               | 7                      | 41.3       | 1706              |
| odl $\infty$  | 1                      | 56,2       | 3165              |
|               | 2                      | 64,6       | 4174              |
|               | 3                      | 84,1       | 7079              |
|               | 4                      | 64,0       | 4093              |
|               | 5                      | 102,2      | 10457             |
|               | 6                      | 109,0      | 11883             |
|               | 7                      | 76,3       | 5822              |

Zróżnicowanie odstępów wykazuje dużą zmienność w czasie. Podanie wartości dla odstępów godzinowych nie oddaje specyfiki zgłoszeń. Celowe wydaje się uwzględnienie w dalszych analizach odstępów 15- minutowych (por. rozdział 5).

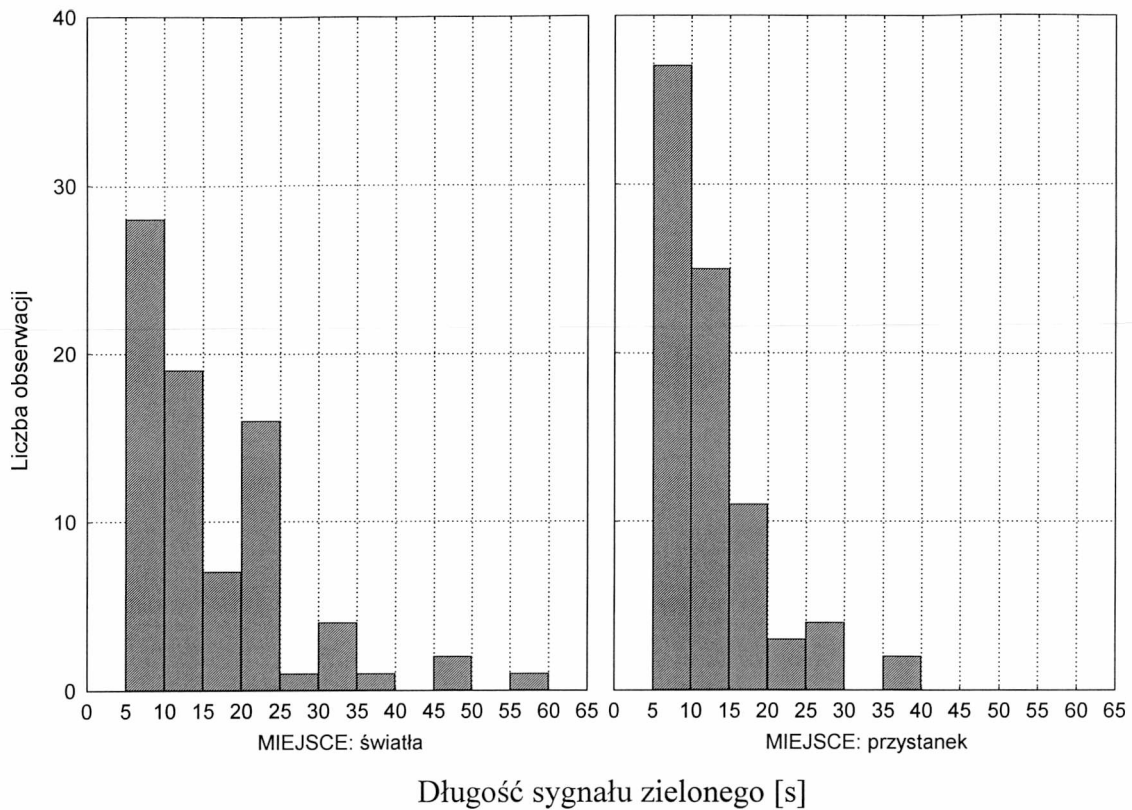
### 3.1.2 Długość sygnału zielonego

Na podstawie materiałów uzyskanych we wrocławskim Zarządzie Dróg i Komunikacji dokonano analizy długości światła zielonego dla faz z udziałem pojazdów komunikacji zbiorowej. Uwzględniono wszystkie, położone w centrum skrzyżowania, przez które przebiegała więcej niż jedna relacja komunikacji zbiorowej. Jako centrum rozumie się tu obszar ograniczony linią tramwajową „0”. Zaliczono do niego także skrzyżowanie ul. Powstańców Śląskich z al. Hallera. Dane dotyczą sygnalizatorów dla tramwajów (z reguły na wydzielonych torowiskach) oraz sygnalizatorów dla autobusów na wydzielonych pasach (również autobusowo- tramwajowych) i przy wyjeździe z zatok przystankowych w wypadku stosowania służby. Rozróżniono sytuacje gdy przed sygnalizatorami znajduje się przystanek oraz gdy nie ma przystanku. Długości cykli na analizowanych skrzyżowaniach zawierały się między wartościami: 72 s i 95 s.

Wyniki analizy: ilość uwzględnionych sygnalizatorów ( $n$ ), średni czas trwania sygnału zielonego ( $t_{ZSR}$ ), czas minimalny ( $t_{ZMIN}$ ), czas maksymalny ( $t_{ZMAX}$ ) oraz odchylenie standardowe czasów  $t_Z$  ( $\sigma_t$ ) zamieszczono w tabeli 3.3. Na rysunku 3.2 przedstawiono histogramy czasu trwania sygnału zielonego oddzielnie dla przystanku usytuowanego bezpośrednio przed sygnalizatorami oraz dla braku przystanku.

Tabela 3.3: Zakres długości sygnału zielonego dla faz z udziałem pojazdów komunikacji zbiorowej

| Typ analizy                      | $n$ | $t_{ZSR}$ | $t_{ZMIN}$ | $t_{ZMAX}$ | $\sigma_t$ |
|----------------------------------|-----|-----------|------------|------------|------------|
|                                  | --  | [s]       | [s]        | [s]        | [s]        |
| Przystanek przed sygnalizatorami | 82  | 13.2      | 6.0        | 39.0       | 6.6        |
| Brak przystanku                  | 79  | 16.9      | 6.0        | 57.0       | 10.2       |
| Łącznie                          | 161 | 15.0      | 6.0        | 57.0       | 8.7        |



Rysunek 3.2: Histogramy czasu trwania sygnału zielonego

Obliczone wartości średnie, a także analiza histogramów wskazują na niską wartość długości sygnału zielonego dla pojazdów komunikacji zbiorowej praktycznie uniemożliwiającą w większości przypadków przejazd dwóch pojazdów w jednym cyklu sygnalizacyjnym (por. punkt 3.2.1). Dotyczy to przede wszystkim sytuacji ruszania z przystanku usytuowanego bezpośrednio przed sygnalizatorami.

### 3.1.3 Regularność wyboru kanału docelowego

Ponieważ wybór kierunku dalszej jazdy (kanału docelowego) wpływać może na wielkość strat czasu na skrzyżowaniu związanych z blokowaniem (istotność wpływu zostanie stwierdzona w rozdziale 5), wykonano badania regularności wyboru kanału docelowego. Obserwacje przeprowadzono w kilku miejscach (Wrocław: ul. Piłsudskiego pomiędzy Stawową i Kołłątają, ul. Podwale pomiędzy Krupniczą i Świdnicką) charakteryzujących się przeprowadzeniem przez nie czterech relacji (po dwa kanały źródłowe i docelowe). Schemat takiego fragmentu sieci wraz ze stosownymi oznaczeniami przedstawiono na rysunku 3.3.





zgłoszeń wytłumaczyć można faktem, iż w przypadku dużych natężeń ruchu losowe zaburzenia ruchu (odstępstwa od kurowania wg rozkładu jazdy) poszczególnych pojazdów przewyższają rozkładowe odstępstwa między nimi i tym samym zaburzają, zaplanowaną jako regularną, kolejność zgłoszeń. Większa ilość linii o różnym przebiegu charakteryzuje się odmiennymi odstępstwami od rozkładu jazdy dla pojazdów poszczególnych linii wynikającymi z innych czynników zaburzających, a także często praktyczną niemożliwością koordynacji przejazdu na wspólnym odcinku, powodującą już rozkładową nieregularność odstępów, ich zagęszczanie i tym samym większą wrażliwość na zaburzenia zgłoszeń.

Tabela 3.4: Badania regularności wyboru kanału docelowego

| Przypadek | $w_{RN}$ | $N_i$ | $n_L$ | $w_{ZG}$ |
|-----------|----------|-------|-------|----------|
|           | --       | [p/h] | --    | [%]      |
| 1         | 0,3/0,7  | 14    | 1/2   | 79       |
| 2         | 0,3/0,7  | 27    | 1/4   | 67       |
| 3         | 0,4/0,6  | 14    | 1/1   | 71       |
| 4         | 0,3/0,7  | 32    | 2/4   | 59       |

### 3.2 Parametry określające przejazd pojazdów przez odcinek międzywęzłowy

#### 3.2.1 Prędkość pojazdów i jej zróżnicowanie

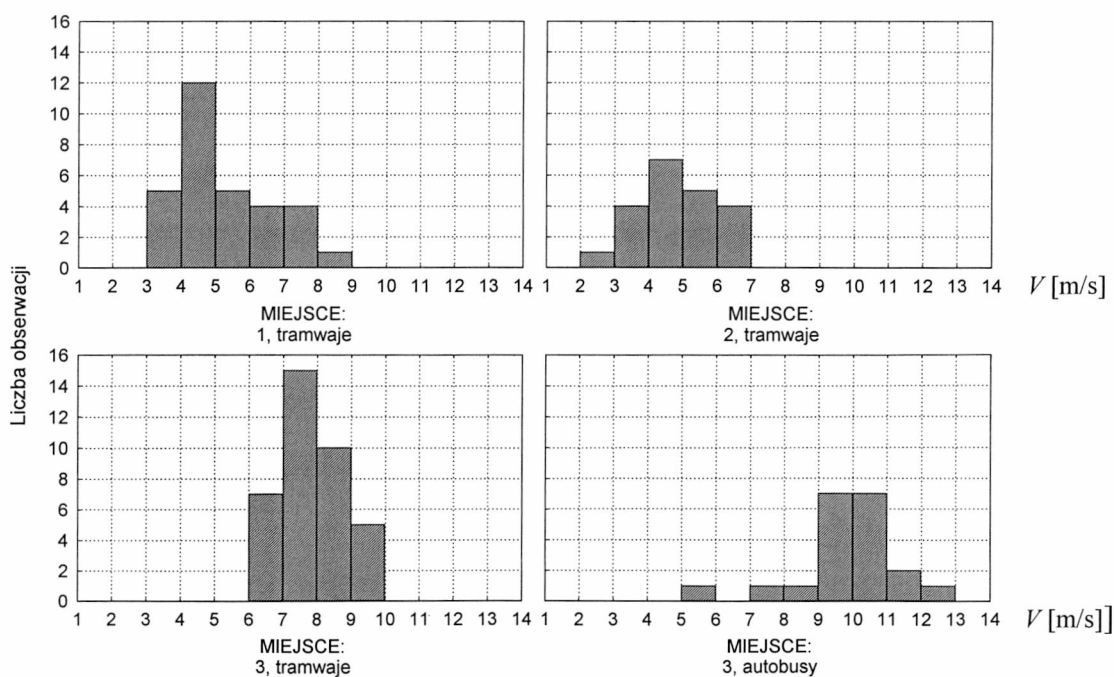
Dla przeprowadzonych pomiarów prędkości pojazdów komunikacji zbiorowej określono jej zależność od następujących parametrów: MIEJSCE (porównano prędkości dla krótkich i długich odcinków międzywęzłowych), POJAZD (analizowano prędkości w zależności od typu pojazdu: autobus lub tramwaj). Pomiary wykonano na trasach wydzielonych z ruchu ogólnego lub charakteryzujących się niewielkim natężeniem ruchu pojazdów indywidualnych. Obliczono czas przejazdu odcinka międzywęzłowego. Wyniki: prędkość średnią ( $V_{SR}$ ), odchylenie standardowe prędkości ( $\sigma_V$ ), średni czas przejazdu odcinka międzywęzłowego ( $t_{WYSR}$ ) oraz odchylenie standardowe ( $\sigma_t$ ) i współczynnik zmienności ( $v_t$ ) czasu zamieszczono w tabeli 3.5. Na rysunku 3.4 pokazano histogramy rozkładu prędkości dla kilku charakterystycznych miejsc i typów

pojazdów. Miejsce 1 i 2: ul. Piłsudskiego (odcinek o długości 100 m), miejsce 3: ul. Podwale (odcinek o długości 500 m).

Tabela 3.5: Wyniki pomiarów prędkości i czasu przejazdu odcinka międzywęzłowego dla pojazdów komunikacji zbiorowej

| Pojazd / miejsce (długość w [m]) | $V_{SR}$ | $\sigma_V$ | $t_{WYSR}$ | $\sigma_t$ | $v_t$ |
|----------------------------------|----------|------------|------------|------------|-------|
|                                  | [m/s]    | [m/s]      | [s]        | [s]        | [%]   |
| Tramwaje:                        |          |            |            |            |       |
| miejsce 1 (100)                  | 5.3      | 1.35       | 20.1       | 4.86       | 24.2  |
| miejsce 2 (100)                  | 4.9      | 1.19       | 21.7       | 6.03       | 27.8  |
| miejsce 3 (500)                  | 7.9      | 0.96       | 64.1       | 8.00       | 12.5  |
| Autobusy:                        |          |            |            |            |       |
| miejsce 3 (500)                  | 9.9      | 1.46       | 51.8       | 10.11      | 19.5  |

Zaobserwowano zróżnicowanie prędkości dla pojazdów tego samego typu w zależności od rodzaju miejsca pomiarowego. Na krótkich odcinkach międzywęzłowych pojazdy rozwijały mniejszą prędkość. Przyczyną jest niepewność kierujących trafienia na sygnał zielony na skrzyżowaniu zamykającym odcinek międzywęzłowy, a także częste blokowanie przejazdu przez poprzedzający pojazd oczekujący na tymże skrzyżowaniu. Dla odcinków dłuższych opisane wyżej czynniki mają mniejsze znaczenie, stąd średnia prędkość pojazdów jest większa.



Rysunek 3.4: Histogramy rozkładu prędkości pojazdów komunikacji zbiorowej

Autobusy rozwijają większe prędkości od tramwajów nawet podczas kursowania po wspólnym odcinku (miejsce 3). Nie stwierdzono zróżnicowania rozrzutów prędkości (odchyłeń standardowych) w zależności od wyboru miejsca i typu pojazdu. Obserwuje się natomiast zróżnicowanie rozrzutów czasów przejazdu odcinka międzywęzłowego oraz współczynnika zmienności w zależności od jego długości. Na dłuższych odcinkach względne zróżnicowanie czasu przejazdu (współczynnik zmienności) jest mniejsze.

Zbadano zgodność rozkładów prędkości z rozkładem normalnym, którego gęstość opisuje formuła (3.2).

$$f(V) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(V-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (3.2)$$

gdzie:

$f(V)$  – gęstość rozkładu normalnego,

$\mu$  – wartość oczekiwana, tu  $\mu = V_{SR}$ ,

$\sigma$  – odchylenie standardowe, tu  $\sigma = \sigma_V$ .

W sytuacji dużej ilości pomiarów (miejsce 3,  $n > 60$ ) uzyskano zgodność na poziomie  $SL = 0.02$ .

Odrębnych analiz dokonano dla pojazdów ruszających z przystanku lub sprzed sygnalizatorów po otrzymaniu sygnału zielonego (wyróżniono dwa typy miejsc). Uwzględniono pięć typów pojazdów: autobusy przegubowe i zwykłe oraz tramwaje przegubowe (102N) i bezprzegubowe (105N) z jednym lub dwoma wagonami. Badaniom podlegał czas opuszczenia zajmowanego stanowiska  $t_{OP}$  (szczegóły opublikowano w [66]). Stwierdzono, że wartości czasu  $t_{OP}$  nie zależą od typu miejsca lecz od typu pojazdu (decydują gabaryty pojazdów oraz ich właściwości dynamiczne: przyspieszenia). Rozkład pomierzonych czasów wykazuje zgodność z rozkładem logarytmonormalnym, którego gęstość opisuje formuła (3.3)

$$f(t) = \frac{1}{t \cdot \sigma_L \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{[\log(t) - \mu_L]^2}{2 \cdot \sigma_L^2}}, \quad (3.3)$$

gdzie:

$f(t)$  – gęstość rozkładu logarytmonormalnego,

$\sigma_L, \mu_L$  – parametry rozkładu (odchylenie standardowe, wartość oczekiwana).

W tabeli 3.6 przedstawiono: średni czas opuszczenia stanowiska ( $t_{OPŚR}$ ), czas minimalny ( $t_{min}$ ), czas maksymalny ( $t_{max}$ ), odchylenie standardowe wyliczone dla wartości empirycznych ( $\sigma_t$ ) oraz parametry rozkładu logarytmnormalnego ( $\sigma_L$ ,  $\mu_L$ ). Dla populacji zawierającej pojazdy wszystkich typów możliwy jest opis czasu rozkładem normalnym (3.2) o parametrach:  $\mu = 7.6$ ,  $\sigma = 2.04$  i  $SL \approx 0$ .

Tabela 3.6: Parametry charakteryzujące czas opuszczenia zajmowanego stanowiska przez pojazd komunikacji zbiorowej

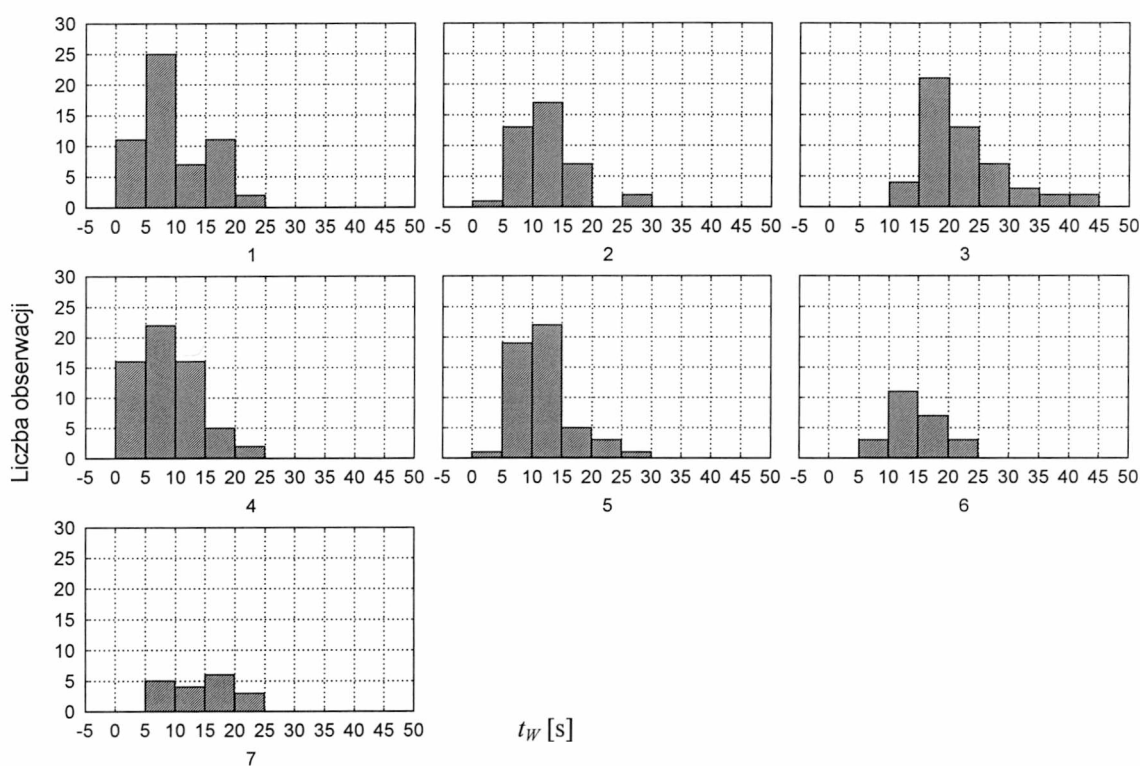
| Typ pojazdu    | $t_{OPŚR}$ | $t_{min}$ | $t_{max}$ | $\sigma_t$ | $\sigma_L$ | $\mu_L$ |
|----------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|---------|
|                | [s]        | [s]       | [s]       | [s]        | [s]        | [s]     |
| Tram. 105N     | 5.8        | 4.1       | 9.1       | 1.15       | 0.035      | 1.74    |
| Tram. 2 × 105N | 8.7        | 4.9       | 18.0      | 1.95       | 0.044      | 2.13    |
| Tram. 102N     | 8.1        | 5.0       | 19.0      | 1.54       | 0.031      | 2.08    |
| Bus przegubowy | 7.4        | 4.6       | 12.0      | 1.56       | 0.042      | 1.98    |
| Bus zwykły     | 5.5        | 2.8       | 9.0       | 1.02       | 0.034      | 1.69    |

Wykonywane wielokrotnie w Krakowie pomiary na sieci tramwajowej, których wyniki otrzymano z Instytutu Inżynierii Drogowej i Kolejowej Politechniki Krakowskiej, wskazują że czas przejazdu pojazdów najlepiej opisuje rozkład gamma, niezależnie czy pomiary dotyczyły przejazdu przez skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną (w dowolnej relacji: na wprost lub skrętnej), czy przez odcinek międzywęzłowy. Rozkład gamma czasu przejazdu odpowiada rozkładowi normalnemu prędkości.

### 3.2.2 Czas wymiany pasażerów na przystanku

Czas wymiany pasażerów mierzono na przystankach tramwajowych, autobusowych oraz wspólnych dla obu rodzajów środków transportu. Pomiary wykonywano zarówno w miejscach o potencjalnie większej ilości wsiadających i wysiadających (centrum miasta, obecność dużego generatora ruchu w pobliżu przystanków: ul. Piłsudskiego: przystanek przy dworcu głównym PKP, ul. Podwale: przystanek przy DT „Podwale”, ul. Kazimierza Wlk.: dwa przystanki w pobliżu Rynku, pl. Grunwaldzki: przystanek w kierunku centrum), jak i w innych miejscach (dwa przystanki na Rondzie Powstańców

Śl.). Badania przeprowadzono dla porównania w dni robocze i wolne. Starano się rejestrować rzeczywisty czas wymiany pasażerów, niejednokrotnie krótszy od całkowitego czasu postoju z otwartymi drzwiami na przystanku, co ma miejsce zwłaszcza na przystankach usytuowanych bezpośrednio przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną. Wyniki pomiarów: średni czas wymiany pasażerów ( $t_{WŚR}$ ) oraz jego odchylenie standardowe ( $\sigma_t$ ), a także parametry rozkładu gamma:  $c = t_{WŚR}^2 / \sigma_t^2$  oraz  $b = \sigma_t^2 / t_{WŚR}$  wraz ze wskaźnikiem SL zestawiono w tabeli 3.7. Brak parametrów  $c$  i  $b$  oraz wskaźnika SL oznacza, iż nie zbadano zgodności rozkładów: empirycznego i teoretycznego z uwagi na małą ilość wyników. Na rysunku 3.5 pokazano histogramy rozkładu czasu wymiany pasażerów dla przypadków z tabeli 3.7.



Rysunek 3.5: Histogramy rozkładu czasu wymiany pasażerów

Nie stwierdzono bezpośrednich zależności między czasem wymiany pasażerów a rodzajem miejsca lub czasem pomiaru. Parametry te nie wpływają także na rozrzut (odchylenie standardowe) czasu wymiany. Wartości wskaźnika SL wskazują na możliwość opisu czasu wymiany pasażerów rozkładem gamma o parametrach wyznaczanych według podanej wyżej zależności. Dodatkowo zbadano zgodność rozkładów empirycznych z rozkładem normalnym o parametrach  $\mu = t_{WŚR}$ ,  $\sigma = \sigma_t$ . W

sytuacji dużej ilości pomiarów ( $n > 60$ ) uzyskuje się zgodność na poziomie  $SL = 0.01$  i mniej.

Tabela 3.7: Wyniki pomiarów czasu wymiany pasażerów

| Lp. | Opis miejsca           | $t_{WSR}$ | $\sigma_t$ | $c$  | $b$  | SL   |
|-----|------------------------|-----------|------------|------|------|------|
|     |                        | [s]       | [s]        | --   | --   | --   |
| 1   | centrum, dzień roboczy | 10.5      | 5.2        | 4,08 | 2,58 | 0,08 |
| 2   | centrum, dzień roboczy | 12.8      | 5.2        | 6,06 | 2,11 | 0,21 |
| 3   | centrum, dzień roboczy | 22.7      | 7.4        | 9,41 | 2,41 | 0,03 |
| 4   | centrum, dzień roboczy | 9.2       | 5.1        | 3,25 | 2,83 | 0,14 |
| 5   | centrum, dzień roboczy | 12.1      | 4.6        | 6,92 | 1,75 | 0,06 |
| 6   | dzień wolny            | 14.9      | 4.5        |      |      |      |
| 7   | dzień wolny            | 14.3      | 4.7        |      |      |      |

Określono dodatkowo zależność czasu wymiany od ilości wsiadających i wysiadających osób. Uzyskano zależność opisaną wzorem (3.4). Parametry  $a_0$  i  $a_1$  oraz współczynnik korelacji Pearsona  $r$  są zmienne. W tabeli 3.8 przedstawiono przykładowe wartości uzyskane w dwóch różnych miejscach pomiarowych charakteryzujących się odmiennymi środkami transportu (Wrocław: Rondo Powstańców Śl. – tramwaje 102N, pl. Grunwaldzki – tramwaje 2\*105N). Wyniki pomiarów oraz linie regresji pokazano na rysunku 3.6.

Tabela 3.8: Parametry charakteryzujące zależność czasu wymiany pasażerów od ich ilości

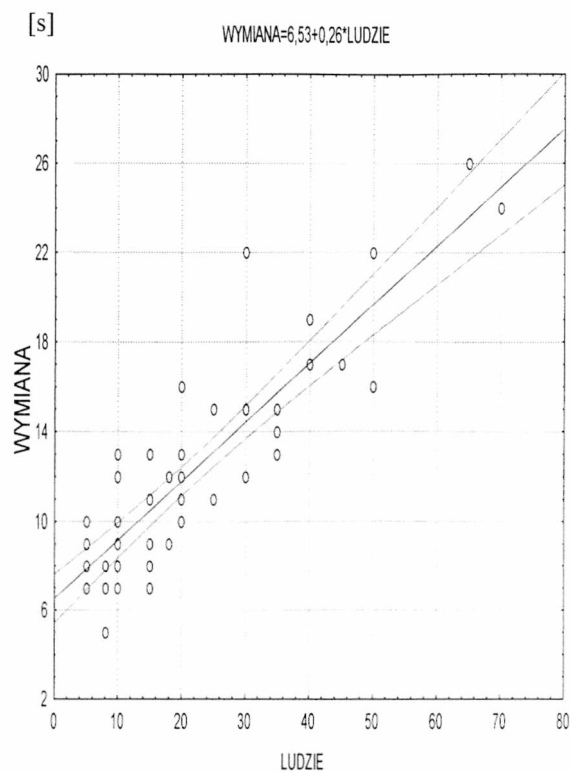
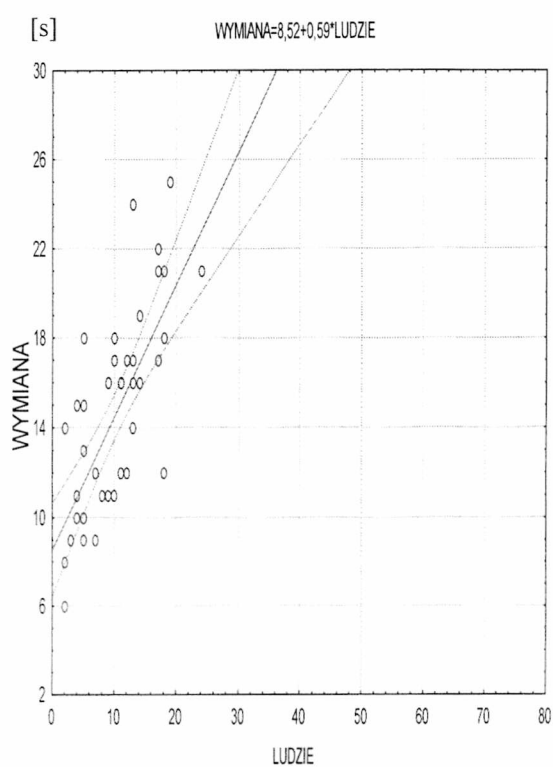
| Typ środka transportu   | $a_0$ | $a_1$ | $r$  |
|-------------------------|-------|-------|------|
| Tramwaj 102N            | 8.52  | 0.59  | 0.72 |
| Tramwaj dwa wagony 105N | 6.53  | 0.26  | 0.87 |

$$t_W = a_0 + a_1 \times I_W,$$

(3.4)

- gdzie:
- $t_W$  – czas wymiany pasażerów [s],
  - $a_0, a_1$  – parametry regresji,
  - $I_W$  – ilość osób wsiadających i wysiadających.

W pracy [99] przedstawiono podobny sposób opisu zależności między czasem wymiany pasażerów a ich ilością, z tym że oddzielnie rozpatrywano osoby wsiadające i wysiadające. Dla tramwajów 2\*105N podano parametry regresji:  $a_0 = 4.0$ ,  $a_1 = 0.65$ .



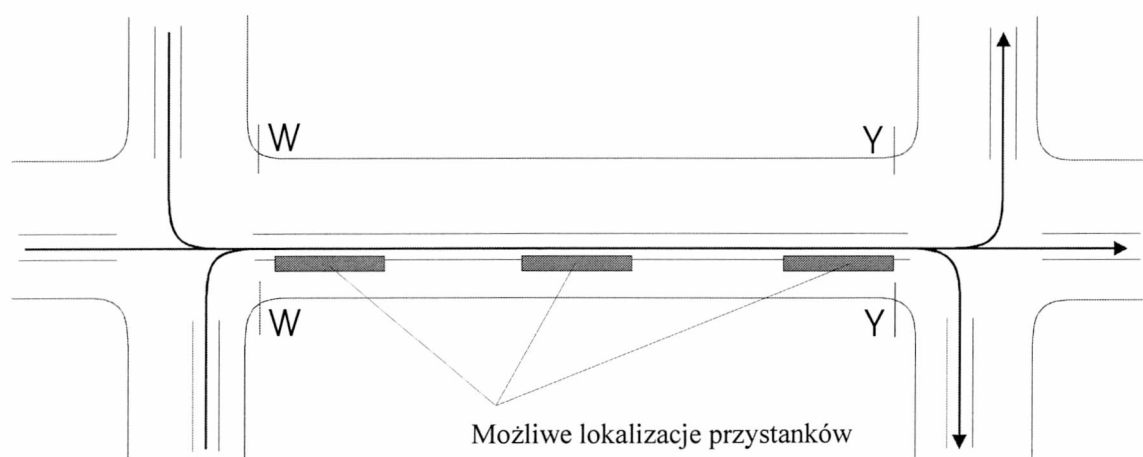
Rysunek 3.6: Zależność między czasem wymiany pasażerów (WYMIANA) a liczbą osób wsiadających i wysiadających (LUDZIE)



## 4 DETERMINISTYCZNY MODEL RUCHU W SIECI KOMUNIKACJI ZBIOROWEJ DLA ŚRÓDMIEŚĆ DUŻYCH MIAST

### 4.1 Model charakterystycznego fragmentu sieci

Dalsze rozważania skupią się na charakterystycznym fragmencie sieci komunikacyjnej, w którym występują wszystkie przypadki ograniczania przepustowości wpływające na przepustowość całej sieci. Fragmentem tym jest odcinek międzywęzłowy zamknięty obustronnie skrzyżowaniami sterowanymi sygnalizacją świetlną. Zakłada się ruch wszystkich pojazdów komunikacji zbiorowej po wspólnym **torze** (tramwaje na torowisku wydzielonym, autobusy na pasie busowym lub tramwaje i autobusy na wspólnym pasie) wydzielonym z ruchu ogólnego. Nie jest możliwe wyprzedzanie się pojazdów. Nie ma przejazdów poprzecznych przez tor wpływających istotnie na ruch. Na analizowanym odcinku występować mogą przystanki o różnej lokalizacji: bezpośrednio za lub bezpośrednio przed skrzyżowaniem albo w pewnej odległości pomiędzy skrzyżowaniami (na odcinku międzywęzłowym). Schemat modelu przedstawiono na rysunku 4.1.



Rysunek 4.1: Schemat modelowanego fragmentu sieci

Początek i koniec odcinka międzywęzłowego to przekroje, które otrzymują oznaczenie **W** i **Y**. Analizowany jest ruch w jedną stronę od W do Y. Zakłada się, że przeciwnie kierunki ruchu nie wpływają na siebie. Bezpośrednio przed przekrojem W znajduje się skrzyżowanie, do którego dochodzą 3 **kanały** ruchu obrazujące możliwe kierunki źródłowe na typowym skrzyżowaniu czterowłotowym. Bezpośrednio za przekrojem Y znajduje się skrzyżowanie, od którego odchodzą 3 kanały określające tu możliwe kierunki docelowe. Zakłada się wydzieloną fazę ruchu dla każdego kanału na obu skrzyżowaniach. Z każdego kanału przed W możliwy jest ruch do dowolnego kanału za Y. Pozwala to przeprowadzić przez modelowany odcinek 9 **relacji** komunikacyjnych. W kontekście powyższej definicji relacja obejmować może kilka linii, o ile cechuje je jednakowy przebieg (numer kanału źródłowego i docelowego) przez analizowany fragment sieci. Możliwa jest analiza mniejszej liczby kanałów i relacji.

Na skrzyżowaniu W wyróżnia się 3 fazy ruchu, w których zielone światło otrzymują relacje z kanałów źródłowych. Nie jest konieczne rozróżnienie pozostałych, możliwych faz, gdyż obsługują one ruch nie przebiegający przez analizowany odcinek międzywęzłowy. Do wyznaczenia długości i podziału cyklu stosuje się następujące oznaczenia:

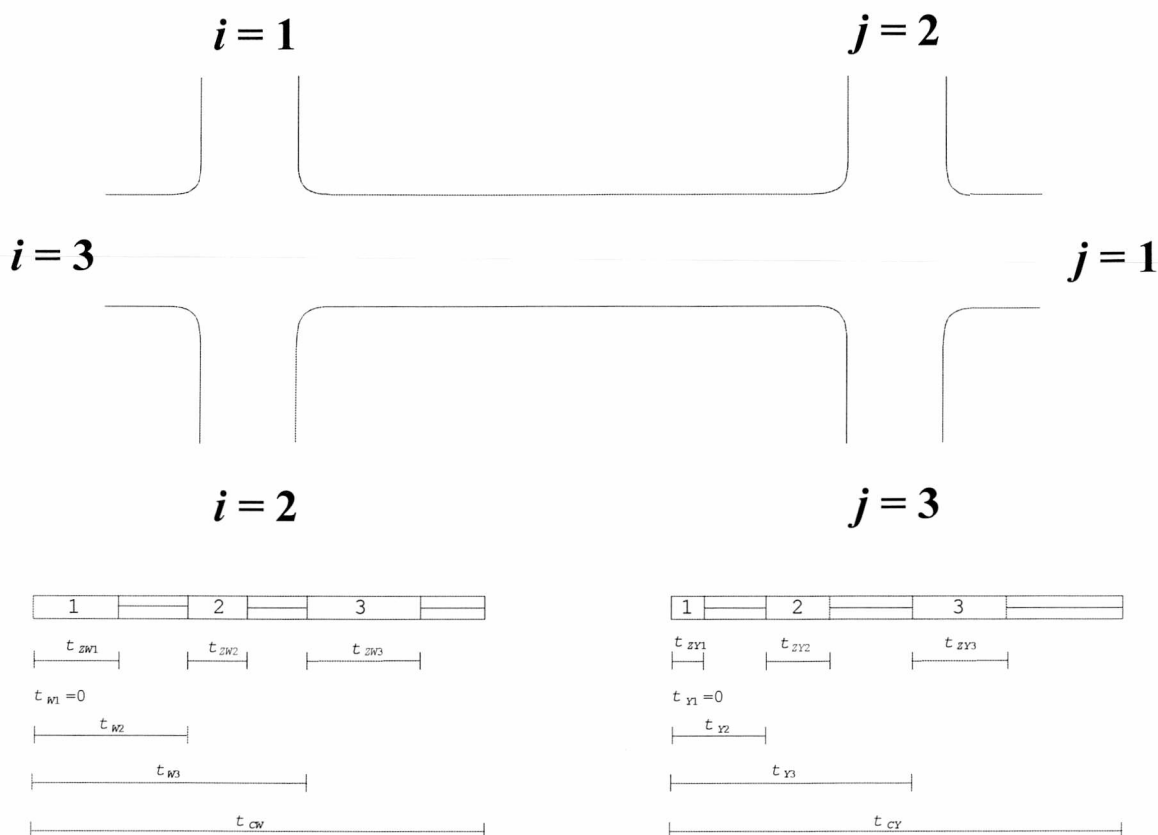
- $t_{CW}$  – długość cyklu (zakłada się stałą długość cyklu) [s];
- $t_{Wi}$  – moment rozpoczęcia się fazy dla relacji z kanału  $i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) [s];
- $t_{ZWi}$  – długość fazy dla relacji jak wyżej [s];

Na skrzyżowaniu Y także wyróżnia się 3 fazy sygnalizacji i stosuje powyższe oznaczenia, z tym że zamiast indeksu W wstawia się Y, a zamiast  $i - j$ . Sposób oznaczenia przedstawiono na rysunku 4.2.

Zaburzenie płynności ruchu i w konsekwencji ograniczenie przepustowości dotyczy miejsc w których dochodzi do zatrzymań pojazdów. Miejsca takie nazwane zostają **przekrojami krytycznymi**. Zatrzymania występują na przystankach oraz przed nimi, a także przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną (w modelowanym fragmencie sieci jest to skrzyżowanie Y). Wyróżnione zostają następujące przekroje krytyczne:

- SK – przekrój przed skrzyżowaniem Y;
- PR – przekrój na początku przystanku położonego na odcinku międzywęzłowym;
- PS – przekrój na początku przystanku położonego bezpośrednio przed skrzyżowaniem Y;

SP – przekrój na początku przystanku położonego bezpośrednio za skrzyżowaniem W.



Rysunek 4.2: Oznaczenia podziałów cykli na skrzyżowaniach W i Y

W pracy wyznaczona zostanie przepustowość przekrojów krytycznych. Przepustowość sieci lub jej fragmentu równa jest najmniejszej przepustowości przekrojów krytycznych na niej występujących.

## 4.2 Deterministyczny model ruchu

Czynniki określające płynność ruchu i wpływające na przepustowość podzielić można na deterministyczne i probabilistyczne.

Do pierwszej grupy należą: odległość między skrzyżowaniami, ilość relacji, długości cykli sygnalizacji i długości faz, kolejność faz, lokalizacja przystanków oraz ich forma, natężenia ruchu (proporcje natężeń) na poszczególnych relacjach i dopasowanie do nich programów sygnalizacji. Wszystkie te czynniki są stałe w danym momencie, ale mogą być zmieniane w toku reorganizacji systemu komunikacji

zbiorowej i zasad jego sterowania (np. ilość relacji) lub w toku przebudowy (np. forma przystanku).

Czynnikami losowymi są: prędkość pojazdów na odcinku międzywęzłowym, czas hamowania i przyspieszania pojazdów, odstępy zgłoszeń na wlotach pierwszego skrzyżowania (zależne od natężenia ruchu), moment zgłoszenia na wlocie pierwszego skrzyżowania w danym cyklu, czas wymiany pasażerów na przystanku, czy wreszcie czas reakcji kierujących pojazdami na zmianę świateł, zakończenie wymiany pasażerów lub zwolnienie drogi przejazdu przez poprzedzający pojazd.

Wielkość wpływu czynników losowych jest różna i zależy od rozrzutu zmiennych je opisujących. Z badań autora [65] wynika, że dla warunków ruchu odpowiadających modelowi sieci niniejszej pracy, wpływ czynników losowych na straty czasu pojazdów, wielkości określającej przepustowość, jest niewielki. Widoczne jest to szczególnie w przypadku niewielkich odległości między skrzyżowaniami, co jest charakterystyczne dla obszarów śródmiejskich. Dlatego do dalszych rozważań użyty zostanie **deterministyczny model ruchu**. Dla niżej określonych założeń modelu deterministycznego wyznaczone zostaną straty czasu i przepustowość przekrojów krytycznych. Zakres zastosowań przedstawionego modelu stosownie do zróżnicowania zmienności niektórych czynników (wg badań z rozdziału 3) oraz korekta jego wyników znajdują się w rozdziale 5.

W modelu deterministycznym zakłada się:

- Stałą prędkość pojazdów na odcinku międzywęzłowym, są to pojazdy jednego typu bądź o identycznych parametrach (przyspieszenie, opóźnienie hamowania);
- Czas wymiany pasażerów na przystankach o stałej wartości dla każdego z pojazdów;
- Możliwość optymalnego doboru natężeń ruchu na relacjach i momentów ich zgłoszeń na skrzyżowaniu W;
- Długości faz na obu skrzyżowaniach umożliwiające przejazd tylko jednego pojazdu w fazie;
- Przejazd pojazdu następuje zawsze na początku fazy odpowiadającej określonemu kanałowi (tzn. zakłada się bardzo krótki czas wyświetlania sygnału zielonego  $\approx 1$  s);
- Brak zróżnicowania czasu reakcji kierujących.

### 4.3 Straty czasu i przepustowość w przekrojach krytycznych

Wyznacznikiem przepustowości jest średni czas zajęcia przekroju krytycznego, który można utożsamić z minimalnym średnim odstępem między pojazdami. Wyraża to wzór (4.1). Na czas zajęcia przekroju krytycznego składają się elementy związane z obsługą pasażerów (pojazdu), tzw. czas operacyjny oraz straty czasu związane z oczekiwaniem na obsługę. Uwzględnienie jednego bądź obu tych elementów zależy od typu rozpatrywanego przekroju.

$$Q = \frac{3600}{t_{ZP\dot{S}P}} = \frac{3600}{h_{\min\dot{S}R}}, \quad (4.1)$$

gdzie:

$Q$  – przepustowość [P/h],

$t_{ZP\dot{S}R}$  – średni czas zajęcia przekroju krytycznego [s/P],

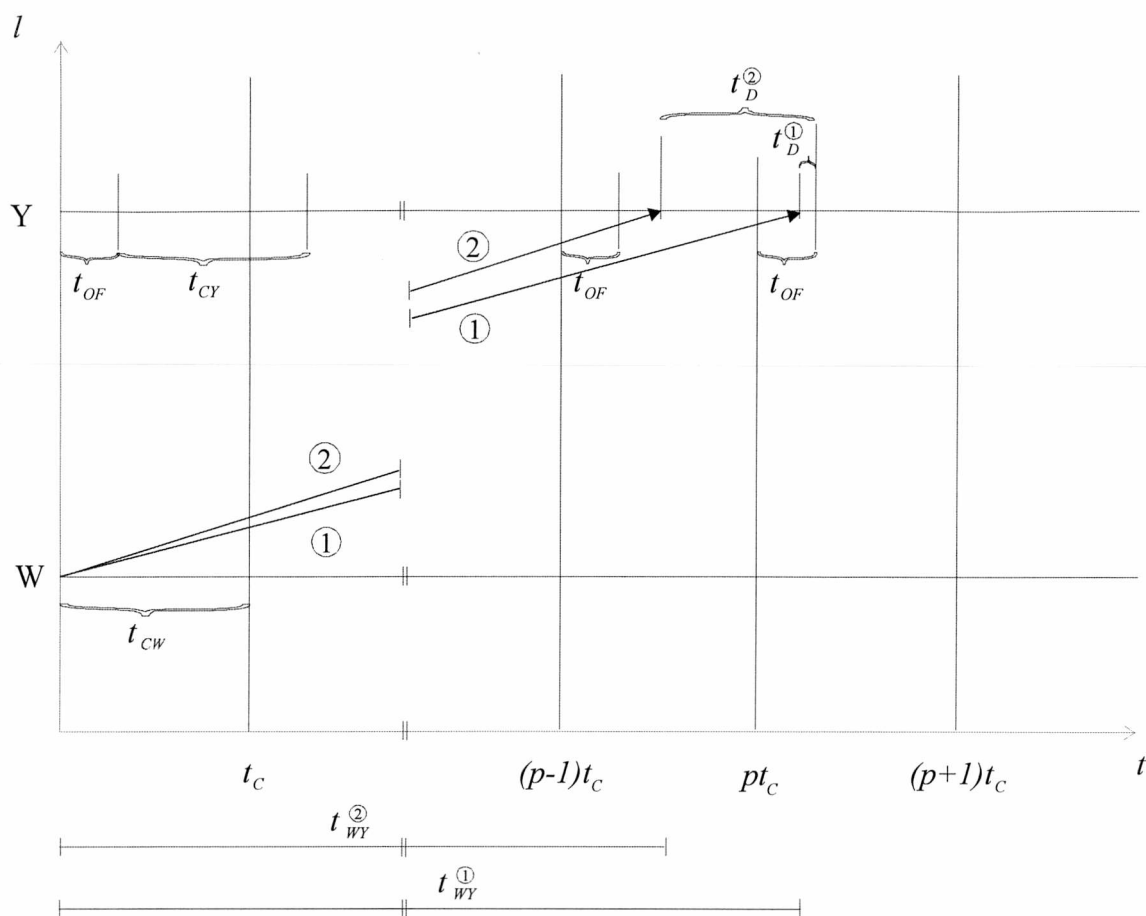
$h_{\min\dot{S}R}$  – średni minimalny odstęp między pojazdami [s/P].

Czas operacyjny jest w modelu deterministycznym stały. Pozostaje do obliczenia wielkość strat czasu oraz wyznaczenie rozwiązania z minimum strat określającego warunki uzyskania maksymalnej przepustowości.

#### 4.3.1 Przekrój typu SK

Pojazdy dojeżdżające do skrzyżowania Y nie zawsze trafiają na zielone światło. Przyczyną tego jest niedostateczne dopasowanie (koordynacja) programów sygnalizacji na skrzyżowaniach W i Y. W modelu deterministycznym dla pojedynczych relacji możliwe jest takie ustawienie przesunięcia czasowego początku programów dla obu skrzyżowań, aby nadjeżdżający pojazd idealnie trafiał na zielone światło. W tej sytuacji nie wystąpią straty czasu. W przypadku występowania wielu (wszystkich) relacji idealna koordynacja (bez strat dla każdego pojazdu) nie jest możliwa. Można jednak wskazać rozwiązanie optymalne, w którym średnia strat (w ciągu godziny) będzie najmniejsza. W tym celu sformułować należy problem optymalizacyjny.

Do dalszych rozważań przydatne będzie pojęcie: **czas dojazdu**. Wielkość ta określa moment w cyklu na skrzyżowaniu Y, w którym dojeżdża pojazd relacji 1 – 1. Przedstawiono ją na rys. 4.3.



Rysunek 4.3: Zasada wyznaczenia czasu  $t_p$

Czas dojazdu można obliczyć z zależności (4.2)

$$t_D = p * t_C + t_{OF} - t_{WY}, \quad (4.2)$$

gdzie:

$t_C$  – długość cyklu dla skrzyżowań W i Y ( $t_{CW} = t_{CY}$ ) [s],

 $t_D -$  czas dojazdu [s], $t_{WY}$  – czas przejazdu odcinka międzywęzłowego W – Y [s],

$t_{OF}$  – przesunięcie fazowe między początkami cykli dla skrzyżowań W i Y [s],

$p$  – liczba całkowita wyznaczona wg (4.3)

$$(p - 1) t_C \leq t_W - t_{OF} < p * t_C. \quad (4.3)$$

Dla dowolnej relacji  $i - j$  czas oczekiwania na zielone światło (strata czasu) można obliczyć ze wzoru (4.4),

dla  $t_{Wi} \leq t_{Yj}$  :

$$S_{ij} = \begin{cases} t_D + t_{Yj} - t_{Wi}, & \text{dla } t_D + t_{Yj} - t_{Wi} \leq t_C \\ t_D + t_{Yj} - t_{Wi} - t_C, & \text{dla } t_D + t_{Yj} - t_{Wi} > t_C, \end{cases}$$

dla  $t_{Wi} > t_{Yj}$  :

$$S_{ij} = \begin{cases} t_D + t_{Yj} - t_{Wi}, & \text{dla } t_D + t_{Yj} - t_{Wi} > 0 \\ t_D + t_{Yj} - t_{Wi} + t_C, & \text{dla } t_D + t_{Yj} - t_{Wi} \leq t_C, \end{cases} \quad (4.4)$$

gdzie:

$S_{ij}$  – strata czasu dla pojazdów relacji  $ij$  [s].

Średnia strata czasu jest średnią ważoną (uwzględniającą zróżnicowanie natężeń ruchu na relacjach) ze strat czasu pojazdów wszystkich relacji (4.5)

$$S = \sum_i \sum_j S_{ij} \cdot w_{ij}, \quad (4.5)$$

gdzie:

$w_{ij}$  – ważne natężenie ruchu na relacji  $ij$  wyznaczone z (4.6) [-]

$$w_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_i \sum_j N_{ij}}, \quad (4.6)$$

gdzie:

$N_{ij}$  – natężenie ruchu na relacji  $ij$  [P/h].

### **Sformułowanie zadania optymalizacyjnego.**

Jako kryterium optymalizacji przyjęto minimalizację średnich strat czasu dla wszystkich pojazdów komunikacji zbiorowej. Funkcja celu ma postać (4.5) z uwzględnieniem (4.4) i (4.6). Występuje 16 zmiennych decyzyjnych związanych z natężeniami ruchu na relacjach ( $w_{ij}$  dla  $i, j = 1, 2, 3$ ), podziałem cykli na fazy ( $t_{W1}, t_{W2}, t_{W3}, t_{Y1}, t_{Y2}, t_{Y3}$ ) oraz czasem przejazdu między W-Y i offsetem sygnalizacji ( $t_D$ ). Przyjęto, że zmienne te mają charakter dyskretny. Wagi  $w_{ij}$  mogą przyjmować wartości ułamkowe postaci  $1/p$ , gdzie  $p$  jest liczbą całkowitą z przedziału [3,21]. Pozostałe zmienne są całkowite dodatnie (przyjmują wartości pełnych sekund). Optymalizacja wykonywana jest dla założonej (stałej) długości cyklu.

Na zmienne decyzyjne nałożono następujące warunki ograniczające:

- (4.7) i (4.8) oznaczające, że początek pierwszych faz na obu skrzyżowaniach przyjęto w momencie rozpoczęcia cyklu,
- (4.9) ÷ (4.12) odzwierciedlające minimalny czas trwania fazy wraz z sygnałem międzyzielonym (założono 15 [s]),

- (4.13) i (4.14) wynikające z kolejności faz),
- (4.15) i (4.16) oznaczające, że jako pierwszą należy wybrać fazę, przed którą występuje największy odstęp między momentami rozpoczęcia faz,
- (4.17) odpowiadający ograniczeniom na czas dojazdu (4.2) i (4.3),
- (4.18) określający taki podział natężeń pomiędzy relacje, aby możliwe było uzyskanie jak największego natężenia ruchu z kanałów źródłowych,

$$t_{W1} = 0, \quad (4.7)$$

$$t_{Y1} = 0, \quad (4.8)$$

$$t_{W2} \geq 15, \quad (4.9)$$

$$t_{Y2} \geq 15, \quad (4.10)$$

$$t_{W3} \geq 30, \quad (4.11)$$

$$t_{Y3} \geq 30, \quad (4.12)$$

$$t_{W3} \geq t_{W2}, \quad (4.13)$$

$$t_{Y3} \geq t_{Y2}, \quad (4.14)$$

$$t_{W3} \leq 2/3 t_C, \quad (4.15)$$

$$t_{Y3} \leq 2/3 t_C, \quad (4.16)$$

$$t_D < t_C, \quad (4.17)$$

$$\hat{i} \sum_j w_{ij} = 1/3. \quad (4.18)$$

### **Rozwiązanie zadania.**

Nie jest możliwe analityczne wyznaczenie optimum funkcji celu. Natomiast rozwiązanie numeryczne metodą przeglądu kolejnych (wszystkich) wyników z wykorzystaniem komputera nie nastręcza większych trudności. Wyniki uzyskano za pomocą programu OPTIMUM napisanego w języku Pascal na komputer klasy PC.

Optimum funkcji celu uzyskano dla wielu możliwych wartości zmiennych decyzyjnych. Podać można uogólnione rozwiązanie słuszne dla cykli o długościach z przedziału 60÷120 [s]. Minimum strat czasu wystąpi gdy:  $w_{11} = w_{22} = w_{33} = 1/6$  i pozostałe  $w_{ij} = 1/12$  oraz  $t_{W2} = t_{Y2} = 15$  [s],  $t_{W3} = t_{Y3} = 30$  [s] i  $t_D = 0$  [s]. Straty te wyniosą  $S = 0.25 t_C$ .

Straty powstające w wyniku niedopasowania faz sygnalizacji do poszczególnych relacji nie są jedynymi które wystąpią w modelu deterministycznym. Czasami mimo wyświetlania sygnału zielonego właściwego dla pojazdu określonej relacji nie jest możliwy jego przejazd. Wystąpi to wtedy, gdy w tym samym momencie (cyklu)



poprzedzający pojazd innej relacji oczekiwał będzie na rozpoczęcie „swojej” fazy i tym samym blokował przejazd innym pojazdom. Stąd wyznaczone wyżej straty  $S$ , nie uwzględniające blokowania, słuszne są jedynie w przypadku rozdzielenia torów ruchu dla pojazdów zmierzających do różnych kanałów docelowych i zapewnieniu tym torom odpowiedniej długości (tak by pomieściły wszystkie oczekujące pojazdy).

Zjawisko blokowania wystąpi przy dużych natężeniach ruchu na relacjach, to znaczy przy natężeniach zbliżających się do maksimum. Maksymalne natężenie w kanale źródłowym z uwzględnieniem założeń modelu określa formuła (4.19)

$$N_{\max}^i = \frac{3600}{t_c}, \quad (4.19)$$

gdzie:

$N_{\max}^i$  – maksymalne natężenie na wlocie  $i$  skrzyżowania  $W$  [P/h].

W dalszych rozważaniach wykorzystywany będzie wskaźnik obciążenia relacji, który można rozumieć jako prawdopodobieństwo wystąpienia danej relacji w cyklu. Wskaźnik obciążenia relacji definiuje formuła (4.20).

$$\nu_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_{\max}^i}, \quad (4.20)$$

gdzie:

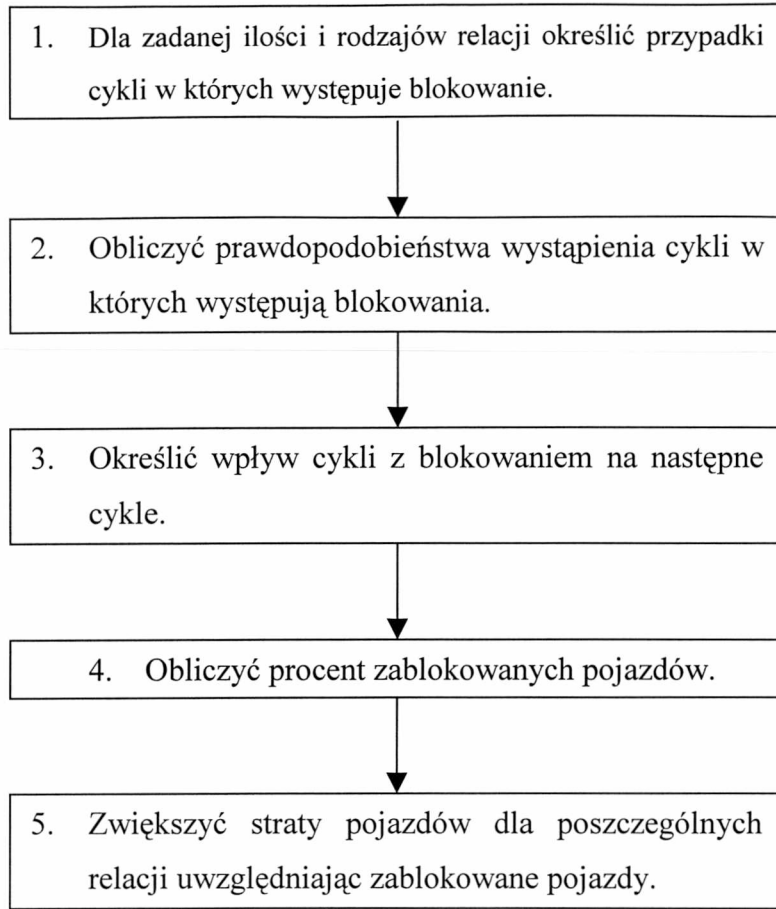
$\nu_{ij}$  – wskaźnik obciążenia relacji  $ij$  [-].

Straty czasu uwzględniające blokowanie wyznaczone zostaną za pomocą procedury przedstawionej schematycznie na rysunku 4.4.

Analizy przeprowadzono dla: 9 (wszystkich) relacji jako przypadku najbardziej złożonego oraz dla 4 relacji (1-1, 1-2, 2-1, 2-2) jako przypadku częstego w praktyce.

Kiedy przez analizowany odcinek przebiega 9 relacji, wtedy spośród możliwych przypadków zgłoszeń pojazdów na skrzyżowaniu  $Y$  w danym cyklu  $p$  możliwe są następujące sytuacje, które owocują powstawaniem blokad:

1. zgłaszają się pojazdy z dwu różnych kanałów źródłowych do tego samego kanału docelowego;
2. zgłaszają się pojazdy z trzech różnych kanałów źródłowych do tego samego kanału docelowego;
3. zgłaszają się pojazdy z trzech różnych kanałów źródłowych, przy czym dwa z nich do jednego z kanałów docelowych.



Rysunek 4.4: Schemat blokowy procedury wyznaczenia strat uwzględniających blokowanie

Przypadki te przedstawiono na rysunku 4.5. Wynika z niego, że blokowanie może dotyczyć następnego cyklu ( $p+1$ ) albo dwóch następnych ( $p+1$  i  $p+2$ ). Blokowanie tylko następnego cyklu będzie nazywane blokowaniem pojedynczym, a blokowanie dwóch cykli – podwójnym.

Prawdopodobieństwo wystąpienia w cyklu  $p$  trzech relacji  $ij$ ,  $kl$ ,  $mn$  określa formuła (4.21), a prawdopodobieństwo wystąpienia w cyklu  $p$  dwu relacji  $ij$ ,  $kl$  (przy braku relacji z kanału źródłowego  $m$ ) określa formuła (4.22),

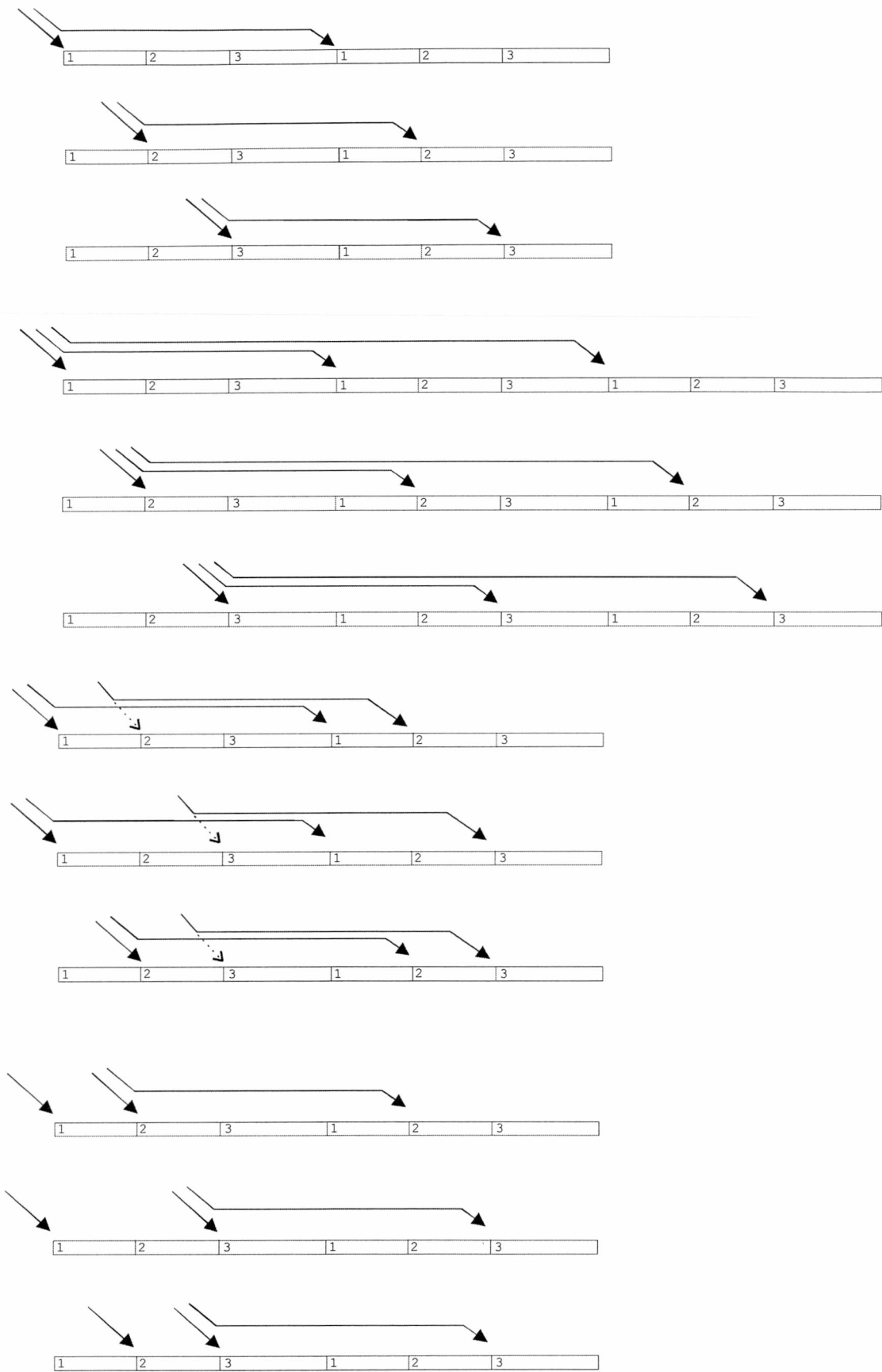
$$P^{\text{III}} = v_{ij} v_{kl} v_{mn}, \quad (4.21)$$

$$P^{\text{II}} = v_{ij} v_{kl} P_{Bm}, \quad (4.22)$$

gdzie:

$P_{Bm}$  - prawdopodobieństwo braku relacji z kanału źródłowego  $m$  (określane według wzoru (4.23))

$$P_{Bm} = 1 - \sum_j v_{mj}. \quad (4.23)$$



Rysunek 4.5: Przypadki wystąpienia blokowania dla 9 relacji

W każdym z przypadków blokowania jeden lub dwa pojazdy przejeżdżają przez przekrój Y w fazie odpowiadającej ich relacji zamiast w cyklu  $p$  w cyklu  $p+1$  lub  $p+2$ . Jeżeli w tych cyklach zgłoszą się następne pojazdy dojdzie do ich zablokowania. Można wyznaczyć wskaźnik wpływu na kolejne cykle stosownie do potencjalnie zablokowanych relacji docelowych. Wskaźnik wpływu pomnożony przez prawdopodobieństwo wystąpienia relacji do określonych kanałów docelowych poda prawdopodobieństwo wystąpienia blokady i procent zablokowanych pojazdów. Istnieje 6 wskaźników wpływu:

- trzy wskaźniki wpływu na relacje w cyklu  $p + 1$ , oznaczane stosownie do numeracji kanałów docelowych:  $WW_j$ ;
- trzy wskaźniki wpływu na relacje w cyklach:  $p + 1$  i  $p + 2$ , nazywane wskaźnikami podwójnego wpływu, oznaczane stosownie do numeracji kanałów docelowych:  $WP_j$ .

Prawdopodobieństwo zablokowania pojazdu relacji do kanału docelowego  $j$  przy blokowaniu pojedynczym wynosi (4.24), a przy blokowaniu podwójnym (4.25)

$$P_{Wj} = WW_j \nu_j, \quad (4.24)$$

$$P_{Pj} = WP_j \nu_j, \quad (4.25)$$

gdzie:

$P_{Wj}$ ,  $P_{Pj}$  – procent zablokowanych pojazdów (pojedynczo i podwójnie) dla relacji odpowiadających kanałom docelowym  $j$  [-],

$\nu_j$  – prawdopodobieństwo wystąpienia pojazdów relacji  $ij$  w następnym cyklu określane według (4.26) [-]

$$\nu_j = \sum_i \nu_{ij} . \quad (4.26)$$

Pojazdy zablokowane same mogą blokować pojazdy nadjeżdżające w kolejnych cyklach. Można mówić o drugim i kolejnych poziomach blokowania. Będzie to występowało z malejącym prawdopodobieństwem zależnym od wskaźników obciążenia relacji. Wyznaczyć można wskaźniki wpływu oraz prawdopodobieństwa wystąpienia blokad dla kolejnych poziomów blokowania. Ogólnie prawdopodobieństwo wystąpienia blokady w  $K$ - tym cyklu od rozpoczęcia blokady dla blokad pojedynczych i podwójnych wyrażają formuły (4.27) i (4.28)

$$P_{Wj}^K = \nu_j^K \cdot [WW_j^K + WW_j^L \cdot WP_j^{(K-L)}], \quad (4.27)$$

$$P_{pj}^K = v_j^K \cdot [WP_j^K + WP_j^L \cdot WW_j^{(K-L)}], \quad (4.28)$$

gdzie:

$P_{wj}^K, P_{pj}^K$  – procent zablokowanych pojazdów (pojedynczo i podwójnie) dla relacji odpowiadających kanałom docelowym  $j$  w cyklu  $p + K$  [-],

$L = 0.5 K$  z zaokrągleniem w górę.

Prawdopodobieństwo blokowania według zależności (4.27) i (4.28) obliczać można teoretycznie dla dowolnie dużych  $K$ . W praktyce wystarczy zakończyć obliczenia przy  $K$  dla którego prawdopodobieństwo blokowania jest pomijalnie małe. W dalszych obliczeniach przyjęto za pomijalnie małe prawdopodobieństwo równe 0,01. Należy zauważyć, że zarówno dla różnych  $j$ , jak i dla  $P_w$  i  $P_p$  otrzymać można praktycznie różne wartości  $K$ . Dlatego do dalszych rozważań wprowadza się oznaczenia:

$K_{1j}$  – liczba istotnych poziomów blokowania pojedynczego dla relacji do kanału docelowego  $j$  [-],

$K_{2j}$  – liczba istotnych poziomów blokowania podwójnego dla relacji do kanału docelowego  $j$  [-].

Całkowity procent zablokowanych pojazdów wyrażają wyrażenia (4.29) i (4.30)

$$B_{1j} = \sum_{K_{1j}} P_{wj}^K, \quad (4.29)$$

$$B_{2j} = \sum_{K_{2j}} P_{pj}^K, \quad (4.30)$$

gdzie:

$B_{1j}, B_{2j}$  – całkowity procent pojazdów relacji  $ij$  zablokowanych pojedynczo i podwójnie [-].

Straty uwzględniające blokowanie wyniosą (4.31):

$$S_{Bij} = S_{ij} + t_C B_{1j} + 2 t_C B_{2j}, \quad (4.31)$$

gdzie:

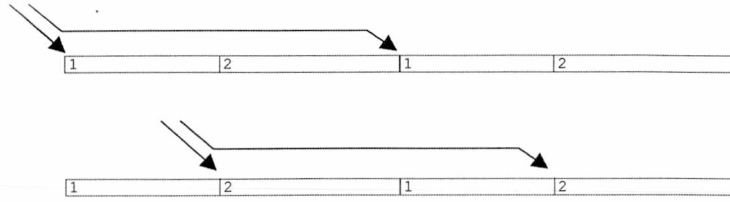
$S_{Bij}$  – straty pojazdów relacji  $ij$  uwzględniające blokowanie [s/P].

Średnią stratę z uwzględnieniem blokowania należy obliczyć z zależności (4.32)

$$S_B = \sum_i \sum_j S_{Bij} \cdot w_{ij}. \quad (4.32)$$

Kiedy przez analizowany odcinek międzywęzłowy przebiegają 4 relacje (1-1, 1-2, 2-1, 2-2) może dochodzić jedynie do blokowania pojedynczego. Przypadki blokowania dla 4 relacji przedstawiono na rysunku 4.6. W tej sytuacji obliczenia wskaźników

wpływu oraz strat uwzględniających blokowanie znacznie się upraszczają. Dalsze analizy zostaną przeprowadzone dla bardziej złożonej sytuacji z dziewięcioma relacjami.



Rysunek 4.6: Przypadki występowania blokad dla 4 relacji

Dla przyjętych optymalnych rozdziałów natężeń ruchu pomiędzy relacje suma wskaźników  $v_{ij}$  dla poszczególnych wlotów i jest taka sama i wynosi  $v_{SR}$ . Wskaźnik  $v_{SR}$  obliczany jest według wzoru (4.33)

$$v_{SR} = \sum_j v_{ij} . \quad (4.33)$$

Na rysunku 4.7 przedstawiono zależność strat  $S_B$  od średniego współczynnika obciążenia kanału źródłowego  $v_{SR}$ . Straty  $S_B$  obliczono za pomocą programu STRATA napisanego w języku Pascal na komputer klasy PC.

Możliwa jest aproksymacja strat funkcją wykładniczą postaci (4.34) ze współczynnikiem korelacji Pearsona  $r = 0.997$

$$S_B = t_C [0.29 + e^{-8.00 + 9.70 v_{SR}}] . \quad (4.34)$$

Przepustowość przekroju typu SK zależy od obciążenia kanałów źródłowych wyrażanego poprzez  $v_{SR}$ . Dla małych obciążeń występują niewielkie straty czasu ( $S_B$  praktycznie równa się  $S$ ), ale duże są minimalne odstęp między pojazdami  $h_{min}$  wyrażone zależnością (4.35)

$$h_{min} = \frac{t_C}{3 \cdot v_{SR}} . \quad (4.35)$$

Wykorzystując (4.1) przepustowość przekroju typu SK można określić zależnością (4.36)

$$Q_{SK1} = \frac{3 \cdot 3600}{t_C} \cdot v_{SR} . \quad (4.36)$$

Wzór (4.36) jest prawdziwy dopóki  $h_{min} \geq S_B$ . Dla pewnego  $v_G$ , które będzie nazywane granicznym, blokowanie pojazdów decyduje o przepustowości, gdyż straty czasu powodowane przez blokujące pojazdy przekraczają wartość potencjalnych

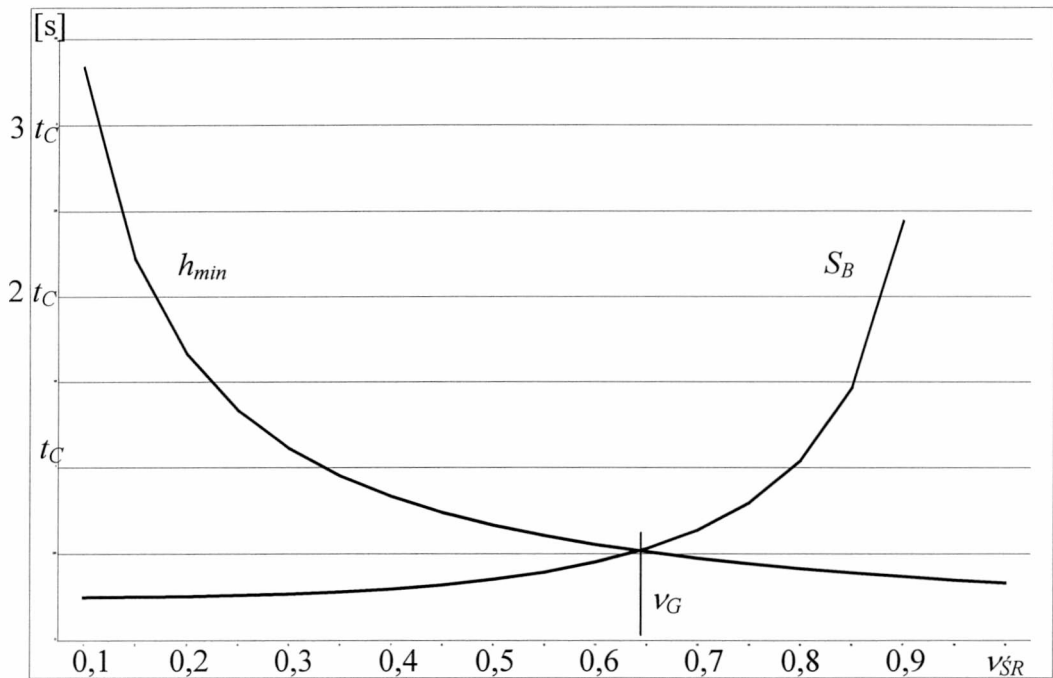
minimalnych odstępów między pojazdami. Dla  $v_{SR} \geq v_G$  przepustowość należy określać według (4.37)

$$Q_{SK2} = \frac{3600}{S_B}. \quad (4.37)$$

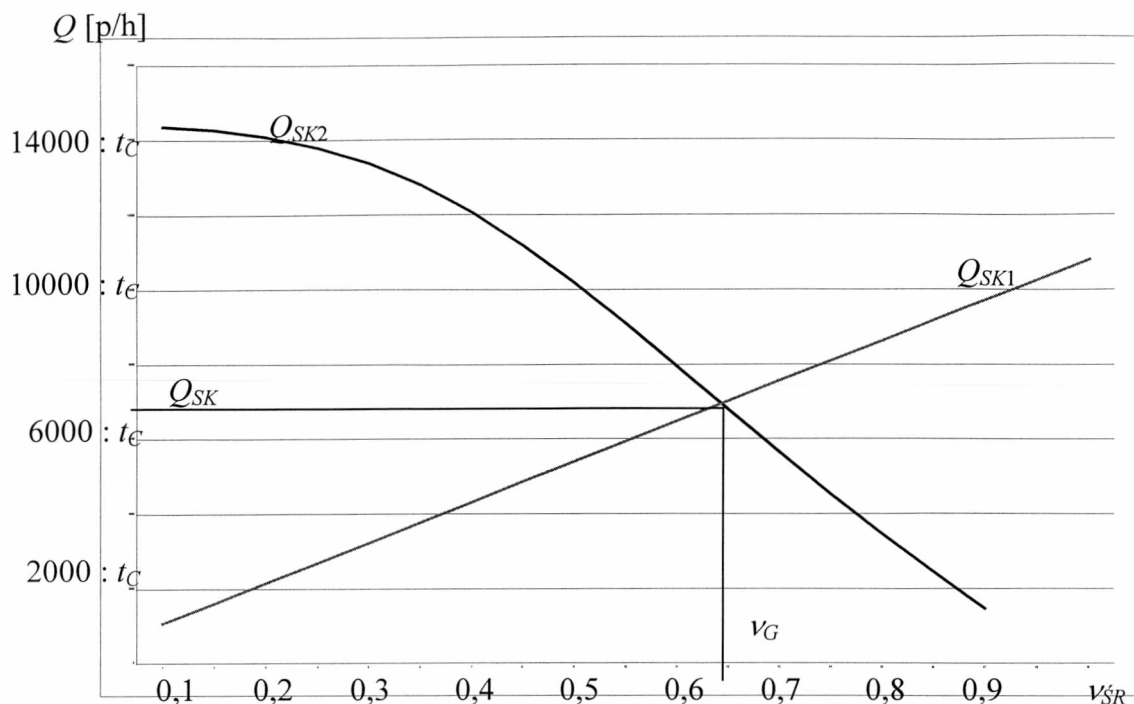
Należy pamiętać, że we wzorze (4.37)  $S_B$  jest funkcją  $v_{SR}$ . Jednocześnie  $v_G$  wyznacza maksymalną przepustowość przekroju typu SK dla cyklu o długości  $t_C$  (4.38)

$$Q_{SK} = \frac{3 \cdot 3600}{t_C} \cdot v_G. \quad (4.38)$$

Wartość wskaźnika  $v_G = 0,64$  wyznaczono graficznie. Na rysunku 4.8 wykreślono krzywe  $Q_{SK1}$ ,  $Q_{SK2}$  oraz zaznaczono przepustowość  $Q_{SK}$ .



Rysunek 4.7: Wielkość strat czasu uwzględniających blokowanie ( $S_B$ ) oraz minimalnych odstępów między pojazdami ( $h_{min}$ ) w przekroju SK jako funkcja obciążenia kanału źródłowego



Rysunek 4.8: Przepustowość przekroju typu SK jako funkcja obciążenia kanału źródłowego

Maksymalne możliwe natężenie ruchu z kanałów źródłowych określone jest przez wskaźnik  $\nu_G = 0,64$ . Wartość przepustowości zależy od długości cyklu (4.38). Im dłuższy cykl, tym mniejsza przepustowość.

#### 4.3.2 Przekrój typu PR

Maksymalne wykorzystanie przystanku zajdzie wtedy, kiedy pojazdy będą zgłaszały się jeden za drugim. Czas zajęcia przekroju krytycznego będzie składał się w tym przypadku z dwóch elementów: czasu wymiany pasażerów oraz czasu operacyjnego obejmującego wjazd pojazdu na przystanek (i zarazem wyjazd pojazdu poprzedzającego) z zachowaniem minimalnego odstępu bezpieczeństwa między pojazdami oraz czas potrzebny na otwarcie i zamknięcie drzwi. Stąd czas zajęcia przekroju typu PR można wyrazić następująco (4.39):

$$t_{ZP} = t_W + t_O, \quad (4.39)$$

gdzie:

$t_W$  – czas wymiany pasażerów [s],

$t_O$  – czas operacyjny [s].



Podstawiając (4.39) do wzoru (4.1) uzyskuje się formułę na przepustowość przystanku z jednym (4.40) i dwoma stanowiskami postojowymi (4.41)

$$Q_{PR1} = \frac{3600}{t_W + t_O}, \quad (4.40)$$

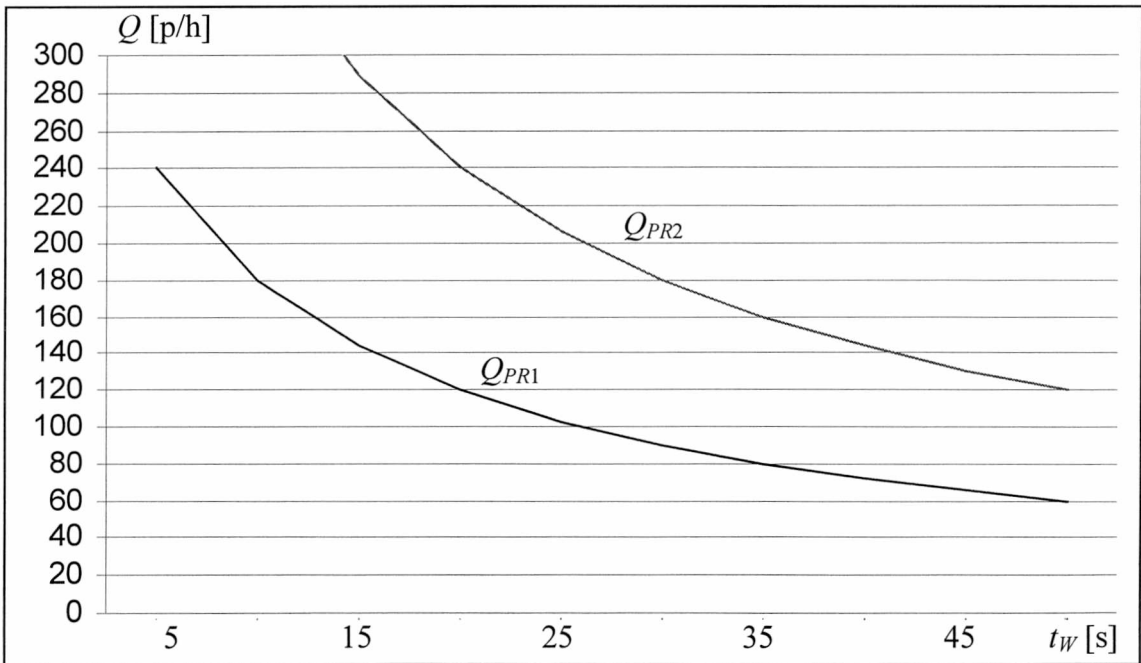
$$Q_{PR2} = 2 \cdot \frac{3600}{t_W + t_O}, \quad (4.41)$$

gdzie:

$Q_{PR1}$  – przepustowość przystanku z jednym stanowiskiem postojowym [P/h],

$Q_{PR2}$  – przepustowość przystanku z dwoma stanowiskami postojowymi [P/h].

Na rysunku 4.9 przedstawiono przepustowość przystanków z jednym i dwoma stanowiskami postojowymi dla różnych długości czasu wymiany pasażerów. Przyjęto, wykorzystując badania własne publikowane w [66], czas operacyjny o długości 10 s. Taka wartość czasu operacyjnego jest charakterystyczna dla typowych składów pociągów tramwajowych (dwa wagony 105N lub jeden wagon 102N) oraz dla autobusów przegubowych. W przypadku występowania dużej ilości pojazdów innych typów wartości czasu operacyjnego i zarazem przepustowości ulegną zmianie.



Rysunek 4.9: Przepustowość przekroju typu PR dla różnych czasów wymiany pasażerów

Przepustowość przystanku maleje wraz ze wzrostem czasu wymiany pasażerów.

### 4.3.3 Przekrój typu PS

W przypadku lokalizacji przystanku bezpośrednio przed sygnalizacją świetlną na czas zajęcia przystanku nakładają się straty związane z oczekiwaniem na zielone światło właściwe dla danej relacji. Wstępnie analizowany jest przystanek z jednym stanowiskiem postojowym. Czas zajęcia przekroju typu PS dla relacji  $ij$  wynosi (4.42):

$$t_{ZPij} = t_O + S_{Mij}, \quad (4.42)$$

gdzie:

$S_{Mij}$  – czas postoju na przystanku przed sygnalizacją świetlną pojazdów relacji  $ij$  (straty zmodyfikowane), wyznaczany według (4.43) [s]

$$S_{Mij} = \begin{cases} t_W, & \text{dla } S_{ij} \leq t_W \\ S_{ij}, & \text{dla } S_{ij} > t_W. \end{cases} \quad (4.43)$$

Czas  $S_M$  uwzględnia straty czasu pojazdów  $S$ , bez blokowania (blokowane pojazdy oczekują przed przystankiem) spełniające warunek minimalnego postoju na przystanku wynikający z długości czasu wymiany pasażerów. Średni czas zajęcia uwzględniający różnice natężeń na relacjach opisuje formuła (4.44)

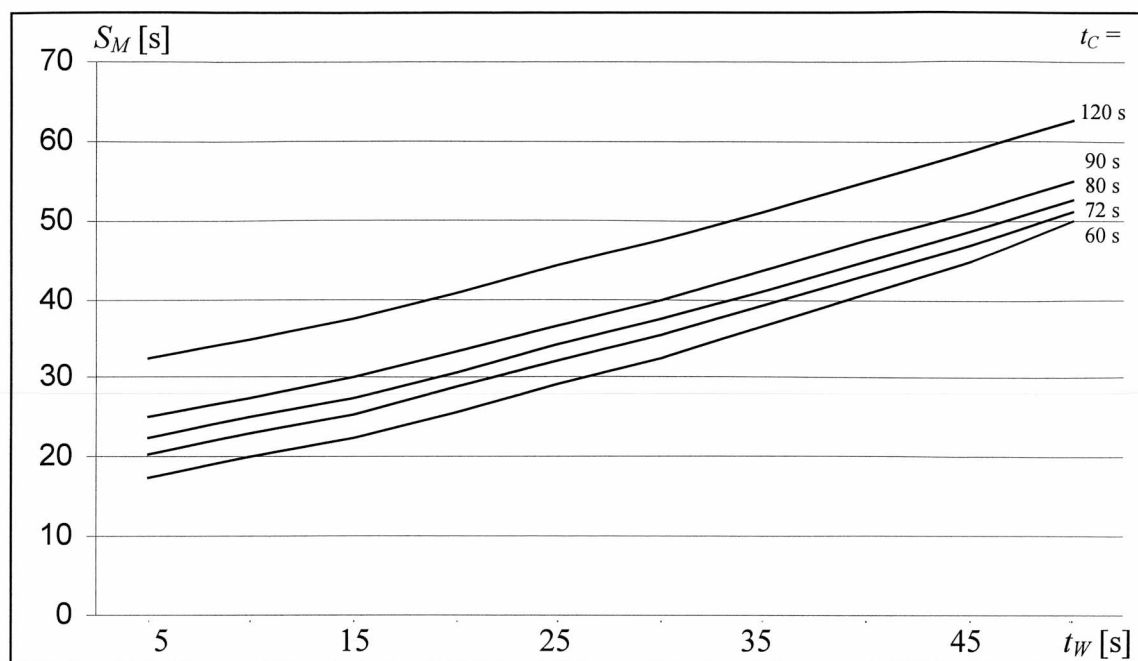
$$t_{ZP} = \sum_i \sum_j t_{ZPij} \cdot w_{ij} = t_O + S_M, \quad (4.44)$$

gdzie:

$$S_M = \sum_i \sum_j S_{Mij} \cdot w_{ij}.$$

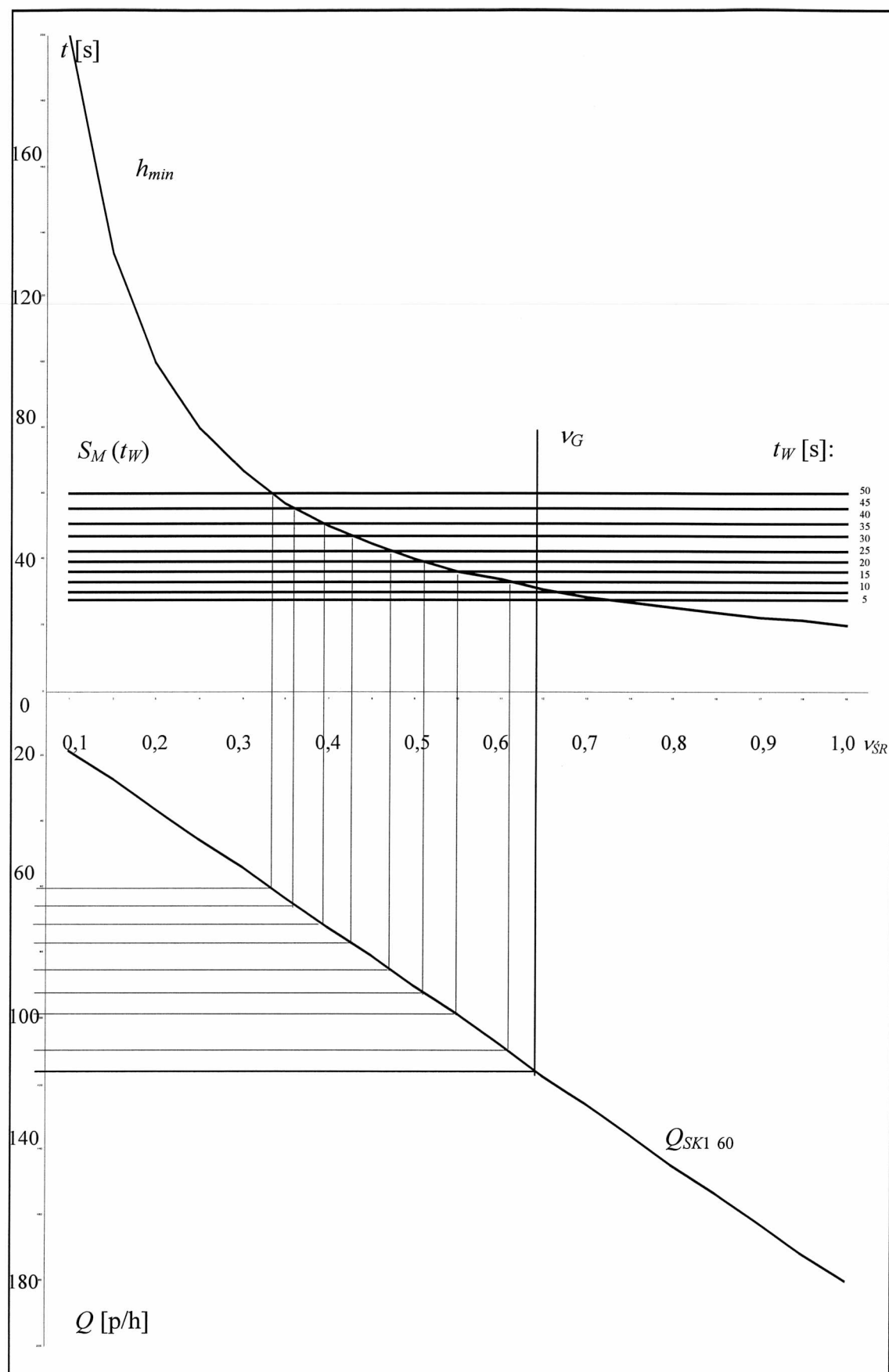
Przepustowość przekroju z jednym stanowiskiem postojowym PSY określić można wg wzoru (4.38). W tym jednak wypadku wartość graniczna wskaźnika  $v_G$  jest zmienna i zależy od czasów  $t_{ZP}$  i  $t_C$ . W celu wyznaczenia wartości wskaźnika  $v_G$  obliczono czasy  $S_M$  dla typowych długości cykli (60, 72, 80, 90 i 120 [s]) i czasów wymiany pasażerów z przedziału 5 ÷ 50 [s]. Dokonano tego za pomocą programu STRATY2 napisanego w języku Pascal na komputer klasy PC. Wyniki przedstawiono na rys.4.10. Wartość  $S_M$  rośnie wraz ze wzrostem czasu wymiany pasażerów i wzrostem długości cyklu.

Następnie przyjęto czas operacyjny  $t_O=10$  s i po dodaniu do  $S_M$  uzyskano wartości  $t_{ZP}$ . Graficzne wyznaczenie wartości wskaźnika  $v_G$  oraz odpowiadających mu przepustowości dla cyklu o długości 60 s przedstawiono na rysunku 4.11, a analogiczne wielkości dla cyklu o długości 90 s na rysunku 4.12.

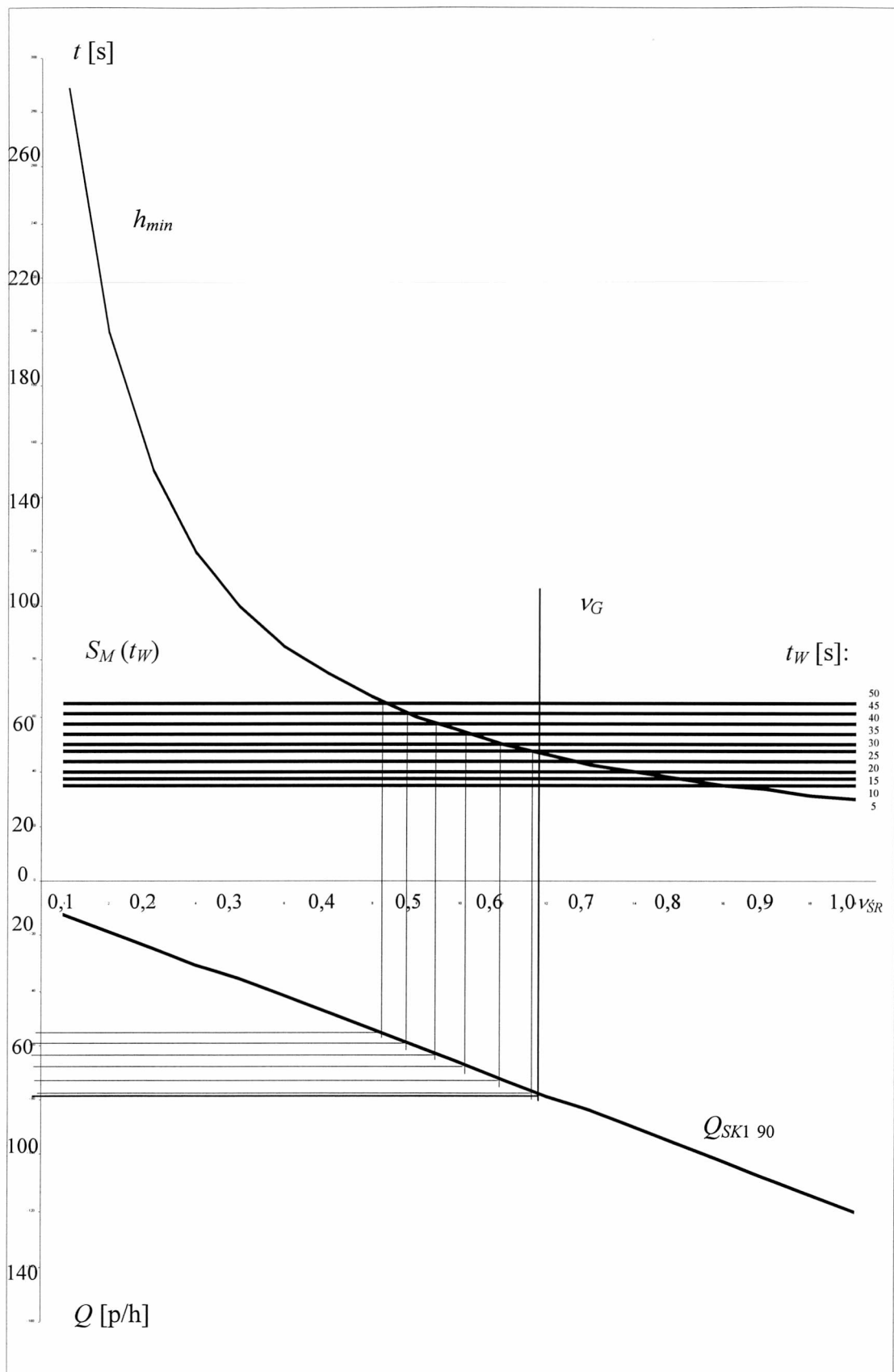


Rysunek 4.10: Czas postoju pojazdów na przystanku z jednym stanowiskiem przed sygnalizacją świetlną,  $S_M$  [s] jako funkcja czasu wymiany pasażerów

Dla dłuższych cykli krótki czas wymiany pasażerów nie wpływa na przepustowość przystanku położonego przed sygnalizacją, ponieważ blokowanie określa niższy wskaźnik obciążenia  $v_G$  niż wynikający z wydłużonego czasu postoju. Dopiero od pewnej wartości czasu wymiany pasażerów wskaźnik obciążenia i zarazem przepustowość są niższe niż w sytuacji bez przystanku (przekrój typu SK). Wartość ta zależy od długości cyklu i jest większa dla dłuższych cykli. Dla cyklu 60 s wynosi około 9 s, a dla cyklu 90 s około 22 s. Oznacza to, że przepustowość przystanków położonych przed sygnalizacją przy dłuższych cyklach jest mniej wrażliwa na zmiany długości czasu wymiany pasażerów.



Rysunek 4.11: Wyznaczenie granicznych wskaźników obciążenia przy różnym czasie wymiany pasażerów i przepustowości przekroju typu  $PS_1$  dla  $t_c = 60$  s



Rysunek 4.12: Wyznaczenie granicznych wskaźników obciążenia przy różnym czasie wymiany pasażerów i przepustowości przekroju typu PS<sub>1</sub> dla  $t_c = 90$  s

Dodatkowo należy sprawdzić przepustowość przekroju usytuowanego tuż przed przystankiem. Przy obliczaniu strat  $S_{ij}$  należy założyć fikcyjny przekrój  $Y'$  i odpowiednio zmodyfikować czasy:  $t_D$  i  $t_{Yj}$ . Formuła na czasy  $t'_D$  i  $t'_{Yj}$  ma postać (4.45):

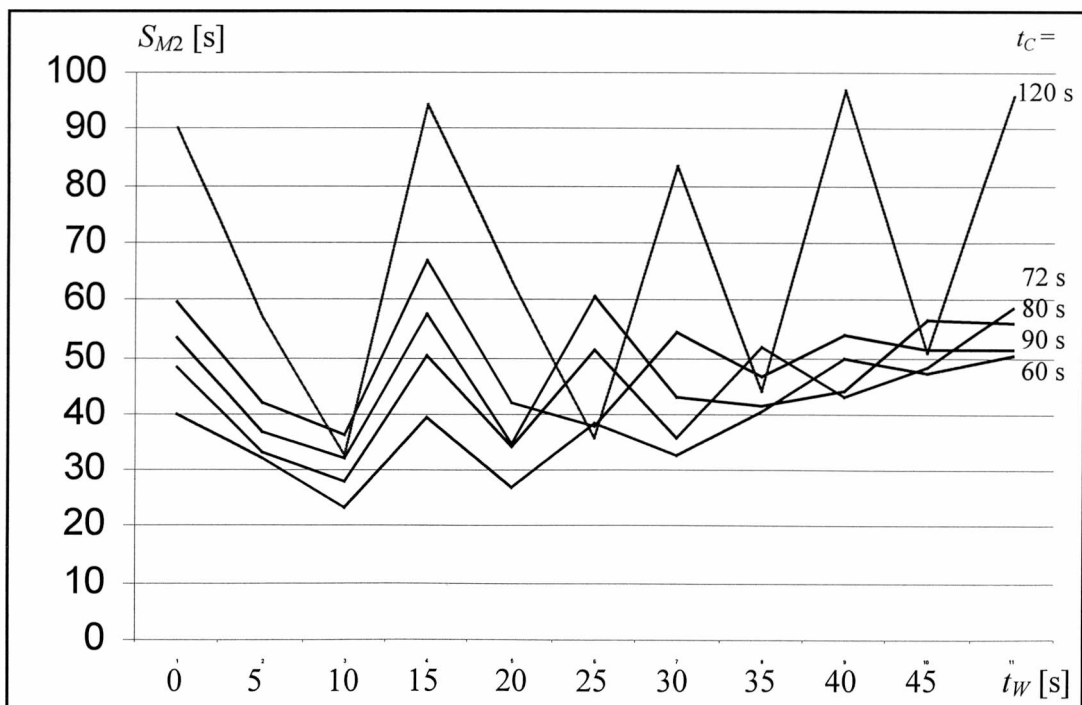
$$t' = \begin{cases} t - S_{M1}, & \text{dla } t - S_{M1} > 0 \\ t - S_{M1} + t_C, & \text{dla } t - S_{M1} \leq 0 \wedge t + t_C - S_{M1} > 0 \\ t - S_{M1} + p t_C, & \text{dla } t + p t_C - S_{M1} \leq 0 \wedge t + (p - 1) t_C - S_{M1} > 0, \end{cases} \quad (4.45)$$

gdzie:

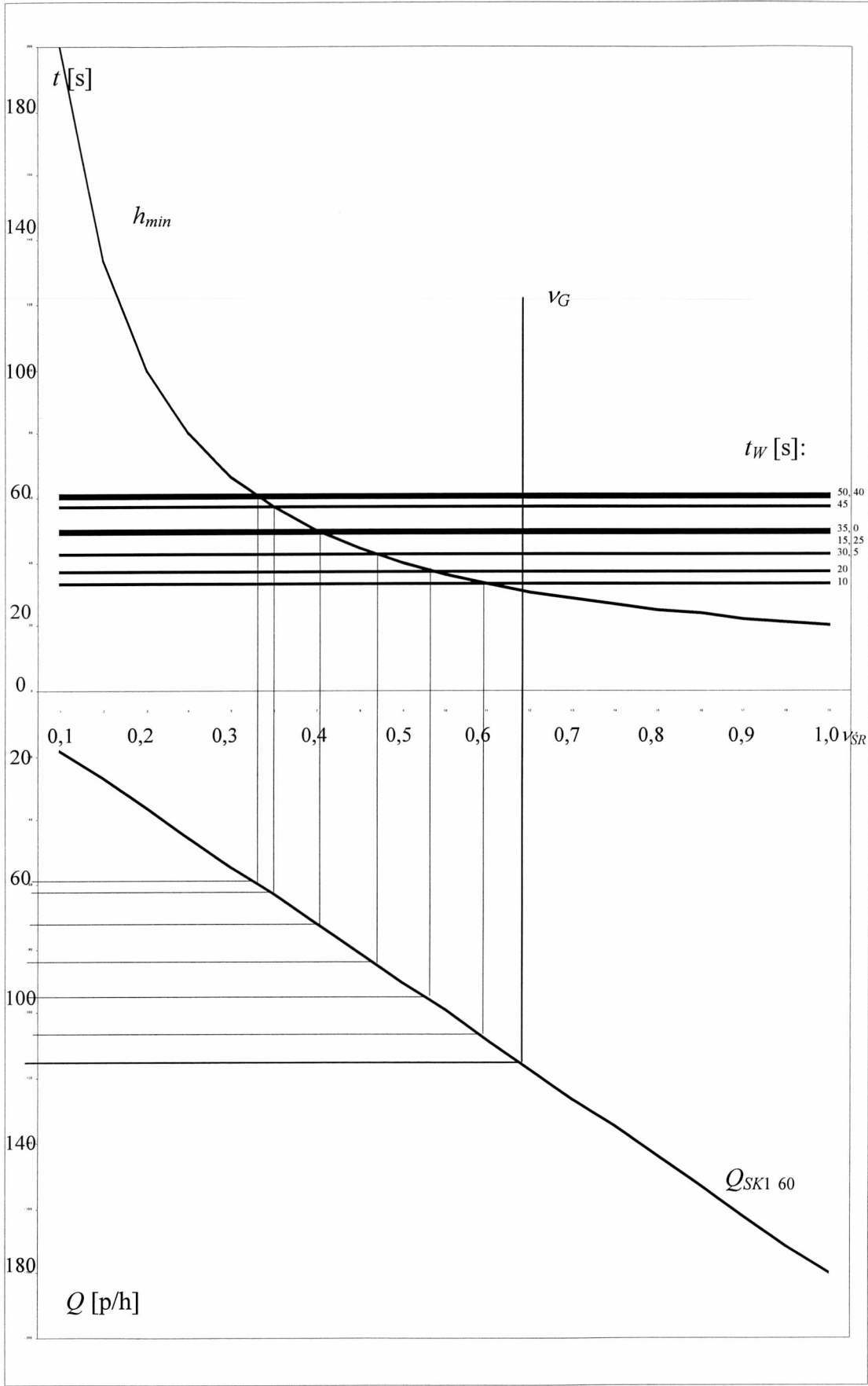
$S_{M1}$  – czas postoju na przystanku wyznaczony według (4.43) [s],

$p$  – liczba całkowita.

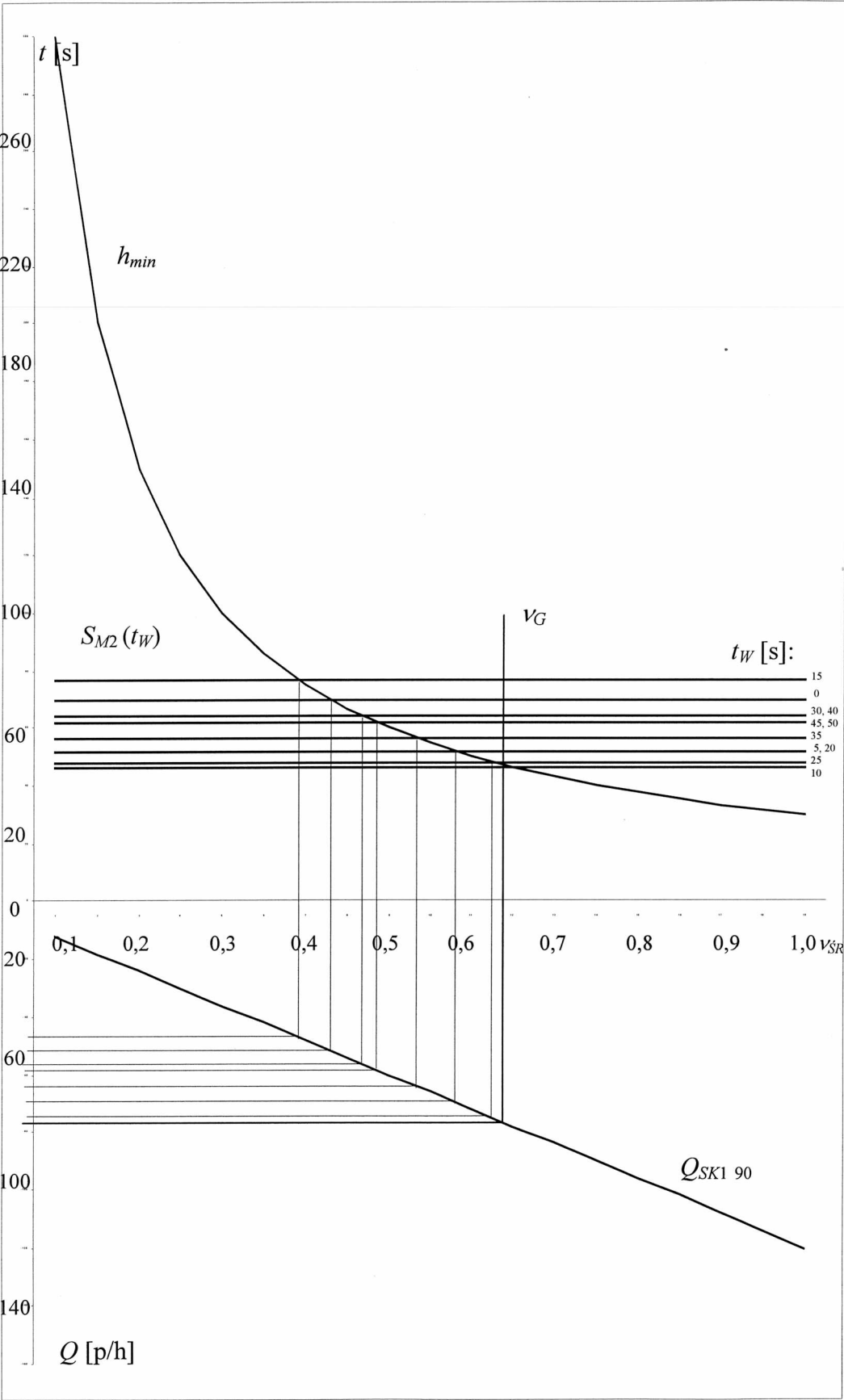
Jeżeli analizowany jest przystanek podwójny, to przekrój  $Y'$  dotyczy stanowiska nr2. W przekroju  $Y'$  czas  $S_M$ , graniczne wskaźniki obciążeń oraz przepustowość można obliczyć tak jak dla przekroju  $Y$ . Na rysunku 4.13 pokazano czasy postoju na drugim stanowisku lub za przystankiem pojedynczym,  $S_{M2}$  przy założeniu maksymalnego wykorzystania stanowiska pierwszego (czas  $t_W = 0$  oznacza brak drugiego stanowiska). Obliczono je, podobnie jak straty  $S_M$ , za pomocą programu STRATA2. Rysunki 4.14 – 4.15 przedstawiają graficzne wyznaczenie wskaźnika  $v_G$  oraz przepustowość przekroju PS2 dla cykli o długościach 60 i 90 s.



Rysunek 4.13: Czas postoju pojazdów na drugim stanowisku przystanku podwójnego przed sygnalizacją świetlną,  $S_{M2}$  [s] jako funkcja czasu wymiany pasażerów



Rysunek 4.14: Wyznaczenie granicznych wskaźników obciążenia przy różnym czasie wymiany pasażerów i przepustowości przekroju typu PS<sub>2</sub> dla  $t_c = 60$  s

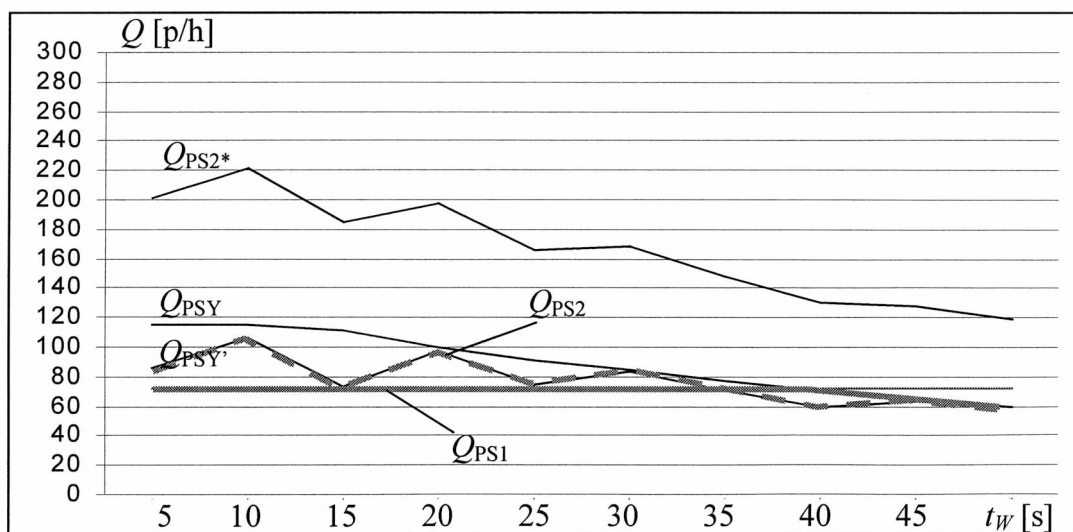


Rysunek 4.15: Wyznaczenie granicznych wskaźników obciążenia przy różnym czasie wymiany pasażerów i przepustowości przekroju typu PS<sub>2</sub> dla  $t_c = 90$  s

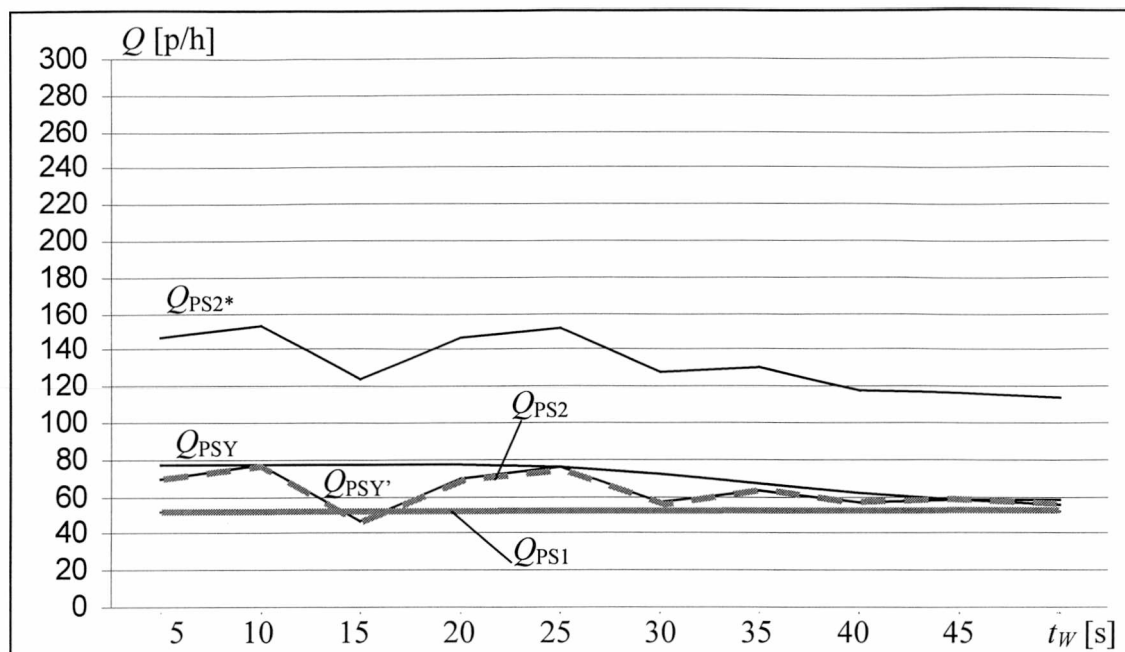


Czasy  $S_{M2}$  wykazują dużą zmienność. Ich wartości nie rosną wraz ze wzrostem czasu wymiany pasażerów. Zmienność ta jest prawdopodobnie spowodowana nakładaniem się wpływu czasu wymiany pasażerów i długości cyklu na czas postoju pojazdów na pierwszym stanowisku i możliwości wykorzystania stanowiska drugiego. Wahania wartości czasu  $S_{M2}$  powodują, że przepustowość drugiego stanowiska lub przekroju przed przystankiem nie jest w prosty sposób zależna od czasu wymiany pasażerów (wskaźniki  $v_G$  dla poszczególnych czasów wymiany wyznaczone na rysunkach 4.14 i 4.15 nie maleją wraz ze wzrostem czasu wymiany, co zachodziło dla stanowiska pierwszego).

Przepustowość przystanku podwójnego położonego przed sygnalizacją świetlną jest równa sumie przepustowości obu stanowisk postojowych tylko przy możliwym jednoczesnym odjeździe pojazdów z obu stanowisk (co wymaga odpowiedniej długości światła zielonego). Zgodnie z założeniami modelu deterministycznego nie jest to możliwe. Przepustowość przekroju PS określa więc minimum z  $Q_{PSY}$  i  $Q_{PSY'}$ . Wartości przepustowości przekroju PS dla różnych czasów wymiany pasażerów (założono, że czas wymiany na obu stanowiskach jest jednakowy), dla cykli o długościach 60 i 90 s pokazano na rysunkach 4.16 i 4.17.  $Q_{PSY}$  dotyczy przepustowości przystanku pojedynczego w przekroju Y,  $Q_{PSY'}$  w przekroju Y',  $Q_{PS1}$  przepustowości przystanku pojedynczego uwzględniającej straty czasu na dojeździe do przystanku,  $Q_{PS2}$  przystanku podwójnego bez możliwości jednoczesnego odjazdu pojazdów z obu stanowisk,  $Q_{PS2*}$  przystanku podwójnego z możliwością jednoczesnego odjazdu.



Rysunek 4.16: Przepustowość przystanku podwójnego usytuowanego bezpośrednio przed sygnalizacją świetlną dla  $t_c = 60$  s w funkcji czasu wymiany pasażerów



Rysunek 4.17: Przepustowość przystanku podwójnego usytuowanego bezpośrednio przed sygnalizacją świetlną dla  $t_c = 90s$  w funkcji czasu wymiany pasażerów

Przy założonym braku możliwości jednoczesnego odjazdu pojazdów z obu stanowisk (w czasie jednej fazy lub w fazach bezpośrednio po sobie następujących), przepustowość przystanku z dwoma stanowiskami jest niewiele większa od przepustowości przystanku z jednym stanowiskiem. Korzyści stosowania przystanków podwójnych są więc dla lokalizacji przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną ewidentnie mniejsze niż dla przystanków położonych na odcinku międzywęzłowym. Przepustowość przekrojów typu PS maleje wraz ze wzrostem długości cyklu.

#### 4.3.4 Przekrój typu SP

W przypadku lokalizacji przystanku bezpośrednio za skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną zachodzić mogą dwie możliwości wpływu:

1. przepustowość przystanku opisana wzorem (4.40) lub (4.41) ogranicza przepustowość skrzyżowania wyrażoną formułą (4.38),
2. przepustowość skrzyżowania ogranicza przepustowość przystanku.

Przepustowość przystanku jest funkcją czasu wymiany pasażerów (punkt 4.3.2) natomiast przepustowość skrzyżowania z sygnalizacją jest stała dla określonej długości

cyklu (punkt 4.3.1). Wskazać można taką długość czasu wymiany powyżej której o przepustowości przekroju SP decyduje przepustowość przystanku (jednocześnie ograniczana jest przepustowość skrzyżowania). Czas wymiany o takiej długości nazywany będzie granicznym. Dla czasów wymiany krótszych od granicznego o przepustowości przekroju SP decyduje przepustowość skrzyżowania (przepustowość przystanku będzie ograniczona). Przepustowość przekroju typu SP wyrazić można wzorem (4.46)

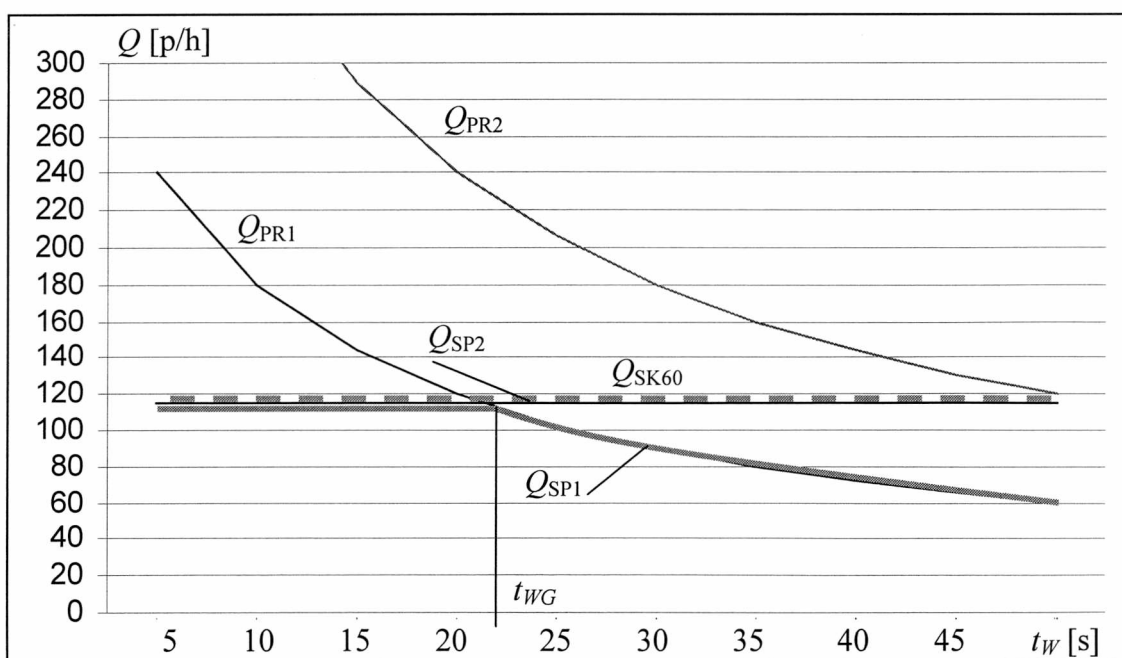
$$Q_{SP} = \begin{cases} Q_{SK}, & \text{dla } t_W \leq t_{WG} \\ Q_{PR}, & \text{dla } t_W > t_{WG}, \end{cases} \quad (4.46)$$

gdzie:

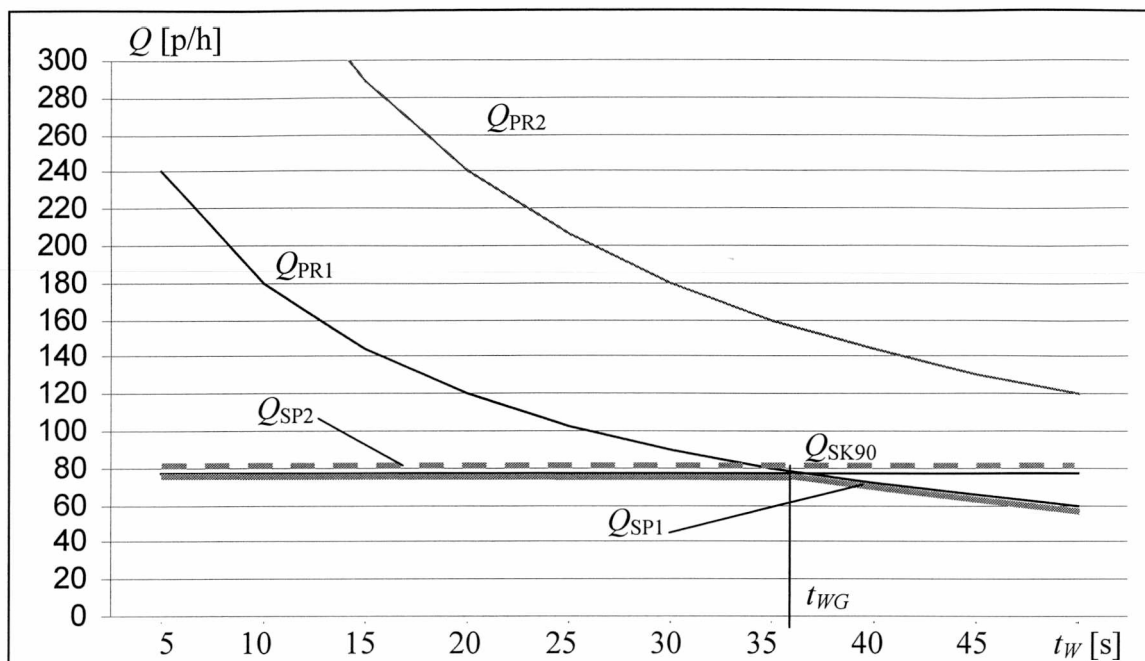
$Q_{SP}$  – przepustowość przekroju typu SP [P/h];

$t_{WG}$  – graniczny czas wymiany pasażerów określany dla cyklu o długości  $t_C$  [s].

Na rysunkach 4.18 i 4.19 przedstawiono graniczne czasy wymiany oraz przepustowości przekroju typu SP dla cykli o długości 60 i 90 s oraz przystanków pojedynczych i podwójnych.



Rysunek 4.18: Przepustowość przekroju typu SP dla  $t_C = 60s$  w funkcji czasu wymiany pasażerów



Rysunek 4.19: Przepustowość przekroju typu SP dla  $t_c = 90s$  w funkcji czasu wymiany pasażerów

Dla dłuższych cykli wzrasta wpływ skrzyżowania na przepustowość. Przy założeniu przejazdu tylko jednego pojazdu na fazę okazuje się, że drugie stanowisko przystanku podwójnego nie jest wykorzystywane. Znaczący wzrost przepustowości przystanku podwójnego wobec pojedynczego widoczny jest dopiero dla długich czasów wymiany pasażerów i to przy niskiej długości cyklu.

Z porównania rysunków: 4.16, 4.17, 4.18 i 4.19 wynika, że przepustowość przystanków położonych na wylotach skrzyżowań z sygnalizacją świetlną (przekroje PS) jest wyższa od przepustowości przystanków położonych na wlotach (przekroje SP). Widoczne jest to zwłaszcza dla czasów wymiany pasażerów nie przekraczających 25 – 30 s.

## 5 BADANIA SYMULACYJNE WPŁYWU ZMIENNOŚCI PARAMETRÓW RUCHU NA PRZEPUSTOWOŚĆ

### 5.1 Idea badań

W rozdziale 3 przedstawiono zakres zmienności parametrów charakteryzujących ruch pojazdów komunikacji zbiorowej oraz wskazano czynniki od których zmienność ta zależy. Przepustowość elementów sieci, wyznaczona w rozdziale 4, bazowała na modelu deterministycznym, w którym parametry ruchu miały wartości stałe (odstęp między pojazdami, prędkość, czas wymiany pasażerów), bądź rozkładały się w ściśle określony, optymalny sposób (wybór kanału docelowego). Zmienność parametrów niewątpliwie będzie mieć wpływ na przepustowość. Wyznaczenie tego wpływu jest przedmiotem niniejszego rozdziału. Poprzez wskazanie warunków dla których zakres zmienności parametrów jest niewielki określono zakres zastosowań modelu deterministycznego. Dla pozostałych sytuacji zaproponowano sposób korekty wyników uzyskiwanych z modelu deterministycznego.

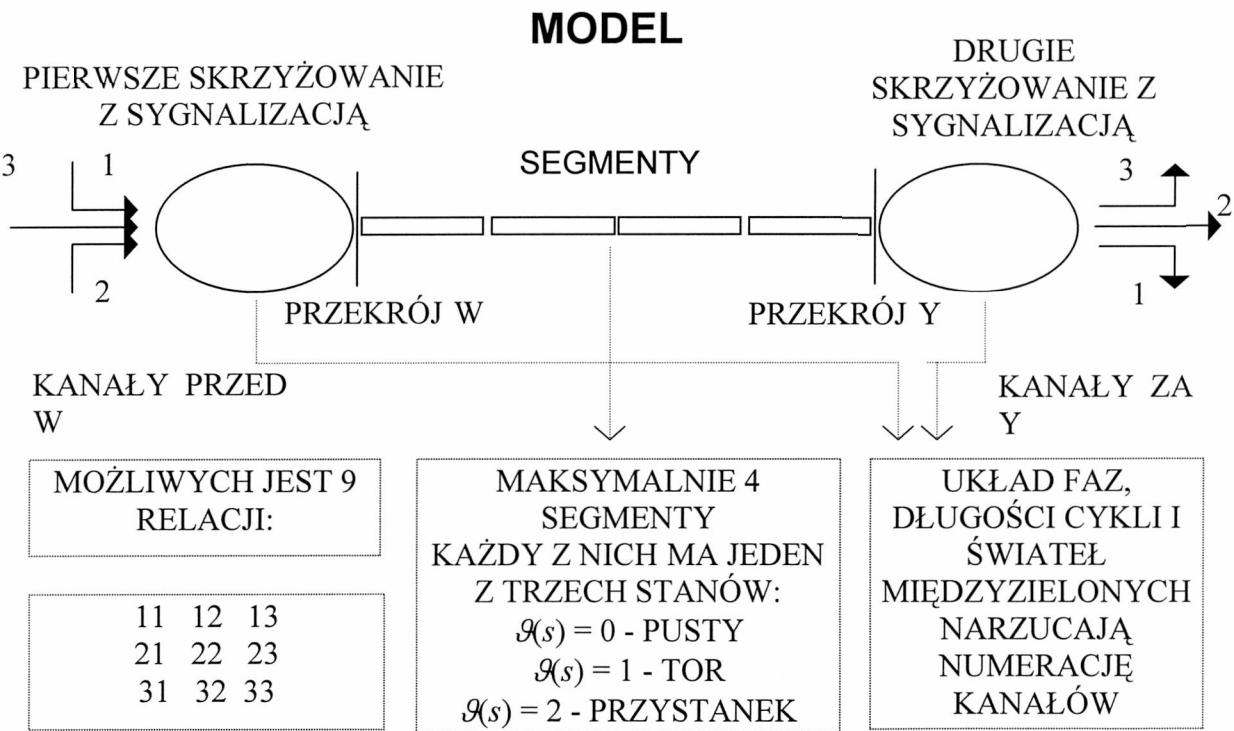
Ocena wpływu zmienności parametrów charakteryzujących ruch na przepustowość elementów sieci nie jest możliwa poprzez badania terenowe. Praktyczne natężenia ruchu są z reguły niższe od maksymalnych (nie ma sytuacji pełnego wykorzystania przepustowości). Nie jest możliwe znalezienie miejsc o tak zróżnicowanych parametrach, by możliwe było prześledzenie wpływu każdej możliwej kombinacji wartości parametrów na przepustowość. Z tych powodów rozwiązania problematyki niniejszego rozdziału dokonano za pomocą **modelu stochastycznego**.

Model stochastyczny odwzorowuje charakterystyczny fragment sieci, który był rozważany w modelu deterministycznym (por. rys.4.1). Modelowanie parametrów charakteryzujących ruch bazuje na ich identyfikacji wykonanej na podstawie pomiarów terenowych (rozdział 3).

5.2 Opis modelu stochastycznego

5.2.1 Założenia do modelu

Na rysunku 5.1 przedstawiono uszczegółowiony schemat modelowanego fragmentu sieci stosownie do wymagań modelu stochastycznego. Odcinek międzywęzłowy pomiędzy przekrojami W i Y składa się z czterech **segmentów**. Dla każdego z segmentów można przypisać jeden z trzech stanów: przystanek  $\mathcal{A}(s) = 2$ , tor  $\mathcal{A}(s) = 1$ , pusty  $\mathcal{A}(s) = 0$ , gdzie  $\mathcal{A}(s)$  oznacza stan segmentu  $s$ . Segment pusty wprowadzono w celu uproszczenia modelu (nie zawsze są potrzebne wszystkie segmenty). Przyjęty podział umożliwia uwzględnienie praktycznie wszystkich interesujących przypadków.



Rysunek 5.1: Schemat fragmentu sieci dla modelu stochastycznego

Poniżej przedstawiono możliwy układ segmentów, wartości  $\mathcal{A}(s)$  i ich znaczenie.

1.
- 2, 1, 0, 0 – przystanek z 1 stanowiskiem zlokalizowany bezpośrednio za skrzyżowaniem;

2. 2, 2, 1, 0 – przystanek z 2 stanowiskami zlokalizowany bezpośrednio za skrzyżowaniem;
3. 1, 2, 1, 0 – przystanek z 1 stanowiskiem zlokalizowany na odcinku międzywęzłowym;
4. 1, 2, 2, 1 – przystanek z 2 stanowiskami zlokalizowany na odcinku międzywęzłowym;
5. 1, 2, 0, 0 – przystanek z 1 stanowiskiem zlokalizowany bezpośrednio przed skrzyżowaniem;
6. 1, 2, 2, 0 – przystanek z 2 stanowiskami zlokalizowany bezpośrednio przed skrzyżowaniem;
7. 1, 0, 0, 0 – brak przystanku.

Zgłoszenia pojazdów w przekroju W modelowane są w oparciu o generowanie zgłoszeń pojazdów przed pierwszym skrzyżowaniem niezależnie dla każdego z kanałów. Budowa generatora opisana jest w punkcie 5.2.2. Pojazdy pojawiające się przed skrzyżowaniem oczekują na sygnał zielony stosownie do układu faz i ich długości. Jako fazy uwzględnia się tylko te, w których odbywa się ruch jednej z relacji modelowanego fragmentu sieci. Ewentualne inne fazy zalicza się do czasu międzyzielonego (między fazami). Opisany wyżej czas oczekiwania na wjazd nie jest uwzględniany w modelu. Jest to uproszczenie, w którym nie uwzględnia się blokowania wjazdu dla pojazdów relacji przejeżdżających przez modelowany fragment sieci poprzez poprzedzający je pojazd innej relacji tamtędy nie przejeżdżającej. Modelowanie takie obrazuje np. skrzyżowanie na obrzeżu śródmieścia, gdzie dochodzi do łączenia się komunikacyjnych linii wybiegowych biegnących w stronę centrum i nie ma niepożądanych, z punktu widzenia powyższych założeń, relacji. W celu uwzględnienia relacji dodatkowych należałoby, jako zgłoszenia pojazdów w przekroju W, przyjąć strumień ruchu już raz przepuszczony przez opisywany model. Byłaby to więc kolejna procedura modelowania. Dla potrzeb niniejszej pracy nie jest jednak ona konieczna.

Czasy zgłoszeń obliczane są na podstawie generowanych odstępów pomiędzy pojazdami z rozróżnieniem kanałów przed W (źródła ruchu: 1, 2 lub 3). Odstępy pomiędzy pojazdami przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną, generowane są niezależnie dla każdego kanału na podstawie zadanych odstępów średnich oraz wariancji ich rozrzutu według rozkładu gamma. Odstępy między pojazdami za skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną, w przekroju W zależą od kolejności faz sygnalizacji, ich długości oraz długości cyklu (dane do modelu).

Zakłada się, że ruch pojazdów z kolejnych kanałów odbywa się w wydzielonych fazach. Numeracja kanałów wynika z kolejności faz. Zakłada się ponadto, że przejazdy przez skrzyżowanie przed przekrojem W nie są zakłócane przez inne pojazdy.

Numer kanału za przekrojem Y (docelowego) dla kolejnego pojazdu przed przekrojem W generowany jest na podstawie udziału pojazdów danej relacji we wszystkich pojazdach dla każdego z kanałów przed W przy pomocy rozkładu równomiernego. Ilości pojazdów na godzinę dla każdej z relacji są danymi wprowadzanymi do modelu. Pojazdy różnych linii komunikacyjnych o tożsamym przebiegu przez modelowany fragment sieci, czyli o takich samych numerach kanałów zarówno przed W jak i za Y, uważane są za jedną relację. Jednak w wypadku dużego zróżnicowania ruchowego takich linii możliwe jest ich rozdzielanie poprzez wprowadzenie dodatkowego (fikcyjnego) kanału źródłowego.

Założeniem pracy jest brak możliwości wyprzedzania się pojazdów na odcinku międzywęzłowym. Przejazd każdego kolejnego pojazdu z segmentu do segmentu, a także opuszczenie modelowanego fragmentu sieci, zależą więc nie tylko od jego charakterystyk (prędkość, czas wymiany pasażerów), ale także od tego, czy poprzedzający pojazd opuścił już następny segment lub przekrój Y.

Czas przejazdu przez segment dla którego  $\mathcal{A}(s) = 1$  (tor) zależy od jego długości oraz prędkości danego pojazdu generowanej w oparciu o prędkość średnią dla relacji i typu pojazdów oraz rozrzut prędkości. Zakłada się, że prędkości pojazdów opisywane są rozkładem normalnym. Prędkość średnia i rozrzut prędkości są danymi do modelu. Jedyne straty czasu występujące w tym segmencie związane są z ewentualnym brakiem możliwości opuszczenia segmentu. Występuje to wtedy, gdy następnym segmentem jest przystanek ( $\mathcal{A}(s + 1) = 2$ ) i jest on zajęty lub gdy analizowany segment jest ostatnim, czyli położonym bezpośrednio przed skrzyżowaniem i dla pojazdu o określonej relacji pali się światło czerwone.

Czas obsługi pojazdów w segmencie dla którego  $\mathcal{A}(s) = 2$  (przystanek) jest sumą czasu operacyjnego oraz czasu wymiany pasażerów generowanych dla każdego kolejnego pojazdu w oparciu o wartości średnie, ich rozrzut (dane do modelu) i przyjęty rozkład. Czas operacyjny i czas wymiany pasażerów opisane są zmienną losową o rozkładzie gamma. Dodatkową stratą jest czas oczekiwania na odjazd. Wystąpi ona gdy następnym segmentem jest także przystanek (sytuacja taka odzwierciedla przystanek o



dwóch stanowiskach) i jest on zajęty oraz gdy analizowany segment jest ostatnim i dla pojazdu o określonej relacji pali się światło czerwone.

Uwaga, proponuje się przyjmować krótkie odcinki torowisk (dług. < 60 m) jako segmenty o  $\mathcal{A}(s) = 2$  (przystanki). Możliwe jest wtedy uwzględnienie zajęcia tego segmentu przez poprzedzający pojazd i brak możliwości wjazdu z poprzedniego segmentu przez pojazd następny.

W wypadku oczekiwania na przejazd między segmentami oraz na opuszczenie przekroju Y istotnym elementem strat czasu jest czas reakcji kierującego pojazdem. Czas ten jest zmienną losową o rozkładzie normalnym.

### 5.2.2 Opis zastosowanych generatorów zmiennych losowych

Symulacja wykonywana jest za pomocą programu SYMUL napisanego w języku Pascal na komputer klasy PC. Standardowo modelowany jest ruch we fragmencie sieci w przeciągu jednej godziny. Warto nadmienić, że program SYMUL umożliwia badania w szerszym zakresie niż problematyka niniejszej pracy (brak wydzielenia toru, przystanek na chodniku).

W modelu wykorzystywane są zmienne losowe o rozkładach prawdopodobieństwa: równomiernym, normalnym i gamma. Generator liczb o rozkładzie równomiernym jest integralną częścią języka Pascal. Używa się go po sprawdzeniu standardowymi testami serii i średniej. Program SYMUL posiada procedury generowania zmiennych o rozkładach: normalnym i gamma. Generowanie bazuje na zmiennych o rozkładzie równomiernym oraz na metodach: superpozycji rozkładów i odwracania dystrybucyj, kombinacjach tych metod oraz na sposobach przybliżonych.

W programie SYMUL generowane są zmienne losowe  $X$  o rozkładzie normalnym z wartością oczekiwaną równą zeru i odchyleniem standardowym równym jedności, oznaczanym  $N(0, 1)$ , którego gęstość podaje formuła (5.1)

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}}. \quad (5.1)$$

Zmienne  $X$  generowane są za pomocą przybliżenia podanego przez C. Hastingsa, a opisanego w [126]. Jeżeli  $R$  ma rozkład równomierny na przedziale  $(0, 1)$ , to  $X$  ma w

przybliżeniu rozkład normalny  $N(0, 1)$ , wtedy gdy obliczona zostanie według (5.2) lub (5.3).

$$X = Y - \frac{2.30753 + 0.27061 \cdot Y}{1 + 0.99229 \cdot Y + 0.04481 \cdot Y^2}, \quad (5.2)$$

gdzie:

$$Y = (-2 \ln (1-R))^{1/2} \quad \text{dla} \quad R \geq 0.5$$

lub

$$X = \frac{2.30753 + 0.27061 \cdot Y}{1 + 0.99229 \cdot Y + 0.04481 \cdot Y^2} - Y, \quad (5.3)$$

gdzie:

$$Y = (-2 \ln R)^{1/2} \quad \text{dla} \quad R < 0.5.$$

Program SYMUL generuje zmienne losowe  $G$  o uproszczonym rozkładzie gamma z parametrem  $c$ , którego gęstość wyraża się wzorem (5.4)

$$f(g) = \frac{1}{\Gamma(c)} \cdot g^{c-1} \cdot e^{-g}. \quad (5.4)$$

W celu wygenerowania zmiennej  $G$  należy przedstawić ją w postaci (5.5) [126],

$$G = G_1 + G_2 \cdot G_3, \quad (5.5)$$

gdzie:

$G_1$  – zmienna o rozkładzie gamma z parametrem  $[c]$ , czyli część całkowita  $c$ ,

$G_2$  – zmienna o rozkładzie gamma z parametrem  $c = 1$ ,

$G_3$  – zmienna o rozkładzie beta z parametrami  $(\beta, 1-\beta)$ , gdzie  $\beta = c - [c]$ , czyli część ułamkowa  $c$ .

Rozkład gamma z parametrem  $c = 1$  jest rozkładem wykładniczym o wartości oczekiwanej równej jedności, którego dystrybucja opisana jest wzorem (5.6)

$$f(w) = 1 - e^{-w}. \quad (5.6)$$

Wykorzystując metodę odwracania dystrybucji oraz fakt, że jeżeli  $R$  ma rozkład równomierny na przedziale  $(0, 1)$ , to  $1-R$  też ma taki rozkład, otrzymuje się formułę (5.7) na generowanie zmiennych o rozkładzie wykładniczym z wartością oczekiwaną równą jedności, czyli zmiennych  $G_2$  [126]

$$G_2 = -\ln(R). \quad (5.7)$$

Generowanie zmiennych  $G_1$  o rozkładzie gamma z całkowitym parametrem  $[c]$  sprowadza się do uzyskania  $[c]$  niezależnych zmiennych  $R_1, R_2, \dots, R_{[c]}$  o rozkładzie równomiernym, a następnie przekształceniu ich wg wzoru (5.)

$$G_1 = \left| \ln \prod_{i=1}^{[c]} R_i \right|. \quad (5.8)$$

Wykorzystuje się tu zależność, że do otrzymania zmiennej o rozkładzie gamma z całkowitym parametrem  $[c]$  wystarczy wygenerować  $[c]$  zmiennych o rozkładzie wykładniczym i obliczyć ich sumę [126].

Zmienna  $G_3$  generowana jest na podstawie następującego algorytmu [126]:

1. Wygenerować zmienną losową  $U$  o rozkładzie potęgowym z parametrem  $\beta$ ;
2. Wygenerować zmienną losową  $V$  o rozkładzie potęgowym z parametrem  $1-\beta$ ;
3. Jeżeli  $U + V > 1$ , powtórzyć operacje 1 i 2, w przeciwnym wypadku obliczyć  $G_3$  wg wzoru (5.9)

$$G_3 = \frac{U}{U + V}. \quad (5.9)$$

Dystrybuenta rozkładu potęgowego z parametrem  $\beta$  ma postać (5.10)

$$f(u) = u^\beta, \text{ dla } 0 \leq u \leq 1. \quad (5.10)$$

Prostą metodę generowania zmiennej o rozkładzie potęgowym z parametrem mniejszym od 1, np.  $U$ , podano w [126]. Najpierw należy wylosować liczbę  $R$  zgodnie z rozkładem równomiernym na przedziale  $(0, 1)$ , a następnie znaleźć liczbę całkowitą  $p$  spełniającą zależność (5.11)

$$\sum_{i=0}^{p-1} \beta(1-\beta)^i \leq R < \sum_{i=0}^p \beta(1-\beta)^i. \quad (5.11)$$

Następnie należy wylosować  $p + 1$  niezależnych liczb  $R_0, R_1, \dots, R_p$  o rozkładzie równomiernym i obliczyć  $U$  wg wzoru (5.12)

$$U = R_0 R_1 \dots R_p. \quad (5.12)$$

W podobny sposób otrzymuje się zmienne  $V$ , podstawiając we wzorze (5.11) za  $\beta$  wielkość  $1-\beta$ .

### 5.2.3 Parametry modelu

Parametry występujące w modelu symulacyjnym podzielić można na oznaczenia, wielkości dane oraz wielkości generowane (obliczane).

Do grupy oznaczeń zaliczyć można:

$i$  – numer kanału źródłowego,  $i = 1, 2, 3$ ,

- $j$  – numer kanału docelowego,  $j = 1, 2, 3$ ,  
 $s$  – numer segmentu,  $s = 1, 2, 3, 4$ ,  
 $k$  – numer pojazdu w kanałach źródłowych, ilość pojazdów zależy od natężenia ruchu, założono jednak, że nie może być większa od 60,  
 $\kappa$  – numer pojazdu na odcinku W-Y, ilość pojazdów na odcinku międzywęzłowym równa jest sumie pojazdów z wszystkich kanałów źródłowych, nie może więc być większa od 180,  
 $m_{xy}$  – element macierzy dwuwymiarowej,  
 $x$  – numer wiersza macierzy,  
 $y$  – numer kolumny macierzy,  
 $e^4_l$  –  $l$ -ty, czteroelementowy wektor jednostkowy,  $l = 1, 2, 3, 4$ .

Do grupy wielkości danych zaliczyć można:

- $h_{\acute{S}Ri}$  – średni odstęp między pojazdami w kanale  $i$ ,  
 $\sigma^2_{hi}$  – wariancja odstępów między pojazdami w kanale  $i$ ,  
 $t_{ZW_i}$  – moment rozpoczęcia się fazy  $i$  na skrzyżowaniu przed W,  
 $\Delta t_{Wi}$  – długość sygnału zielonego w fazie  $i$  na skrzyżowaniu przed W,  
 $t_{ZY_j}$  – moment rozpoczęcia się fazy  $j$  na skrzyżowaniu za Y,  
 $\Delta t_{Yj}$  – długość sygnału zielonego w fazie  $j$  na skrzyżowaniu za Y,  
 $N_{ij}$  – natężenie ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej dla relacji  $ij$ ,  
 $\mathcal{A}(s)$  – stan segmentu  $s$ , pusty  $\mathcal{A}(s) = 0$ , tor  $\mathcal{A}(s) = 1$ , przystanek  $\mathcal{A}(s) = 2$ ,  
 $l_s$  – długość segmentu  $s$  (tylko gdy  $\mathcal{A}(s) = 1$ ),  
 $V_{\acute{S}Rs}$  – średnia prędkość pojazdów w segmencie  $s$ ,  
 $\sigma^2_{Vs}$  – wariancja prędkości pojazdów w segmencie  $s$ ,  
 $t_{W\acute{S}Rs}$  – średni czas wymiany pasażerów w segmencie  $s$ ,  
 $\sigma^2_{tWs}$  – wariancja czasu wymiany pasażerów w segmencie  $s$ .

Do grupy wielkości generowanych (obliczanych) zaliczyć można:

- $h_{ki}$  – odstęp między pojazdami  $k$  i  $k-1$  w kanale  $i$  obliczany wg (5.13),  
 $h^*_{ki}$  – odstęp jak wyżej zmodyfikowany oddziaływaniem sygnalizacji świetlnej (w przekroju W),  
 $t(s)_\kappa$  – czas po przejechaniu segmentu  $s$  (lub po wymianie pasażerów w segmencie  $s$ ) dla pojazdu  $\kappa$ , dla  $s = 0$  – czas zgłoszenia się pojazdu  $\kappa$  na początku segmentu 1,  
 $t_{W\kappa}$  – czas wymiany pasażerów dla pojazdu  $\kappa$  obliczany wg (5.14),  
 $t_{s\kappa}$  – czas przejazdu segmentu  $s$  przez pojazd  $\kappa$  obliczany wg (5.15),

$S_W(s)_\kappa$  – straty czasu związane z opuszczaniem segmentu  $s$  przez pojazd  $\kappa$ .

Odstęp między pojazdami zgłaszającymi się w kanałach, czas wymiany pasażerów oraz czas przejazdu przez segment, jako wielkości losowe, wyznaczone są na podstawie generowanych zmiennych losowych o zidentyfikowanych rozkładach wg formuł (5.13) ÷ (5.15)

$$h_{ki} = \frac{\sigma_{hi}^2}{h_{\dot{S}Ri}} \cdot G, \quad (5.13)$$

$$t_{Ws} = \frac{\sigma_{tWs}^2}{t_{W\dot{S}\dot{S}}} \cdot G, \quad (5.14)$$

gdzie:

$G$  – zmienna losowa o uproszczonym rozkładzie gamma o gęstości opisanej zależnością (5.4),

$$t_s = \frac{l_s}{V_{\dot{S}Rs} + \sigma_s \cdot X}, \quad (5.15)$$

gdzie:

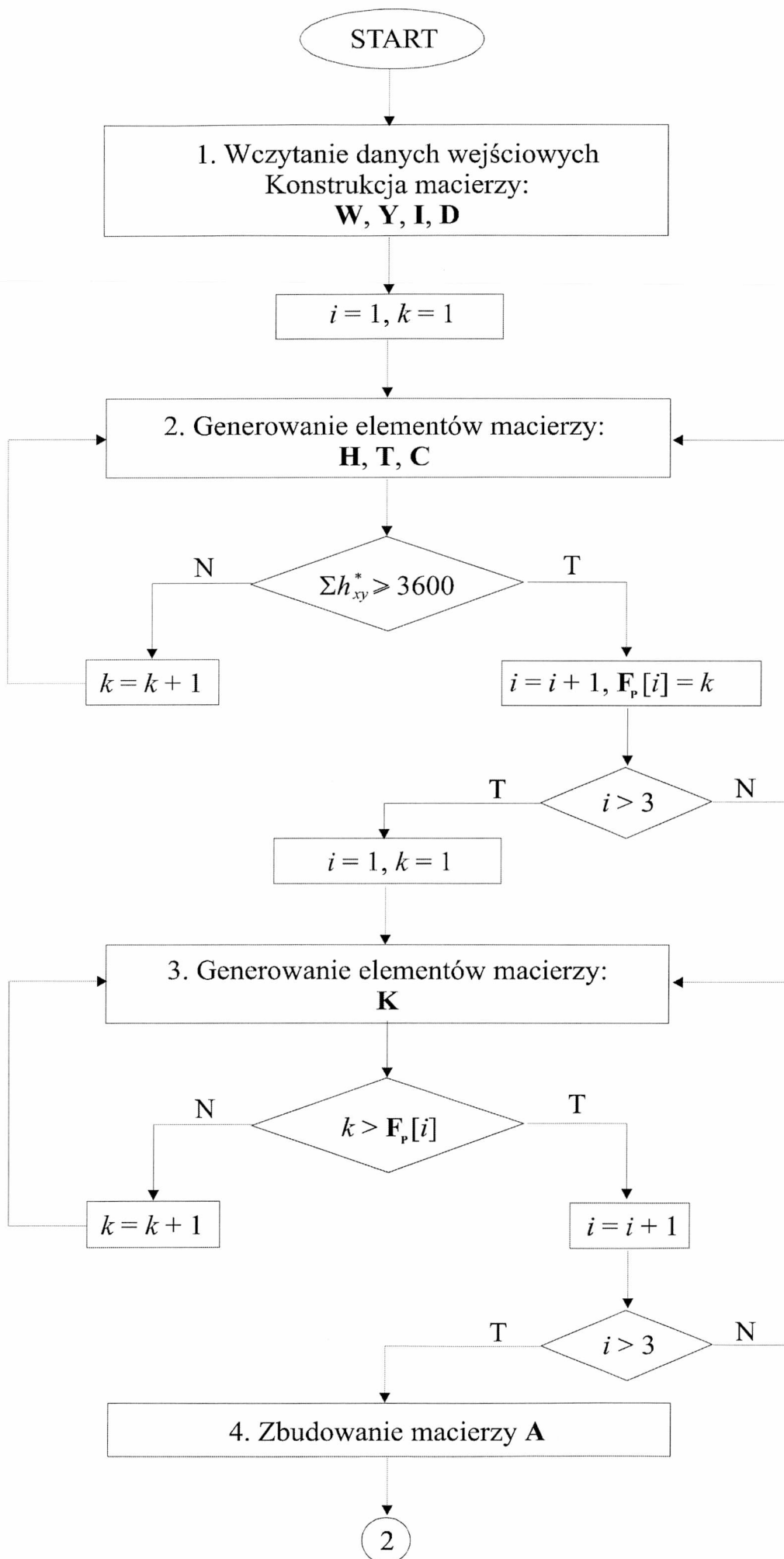
$X$  – zmienna losowa o rozkładzie normalnym  $N(0,1)$  o gęstości opisanej zależnością (5.1).

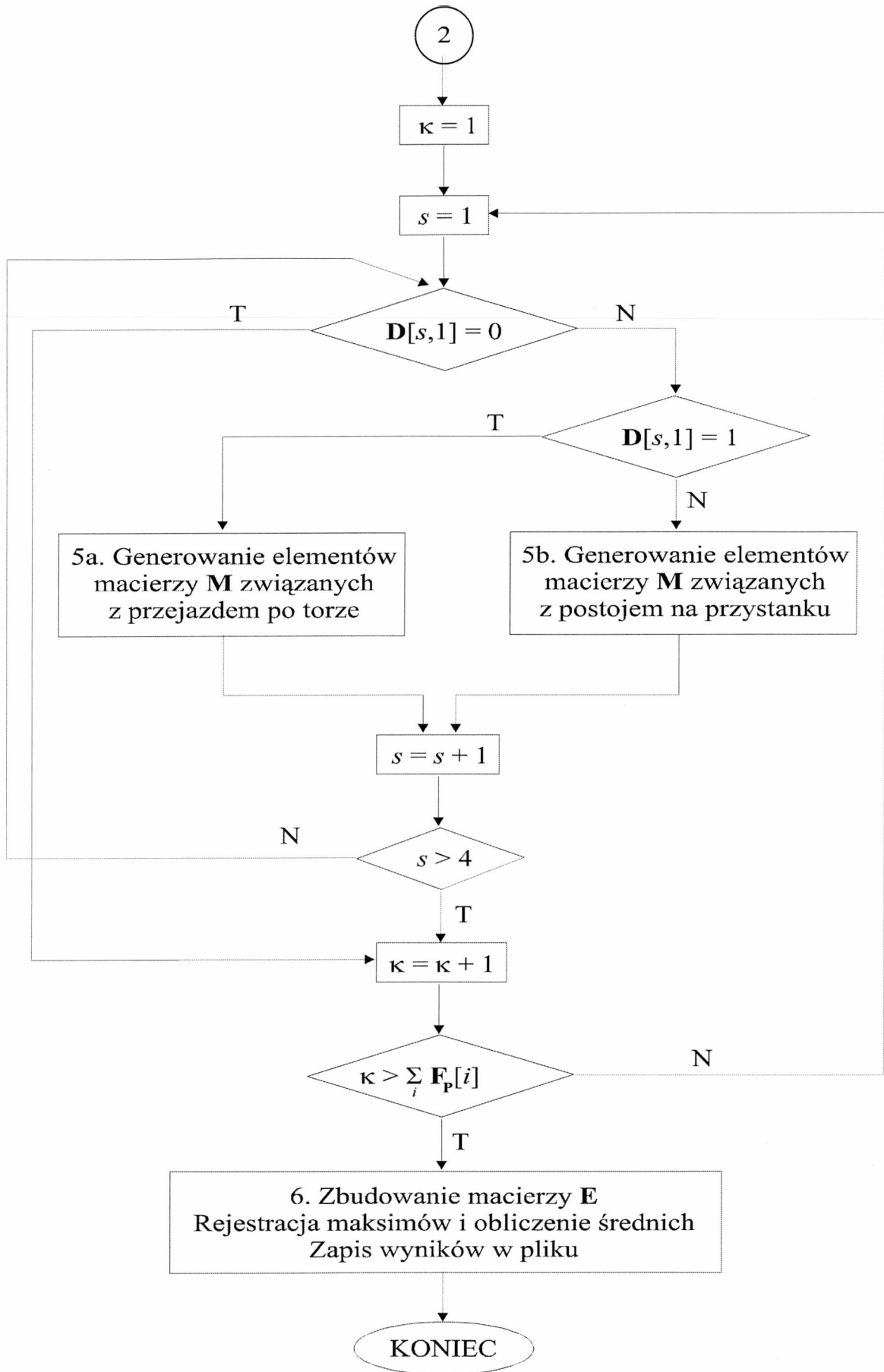
#### 5.2.4 Struktura programu

Ogólny schemat blokowy programu przedstawiono na rysunku 5.2.

W schemacie programu wyróżniono 6 podstawowych procedur:

1. Wczytanie danych i konstrukcja macierzy **W**, **Y**, **I**, **D**;
2. Generowanie elementów macierzy: **H**, **T**, **C**;
3. Generowanie elementów macierzy **K**;
4. Zbudowanie macierzy **A**;
5. Generowanie elementów macierzy **M**;
6. Zbudowanie macierzy **E**, rejestracja maksimów i obliczenie średnich oraz zapis wyników.





Rysunek 5.2: Schemat blokowy programu SYMUL

Ad.1:

Dane przechowywane są w specjalnym pliku: magazyn.pod. Do tworzenia zbiorów danych i ich modyfikacji służy oddzielny program o nazwie MODYFIK napisany w języku Pascal na komputer klasy PC. Oznacza to, że symulator korzystać może z dowolnego zbioru danych, takiego który aktualnie znajduje się w komputerze pod postacią pliku magazyn.pod. Dane po wczytaniu zapisywane są w pliku tekstowym dane.txt w postaci dogodnej do wydruku (magazyn.pod nie jest plikiem tekstowym).

Macierz danych o kanałach źródłowych (**W**) zdefiniowana jest wg (5.16)

$$\mathbf{W} = [m_{xy}]_{3 \times 4}, \quad (5.16)$$

gdzie:

$$x = i, m_{x1} = h_{\dot{S}Rx}, m_{x2} = \sigma_{hx}^2, m_{x3} = t_{ZWx}, m_{x4} = \Delta t_{Wx}.$$

Macierz danych o kanałach docelowych (**Y**) zdefiniowana jest wg (5.17)

$$\mathbf{Y} = [m_{xy}]_{3 \times 2}, \quad (5.17)$$

gdzie:

$$x = j, m_{x1} = t_{ZYx}, m_{x2} = \Delta t_{Yx}.$$

Macierz danych o ilości pojazdów w relacjach  $ij$  (**I**) zdefiniowana jest wg (5.18)

$$\mathbf{I} = [m_{xy}]_{3 \times 3}, \quad (5.18)$$

gdzie:

$$x = i, y = j, m_{xy} = N_{xy}.$$

Macierz danych o segmentach (**D**) zdefiniowana jest wg (5.19)

$$\mathbf{D} = [m_{xy}]_{4 \times 4}, \quad (5.19)$$

gdzie:

$$x = s, m_{x1} = \mathcal{A}(x), m_{x2} = l_x, m_{x3} = V_{\dot{S}Rx} \text{ (gdy } m_{x1} = 1) \text{ lub } = t_{W\dot{S}Rx} \text{ (gdy } m_{x1} = 2), m_{x4} = \sigma_{Vx}^2 \text{ (gdy } m_{x1} = 1) \text{ lub } = \sigma_{tWx}^2 \text{ (gdy } m_{x1} = 2).$$

Ad.2:

Macierz zmodyfikowanych odstępów między pojazdami według kanałów źródłowych w przekroju **W** (**H**) zdefiniowana jest wg (5.20)

$$\mathbf{H} = [m_{xy}]_{60 \times 3}, \quad (5.20)$$

gdzie:

$$x = k, y = i, m_{xy} = h_{xy}^*.$$

Macierz globalnych czasów zgłoszeń pojazdów, liczonych od początku symulacji, w przekroju **W** według kanałów źródłowych (**T**) zdefiniowana jest wg (5.21)



$$\mathbf{T} = [m_{xy}]_{60 \times 3}, \quad (5.21)$$

gdzie:

$$x = k, y = i, m_{xy} = \sum_{n=1}^x h_{ny}^*.$$

Macierz czasów zgłoszeń pojazdów, odniesionych do momentu w cyklu, w przekroju W według kanałów źródłowych (**C**) zdefiniowana jest wg (5.22)

$$\mathbf{C} = [m_{xy}]_{60 \times 3}, \quad (5.22)$$

gdzie:

$$x = k, y = i, m_{xy} = \sum_{n=1}^x h_{ny}^* - p \cdot t_{CW}, p - \text{liczba całkowita, } p \cdot t_{CW} \leq \sum_{n=1}^x h_{ny}^* < (p+1) \cdot t_{CW}.$$

Dla elementów macierzy: **H**, **T**, **C** obowiązuje ograniczenie (5.23)

$$m_{xy} = 0 \text{ dla } x > \mathbf{F_P}[y], \quad (5.23)$$

gdzie:

$\mathbf{F_P}[y]$  – wygenerowana ilość pojazdów z kanału y.

Ad.3:

Macierz kanałów docelowych dla pojazdów z kanałów źródłowych (**K**) zdefiniowana jest wg (5.24)

$$\mathbf{K} = [m_{xy}]_{60 \times 3}, \quad (5.24)$$

gdzie:

$$x = k, y = i, m_{xy} = \lfloor 3 \cdot (R+1) \rfloor, R - \text{zmienna losowa o rozkładzie równomiernym na przedziale } [0,1).$$

Dla elementów macierzy **K** także obowiązuje ograniczenie (5.23).

Ad.4:

Macierz startu (**A**) skonstruowana zostaje w dwóch krokach. Najpierw macierze: **H**, **T**, **C** i **K** zostają przekształcone w wektory:  $\mathbf{H_F}$ ,  $\mathbf{T_F}$ ,  $\mathbf{C_F}$  i  $\mathbf{K_F}$ , zdefiniowane ogólnie wg (5.25)

$$\mathbf{X_F} = [m_x]_{180}, \quad (5.25)$$

gdzie:

$m_x$  – elementy wektora  $\mathbf{X_F}$  odpowiadające elementom macierzy **X** dobrane wg procedury iteracyjnej.

O kolejności elementów w wektorach decyduje globalny czas zgłoszenia w przekroju W (z macierzy **T**). Przekształcenie odbywa się według procedury iteracyjnej.

Następnie z wymienionych wyżej wektorów zbudowana zostaje macierz  $\mathbf{A}$  wg formuły (5.26)

$$\mathbf{A} = [m_{xy}]_{180 \times 3} = \mathbf{H}_F \times e_1^4 + \mathbf{T}_F \times e_2^4 + \mathbf{C}_F \times e_3^4 + \mathbf{K}_F \times e_4^4, \quad (5.26)$$

gdzie:

$e_l^4$  – czteroelementowe wektory jednostkowe.

Ad.5:

Macierz obsługi pojazdów w segmentach ( $\mathbf{M}$ ) zdefiniowana jest wg (5.27)

$$\mathbf{M} = [m_{xy}]_{180 \times 12}, \quad (5.27)$$

gdzie:

$$x = \kappa,$$

$$\text{dla } y = 4(s-1) + 1: m_{xy} = t_{sx} \text{ (gdy } \mathcal{G}(s) = 2) \text{ lub } = t_{wx} \text{ (gdy } \mathcal{G}(s) = 2),$$

$$\text{dla } y = 4(s-1) + 2: m_{xy} = t(s)_x,$$

$$\text{dla } y = 4(s-1) + 3: m_{xy} = t(s)_x + S_W(s)_x.$$

Elementy macierzy  $\mathbf{M}$  obowiązują ograniczenia: (5.28) i (5.29)

$$m_{xy} = 0 \text{ dla } \mathcal{G}(s) = 0, \quad (5.28)$$

$$m_{xy} = 0 \text{ dla } x > \sum_{i=1}^3 F_p[i]. \quad (5.29)$$

Ad.6:

Macierz wyników ( $\mathbf{E}$ ) zdefiniowana jest wg (5.30)

$$\mathbf{E} = [m_{xy}]_{180 \times 5}, \quad (5.30)$$

gdzie:

$$x = \kappa,$$

$$m_{x1} = S_W(s)_x \text{ (gdy } \mathcal{G}(s+1) = 2) \text{ lub } = 0 \text{ (w przeciwnym wypadku),}$$

$$m_{x2} = S_W(s)_x \text{ (gdy } \mathcal{G}(s+1) = 0 \text{ lub gdy } s = 4) \text{ lub } = 0 \text{ (w przeciwnym wypadku),}$$

$$m_{x3} = t(4)_x + S_W(4)_x - t(0)_x,$$

$$m_{x4} = \sum_s S_W(s)_x,$$

$$m_{x5} = m_{x3} - m_{x4}.$$

Według kolumn macierzy  $\mathbf{E}$  liczone są wielkości średnie oraz rejestrowane maksima: strat obu typów (oczekiwania na wjazd na przystanek i oczekiwania w przekroju Y), globalnego czasu przejazdu odcinka W-Y (wliczywszy oczekiwanie na odjazd z Y), sumy strat i minimalnego czasu przejazdu odcinka W-Y (bez strat).

Program SYMUL zapisuje wyniki w pliku tekstowym wyniki.txt. W wersji uproszczonej podawane są tylko wielkości średnie i maksima z macierzy **E**. Możliwa jest jednak rejestracja wszystkich wyników z opisanych wyżej macierzy: **H**, **T**, **C**, **K**, **A**, **M**, **E**.

### 5.3 Wyniki badań

#### 5.3.1 Przekroje typu SK

W toku badań określono wpływ na wielkość strat czasu powstających w przekroju Y następujących parametrów: długość cyklu ( $t_C$ ), natężenie ruchu wyrażone średnim wskaźnikiem obciążenia wlotów ( $\nu_{SR}$ ), długość światła zielonego na skrzyżowaniu przed przekrojem W ( $t_{ZW}$ ), długość światła zielonego na skrzyżowaniu za przekrojem Y ( $t_{ZY}$ ), wariancja odstępów zgłoszeń pojazdów w kanałach źródłowych ( $\sigma_h^2$ ) oraz odchylenie standardowe prędkości pojazdów na odcinku międzywęzłowym ( $\sigma_V$ ). Przyjęto jednakowe długości cykli na obu skrzyżowaniach, jednakowe długości światła zielonego dla wszystkich trzech faz na każdym ze skrzyżowań oraz jednakowe rozrzuty zgłoszeń dla każdego z kanałów źródłowych. Założono optymalny podział natężeń pomiędzy relacje oraz optymalny podział cyklu na fazy (dobór momentów rozpoczęcia faz) tak jak w modelu deterministycznym. Rejestrowano czas zajęcia przekroju (straty czasu, czas operacyjny) i sprawdzano czy nie przekracza on wartości odstępów między pojazdami wynikających z natężenia ruchu. W oparciu o czas zajęcia przekroju wyznaczono przepustowość analogicznie jak w modelu deterministycznym.

Stwierdzono, że dla natężeń ruchu odpowiadających wskaźnikowi obciążenia nie przekraczającego  $\nu_G$  zróżnicowanie regularności wyboru kanału docelowego nie wpływa istotnie na zmienność wartości strat czasu. Nawet dla wskaźników zgodności ( $w_{ZG}$ ) o wartościach 30, 40 % straty czasu nie odbiegają od uzyskanych w modelu deterministycznym więcej jak o 5 %.

W toku badań stwierdzono, że wpływ rozrzutu prędkości jest rozłączny od pozostałych parametrów charakteryzujących strumień zgłoszeń i można go rozpatrywać oddzielnie. Dzięki temu przeanalizowano na wstępie zmienność strat przy założeniu

stałego czasu przejazdu odcinka międzywęzłowego, a następnie pokazano jak rozrzut prędkości dodatkowo wpływa na zmienność strat.

W nawiązaniu do pomiarów przedstawionych w rozdziale 3 badania ograniczono do typowych i reprezentatywnych wartości ww. parametrów:  $t_C = 60$  i  $90$  [s],  $v_{SR} = 0.4, 0.5$  i  $0.6$ ,  $t_{ZW} = 1, 5$  i  $9$  [s],  $t_{ZY} = 5, 8, 10$  i  $12$  [s],  $\sigma_h^2$  z przedziału  $0 \div 20000$  [s<sup>2</sup>],  $\sigma_V$  z przedziału  $0 \div 1.5$  [m/s].

Stwierdzono specyficzną zależność strat czasu od wymienionych wyżej parametrów, którą w największym uogólnieniu przedstawiono na rysunku 5.3. Przy braku rozrzutu zgłoszeń pojazdów w kanałach źródłowych straty wynoszą  $S_0$ , wielkość zależną od  $t_C$ ,  $v_{SR}$ ,  $t_{ZW}$  i  $t_{ZY}$ . Wartości  $S_0$  zestawiono w tabeli 5.1, a na rysunku 5.4 pokazano zmienność  $S_0$  dla  $t_{ZW} = 9$  s. Zaznaczono średnie odstępy między pojazdami wynikające z natężenia ruchu oraz faktyczny czas zajęcia przekroju będący maksimum ze strat i średnich odstępów. Warto zauważyć, że dla rosnących długości światła zielonego wartości  $S_0$  zbliżają się do wartości uzyskiwanych z modelu deterministycznego. Przy niskim natężeniu ruchu ( $v_{SR} = 0,4$ ) o czasie zajęcia przekroju decyduje średni odstęp między pojazdami, a nie straty czasu.

Wraz ze wzrostem rozrzutu zgłoszeń pojazdów w kanałach źródłowych rośnie zróżnicowanie strat. Rejestrowane wartości strat wahają się pomiędzy ograniczeniem górnym  $S_G$  a ograniczeniem dolnym  $S_D$ . Wykazano, że możliwy jest opis tych ograniczeń krzywymi o równaniach (5.31) i (5.32)

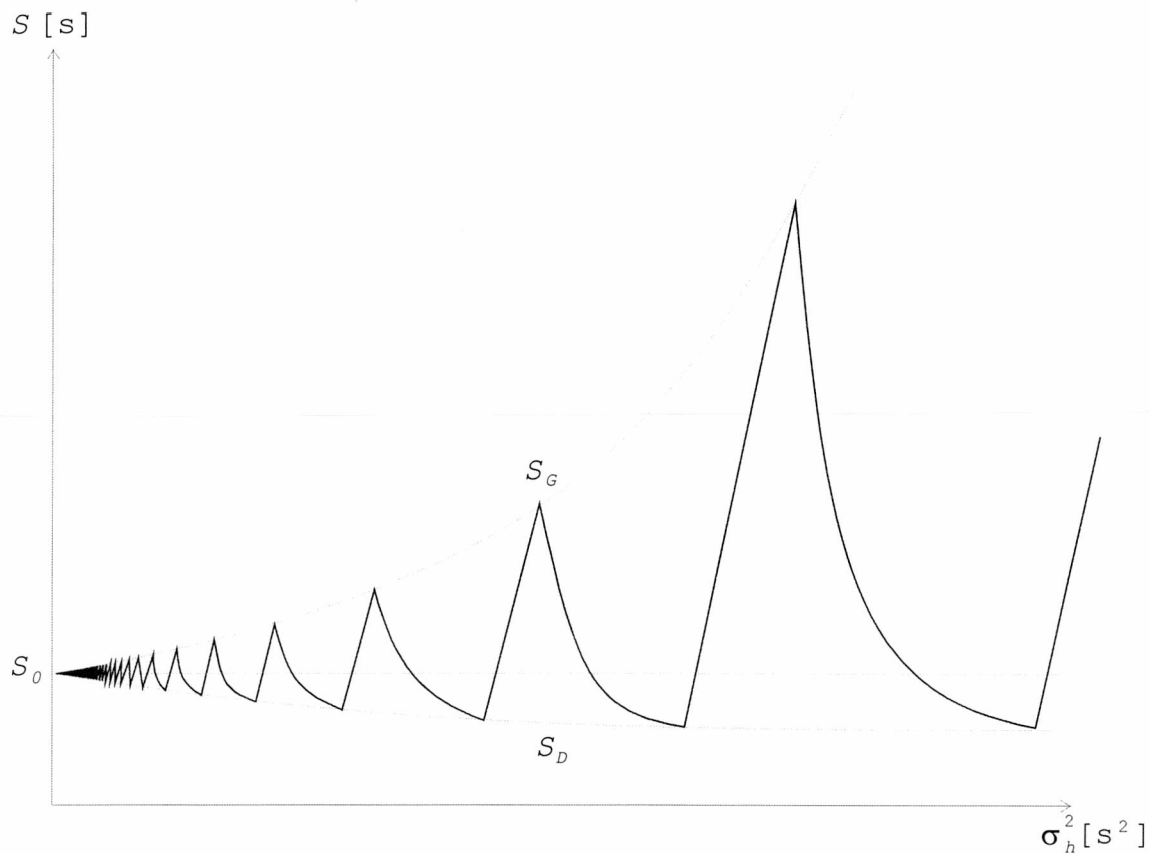
$$S_G = S_0 + b_1 * [\sigma_h^2]^2, \quad (5.31)$$

$$S_D = S_0 - b_2 * \text{sqrt}(\sigma_h^2), \quad (5.32)$$

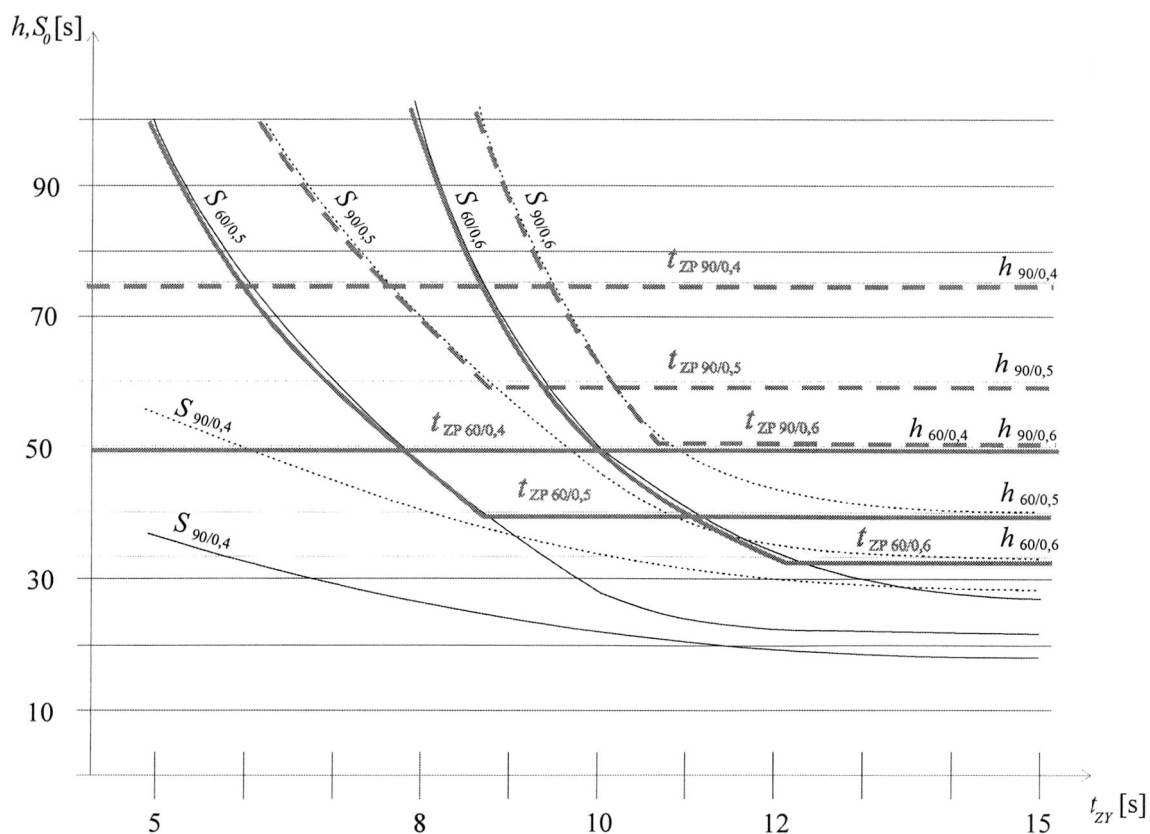
gdzie:

$S_G, S_D$  – ograniczenia górne i dolne strat,

$b_1, b_2$  – parametry funkcji ograniczających.



Rysunek 5.3: Straty czasu w przekroju Y przy stałej prędkości na odcinku międzywęzłowym jako funkcja rozrzutu odstępów zgłoszeń



Rysunek 5.4: Straty  $S_0$  dla  $t_{ZN} = 9$  s

Tabela 5.1: Wartości strat  $S_0$  [s]

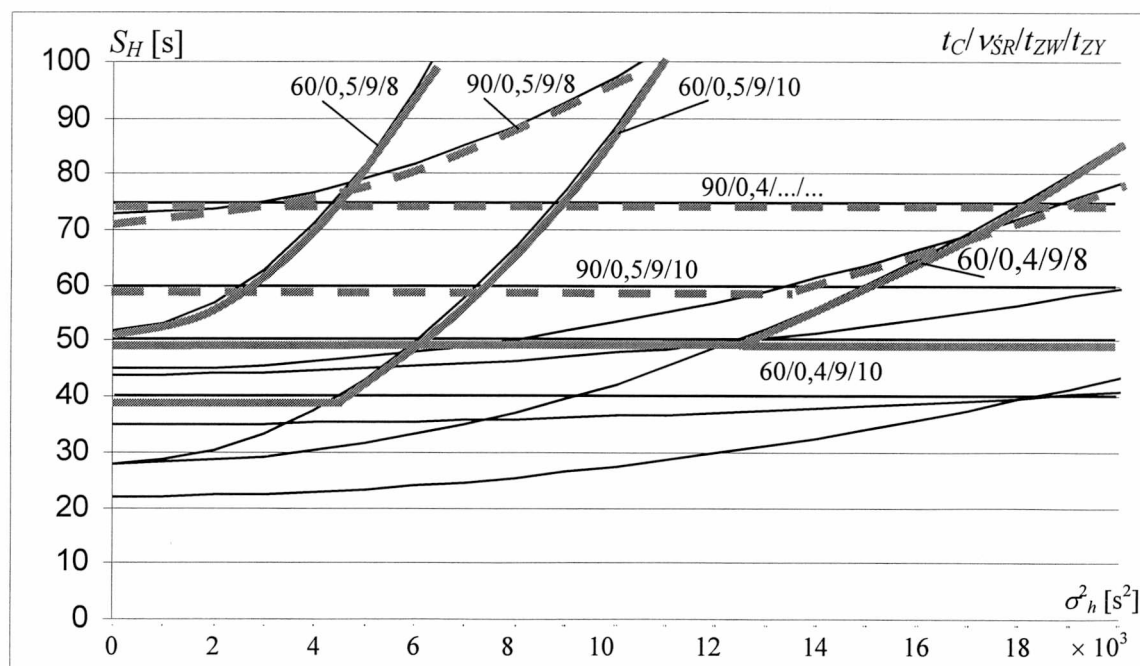
| $t_{ZW}$                 | $t_{ZY} = 5$ | $t_{ZY} = 8$ | $t_{ZY} = 10$ | $t_{ZY} = 12$ |
|--------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| $t_C = 60, v_{SR} = 0.4$ |              |              |               |               |
| 1                        | 30           | 22           | 16            | 14            |
| 5                        | 32           | 25           | 20            | 16            |
| 9                        | 36           | 28           | 22            | 18            |
| $t_C = 60, v_{SR} = 0.5$ |              |              |               |               |
| 1                        | 90           | 45           | 23            |               |
| 5                        | 95           | 48           | 26            |               |
| 9                        | 100          | 52           | 28            |               |
| $t_C = 60, v_{SR} = 0.6$ |              |              |               |               |
| 1                        |              | 100          | 41            | 21            |
| 5                        |              | 110          | 46            | 24            |
| 9                        |              | 125          | 50            | 28            |
| $t_C = 90, v_{SR} = 0.4$ |              |              |               |               |
| 1                        | 50           | 38           | 29            | 24            |
| 5                        | 53           | 43           | 32            | 27            |
| 9                        | 57           | 44           | 35            | 29            |
| $t_C = 90, v_{SR} = 0.5$ |              |              |               |               |
| 1                        | 110          | 60           | 37            |               |
| 5                        | 120          | 67           | 43            |               |
| 9                        | 128          | 73           | 45            |               |
| $t_C = 90, v_{SR} = 0.6$ |              |              |               |               |
| 1                        |              | 150          | 54            | 36            |
| 5                        |              | 160          | 58            | 39            |
| 9                        |              | 170          | 62            | 43            |

Wyznaczone parametry krzywych:  $b_1$  i  $b_2$  umieszczono w tabeli 5.2 zaciemniając pola w przypadku gdy współczynnik korelacji Pearsona jest mniejszy niż 0,95 ( $0.70 \div 0.95$ ). Dla niskich wartości parametru  $v_{SR}$  ograniczenie dolne jest prostą o równaniu  $S = S_0$  (w tabeli 5.2 w miejsce wartości parametru  $b_2$  wstawiono znak --).

Ponieważ w praktyce dochodzi do znacznych wahań parametru  $\sigma_h^2$  w krótkich przedziałach czasu (por. 3.1.1) postanowiono nie wyznaczać wartości  $\sigma_h^2$  dla których występują maksima i minima strat, lecz proponuje się określać zależność strat  $S_H$  od wartości  $\sigma_h^2$  średniej dla pomiarów godzinowych wg uproszczonej formuły (5.33)

$$S_H = 0.3 * [S_G - S_D] + S_D = S_0 + 0.3 * b_1 * [\sigma_h^2]^2 - 0.7 * b_2 * \text{sqrt}(\sigma_h^2). \quad (5.33)$$

Na podstawie formuły (5.33) oraz wartości parametrów  $b_1$  i  $b_2$  z tabeli 5.2 sporządzono wykres zależności strat czasu od rozrzutu  $\sigma_h^2$  dla kilku charakterystycznych przypadków (rysunek 5.5). Grubą kreską zaznaczono rzeczywisty czas zajęcia przekroju uwzględniający średnie odstępy między pojazdami. Dla dłuższych cykli i niskich natężeń ruchu o czasie zajęcia przekroju decyduje średni odstęp między pojazdami. Straty  $S_H$  rosną wraz ze wzrostem rozrzutu odstępów zgłoszeń pojazdów w kanałach. Wzrost ten jest szybszy dla większych natężeń ruchu (wyrażonych wskaźnikiem  $v_{SR}$ ), mniejszych długości światła zielonego i mniejszych długości cyklu. Cykle krótsze są więc bardziej wrażliwe na zróżnicowanie odstępów zgłoszeń.



Rysunek 5.5: Zależność strat czasu od rozrzutu zgłoszeń pojazdów w kanałach źródłowych

Tabela 5.2     Aproxymowane parametry funkcji ograniczających zróżnicowanie strat w zależności od rozrzutu zgłoszeń (\*  $10^{-6}$ )

|                          | $t_{ZY} = 5$ |       | $t_{ZY} = 8$ |       | $t_{ZY} = 10$ |       | $t_{ZY} = 12$ |       |
|--------------------------|--------------|-------|--------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|
| $t_{ZW}$                 | $b_1$        | $b_2$ | $b_1$        | $b_2$ | $b_1$         | $b_2$ | $b_1$         | $b_2$ |
| $t_C = 60, v_{SR} = 0.4$ |              |       |              |       |               |       |               |       |
| 1                        | 0,92         | --    | 0,36         | --    | 0,11          | --    | 0,06          | --    |
| 5                        | 0,94         | --    | 0,42         | --    | 0,12          | --    | 0,07          | --    |
| 9                        | 1,18         | --    | 0,48         | --    | 0,18          | --    | 0,11          | --    |
| $t_C = 60, v_{SR} = 0.5$ |              |       |              |       |               |       |               |       |
| 1                        | 3,37         | 15,9  | 2,07         | 5,8   | 0,75          | 1,3   |               |       |
| 5                        | 3,63         | 16,4  | 2,29         | 5,1   | 0,87          | 1,1   |               |       |
| 9                        | 5,60         | 16,4  | 3,99         | 4,9   | 2,03          | 1,1   |               |       |
| $t_C = 60, v_{SR} = 0.6$ |              |       |              |       |               |       |               |       |
| 1                        |              |       | 5,60         | 22,3  | 2,49          | 7,2   | 1,11          | 1,5   |
| 5                        |              |       | 6,14         | 24,2  | 2,79          | 7,4   | 1,37          | 1,3   |
| 9                        |              |       | 18,47        | 26,9  | 11,57         | 7,2   | 9,91          | 1,3   |
| $t_C = 90, v_{SR} = 0.4$ |              |       |              |       |               |       |               |       |
| 1                        | 0,24         | --    | 0,09         | --    | 0,03          | --    | 0,02          | --    |
| 5                        | 0,25         | --    | 0,10         | --    | 0,04          | --    | 0,02          | --    |
| 9                        | 0,25         | --    | 0,13         | --    | 0,05          | --    | 0,03          | --    |
| $t_C = 90, v_{SR} = 0.5$ |              |       |              |       |               |       |               |       |
| 1                        | 1,31         | 10,6  | 0,65         | 3,8   | 0,18          | 1,7   |               |       |
| 5                        | 1,34         | 12,8  | 0,69         | 4,1   | 0,20          | 2,0   |               |       |
| 9                        | 1,51         | 13,0  | 0,82         | 4,6   | 0,28          | 1,6   |               |       |
| $t_C = 90, v_{SR} = 0.6$ |              |       |              |       |               |       |               |       |
| 1                        |              |       | 2,49         | 23,3  | 0,94          | 4,5   | 0,40          | 1,6   |
| 5                        |              |       | 2,53         | 25,2  | 1,08          | 3,6   | 0,43          | 1,4   |
| 9                        |              |       | 3,24         | 27,0  | 1,54          | 3,5   | 0,74          | 1,3   |



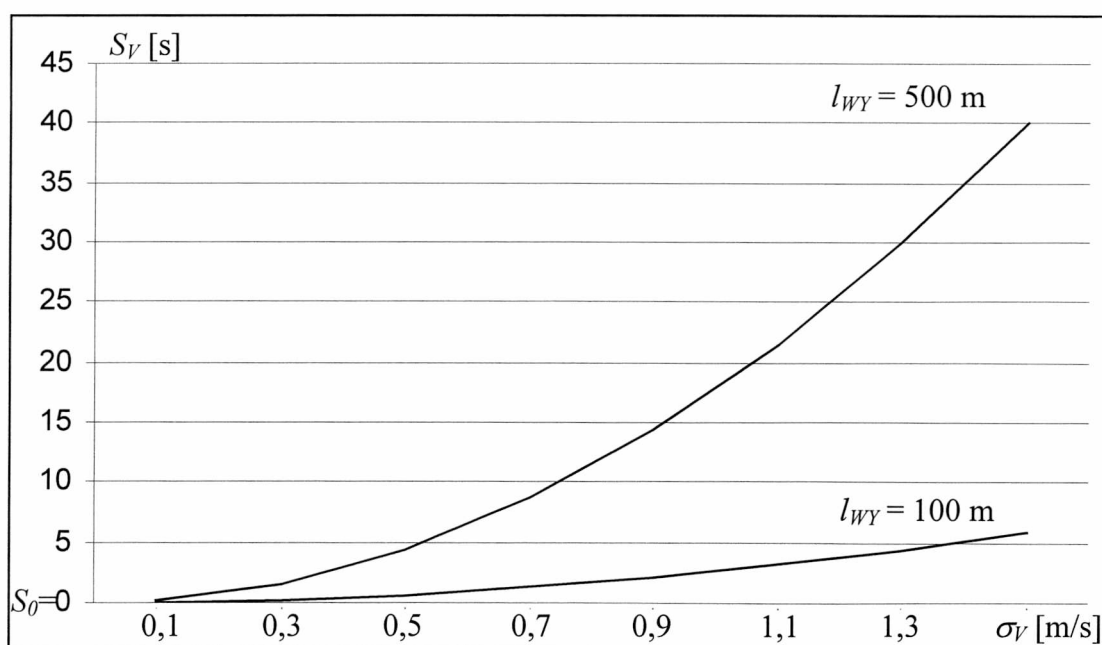
Wpływ rozrzutu prędkości na wielkość strat zwiększa się wraz ze wzrostem długości odcinka międzywęzłowego  $l_{WY}$ . Dla zmiennych wartości parametrów:  $t_C$ ,  $v_{SR}$ ,  $t_{ZW}$ ,  $t_{ZY}$  nie stwierdzono istotnych różnic w wielkości strat  $S_V$  w odniesieniu do strat  $S_0$  charakterystycznych dla odpowiednich wartości tych parametrów. Dlatego proponuje się wyznaczyć straty uwzględniające wpływ zróżnicowania prędkości w oparciu o uproszczoną formułę (5.34)

$$S_V = S_0 + b_3 \cdot [\sigma_V]^2, \quad (5.34)$$

gdzie:

$b_3$  – parametr zależny od  $l_{WY}$ .

Wartość parametru  $b_3$  wyznaczono dla  $l_{WY} = 100$  m ( $b_3 = 2.64$ ) i  $l_{WY} = 500$  m ( $b_3 = 17.79$ ) ze współczynnikami korelacji Pearsona równymi odpowiednio: 0.80 i 0.97. Odpowiadające obu przypadkom krzywe strat czasu umieszczono na rys. 5.6. Zróżnicowanie prędkości wpływa na wielkość strat  $S_V$  szczególnie przy dłuższych odcinkach międzywęzłowych. Dla odcinków krótszych (np. 100 m.) wpływ ten jest nieznaczny.



Rysunek 5.6: Zależność strat czasu od rozrzutu prędkości pojazdów na odcinku międzywęzłowym

### 5.3.2 Przekroje z przystankiem (PR, PS, SP)

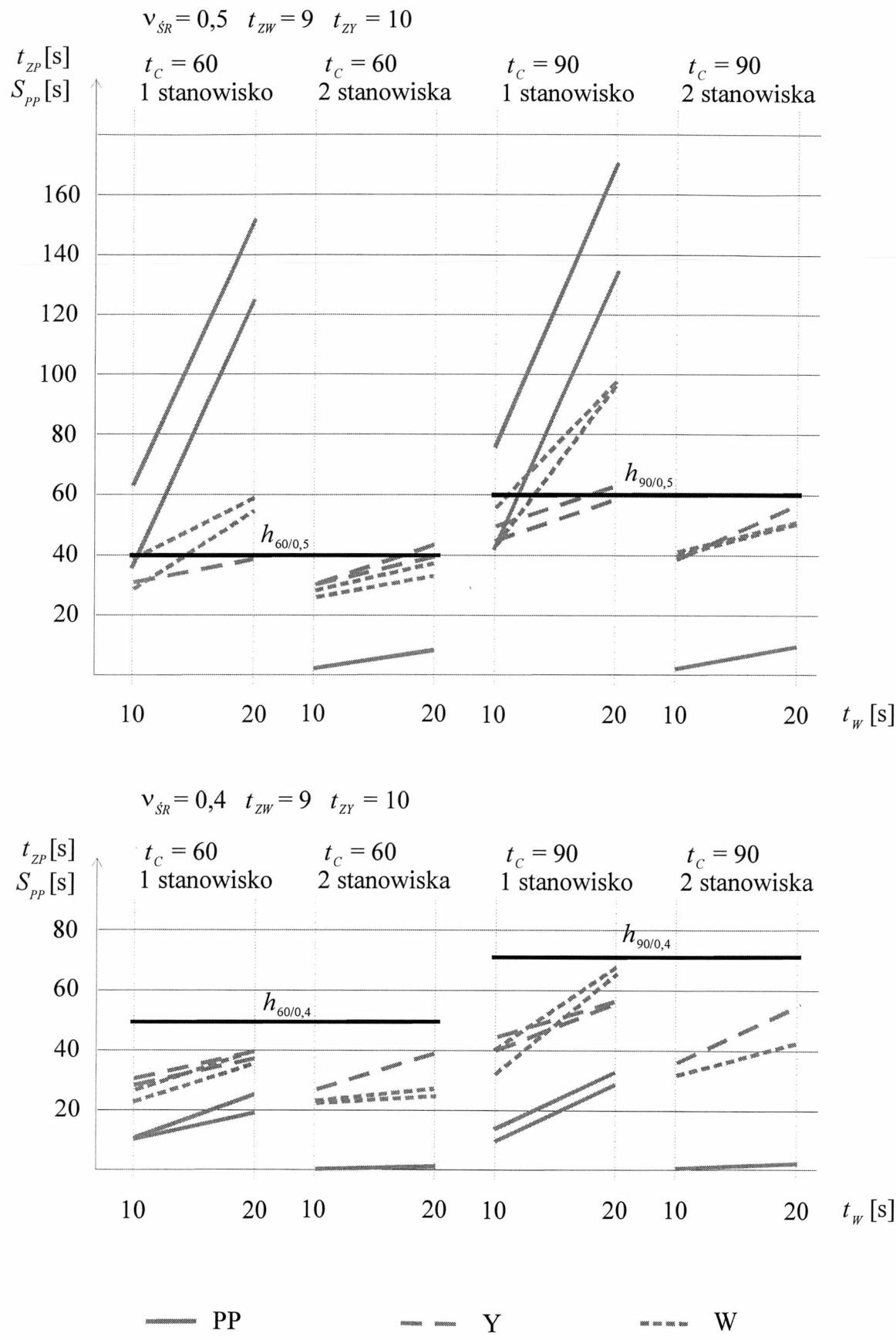
W celu stwierdzenia wpływu obecności przystanków na przepustowość odcinka międzywęzłowego przeanalizowano straty czasu w przekrojach związanych z przystankami:

- Dla przystanków na odcinku międzywęzłowym analizowano wpływ czasu wymiany pasażerów ( $t_W$ ) i jego odchylenie standardowe ( $\sigma_t$ ) na straty czasu w przekroju Y oraz na dodatkowe straty czasu w przekroju przed przystankiem (przekrój PP) powstające w sytuacji gdy wjazd na przystanek pojazdu  $\kappa$  nie jest możliwy, gdyż nie zakończyła się jeszcze wymiana pasażerów pojazdu  $\kappa-1$ .
- Dla przystanków położonych bezpośrednio przed przekrojem Y (bezpośrednio przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną) analizowano wpływ czasu wymiany pasażerów ( $t_W$ ) i jego odchylenie standardowe ( $\sigma_t$ ) na straty czasu w przekroju Y oraz na dodatkowe straty czasu w przekroju przed przystankiem (przekrój PP).
- Dla przystanków położonych bezpośrednio za przekrojem W (bezpośrednio za skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną) analizowano wpływ czasu wymiany pasażerów ( $t_W$ ) i jego odchylenie standardowe ( $\sigma_t$ ) na dodatkowe straty czasu ( $S_D$ ) dotyczące pojazdów zgłaszających się z kanałów źródłowych skrzyżowania przed W (przekrój PP'). Założono, że w sytuacji gdy nie zakończyła się wymiana pasażerów pojazdu  $\kappa-1$ , nie jest możliwy przejazd przez skrzyżowanie pojazdu  $\kappa$ . Przyjęto w uproszczeniu, że strata  $S_D$  dla takiego pojazdu równa jest długości cyklu pomniejszonej o długość światła zielonego.

Badania przeprowadzono dla charakterystycznych wartości parametrów:  $t_C$ ,  $v_{SR}$ ,  $t_{ZW}$ ,  $t_{ZY}$ . Analizowano dwa przypadki czasu wymiany:  $t_W = 10$  i  $20$  [s] oraz jego rozrzut ( $\sigma_t$ ) z przedziału:  $0 \div 7$  [s]. Uwzględniono przystanki z jednym (dla wszystkich lokalizacji przystanków) i dwoma (dla lokalizacji bezpośrednio przed lub bezpośrednio za skrzyżowaniem) stanowiskami postojowymi. Wyniki badań: straty czasu w przekrojach PP, Y, PP' ( $S_{PP}$ ,  $S_Y$ ,  $S_{PP'}$ ) i sumaryczny czas zajęcia przekroju krytycznego uwzględniający czas wymiany pasażerów dla przystanku przed Y ( $t_{ZP} = S_Y + t_W$ ) lub straty z blokowaniem dla przystanku za W ( $t_{ZP} = S_D + S_B$ ) przedstawiono w tabeli 5.3. Wartości w oknach tabeli odzwierciedlają zakres zmian strat w zależności od zmienności odchylenia standardowego czasu wymiany. Zaciemniono pola odpowiadające przekrojowi krytycznemu (decydującemu o przepustowości) dla danej

lokalizacji przystanków. Na rysunku 5.7 pokazano zmienność czasu zajęcia (wartości pomiędzy liniami tego samego typu) dla poszczególnych typów przekrojów w zależności od ww. parametrów. Zaznaczono ponadto czas zajęcia przekroju wynikający z odstępów między pojazdami charakterystyczny dla danych natężeń ruchu wyrażonych parametrem  $v_{SR}$ .

Zaobserwowano, że dla przystanków z pojedynczym stanowiskiem postojowym, wraz ze wzrostem natężenia ruchu na relacjach ( $v_{SR}$ ) wzrasta wielkość strat związanych z oczekiwaniem na wjazd na przystanek. O przepustowości decyduje w tym wypadku przekrój PP. Zastosowanie przystanku z dwoma stanowiskami postojowymi rozwiązuje ten problem. Sytuacja taka nie dotyczy przystanku na odcinku międzywęzłowym, który nie wpływa w sposób znaczący na przepustowość odcinka międzywęzłowego. Stwierdzono ponadto mniejszy czas zajęcia, a zatem wyższą przepustowość, dla przystanków zlokalizowanych bezpośrednio za skrzyżowaniem wobec przystanków położonych bezpośrednio przed skrzyżowaniem. Wpływ zróżnicowania czasu wymiany pasażerów na wielkość strat jest dla większości typów przekrojów nieznaczny. Uwidacznia się jedynie wyraźnie w przypadku przekroju przed przystankiem (PP). Dla niskich natężeń ruchu ( $v_{SR} = 0,4$ ) rejestrowane straty czasu nie przekraczają wartości średnich odstępów między pojazdami.



Rysunek 5.7: Czas zajęcia przekrojów związanych z przystankami

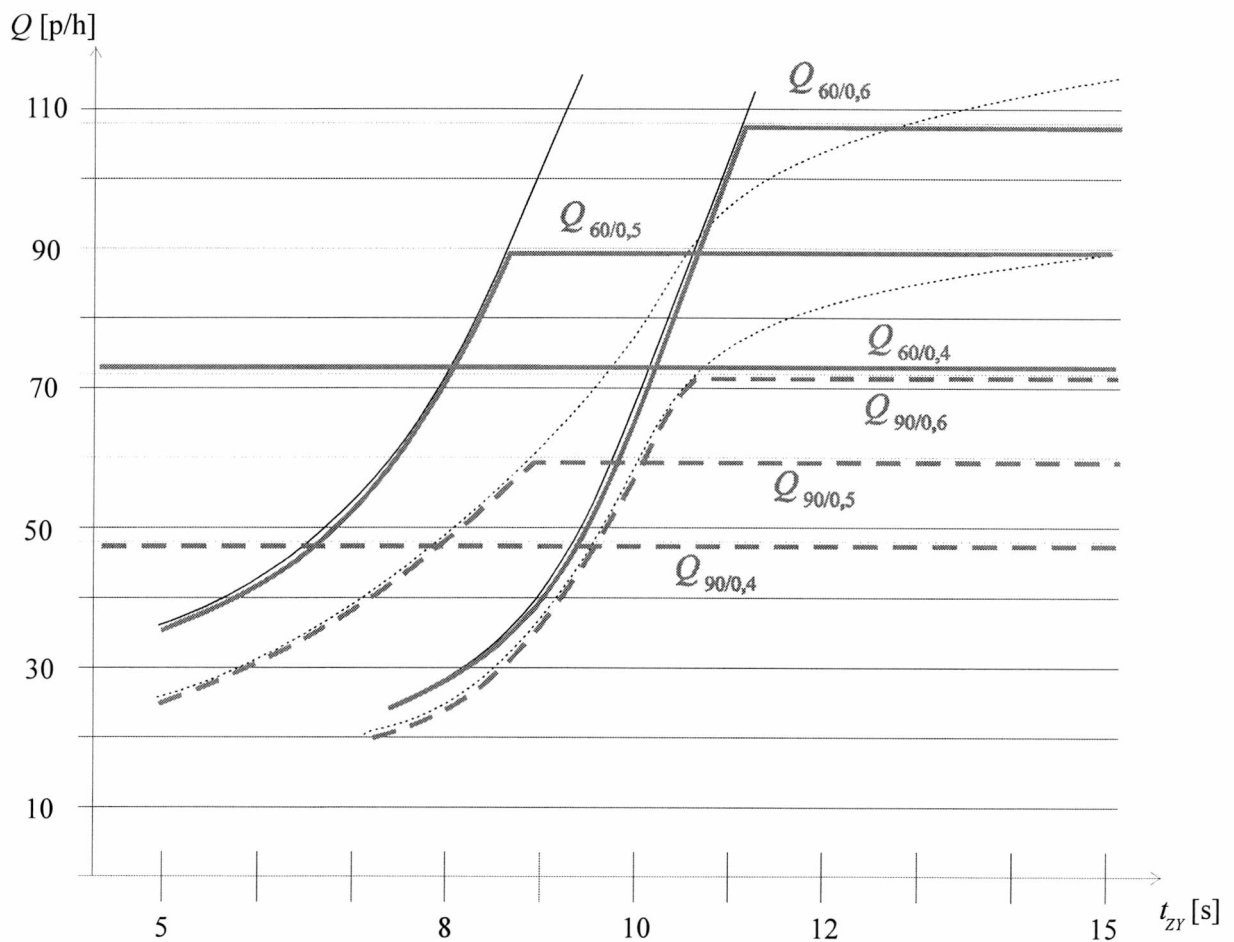
Tabela 5.3: Straty czasu i czas zajęcia przekrojów związanych z przystankami [s]

|                                | Jedno stanowisko |       |          |       |          |       |          | Dwa stanowiska |       |          |       |          |
|--------------------------------|------------------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|----------------|-------|----------|-------|----------|
| Lokalizacja przystanku:        | Odc. Międzywęzł. |       | Przed Y  |       |          | Za W  |          | Przed Y        |       |          | Za W  |          |
| $t_C/v_{SR}/t_{ZW}/t_{ZY}/t_W$ | $S_{PP}$         | $S_Y$ | $S_{PP}$ | $S_Y$ | $t_{ZP}$ | $S_D$ | $t_{ZP}$ | $S_{PP}$       | $S_Y$ | $t_{ZP}$ | $S_D$ | $t_{ZP}$ |
| 60/0.4/9/8/10                  | 0                | 28-29 | 13       | 21-22 | 31-32    | 1-5   | 29-34    | 1-2            | 22-23 | 32-33    | 0-1   | 28-30    |
| 60/0.4/9/10/10                 | 0                | 22    | 10-12    | 19-20 | 29-30    | 1-5   | 23-27    | 1              | 18-19 | 28-29    | 0-1   | 22-23    |
| 60/0.4/9/8/20                  | 2                | 28-29 | 21-36    | 18-22 | 38-42    | 16-17 | 44-46    | 3              | 23-24 | 43-44    | 3     | 31-32    |
| 60/0.4/9/10/20                 | 2                | 21-23 | 19-24    | 17-19 | 37-39    | 16-17 | 37-40    | 2              | 19-20 | 39-40    | 3     | 24-26    |
| 60/0.5/9/8/10                  | 0                | 45-47 | 59-69    | 25    | 35       | 2-10  | 47-57    | 10-11          | 24-25 | 34-35    | 0-1   | 45-48    |
| 60/0.5/9/10/10                 | 0                | 28-29 | 34-63    | 22-25 | 32-35    | 2-10  | 30-39    | 3-4            | 19-20 | 29-30    | 0-1   | 28-30    |
| 60/0.5/9/8/20                  | 3                | 45-48 | 127-250  | 20-23 | 40-43    | 29-30 | 74-78    | 18-22          | 26-27 | 46-47    | 8-10  | 53-58    |
| 60/0.5/9/10/20                 | 3                | 27-29 | 124-152  | 19-20 | 39-40    | 29-30 | 56-59    | 7-8            | 20-22 | 40-42    | 8-10  | 35-39    |
| 90/0.4/9/8/10                  | 0                | 41-42 | 15-16    | 34    | 44       | 1-8   | 42-50    | 1              | 32-33 | 42-43    | 0     | 41-42    |
| 90/0.4/9/10/10                 | 0                | 32-33 | 12-15    | 30-33 | 40-43    | 1-7   | 33-40    | 1              | 27-28 | 37-38    | 0     | 32-33    |
| 90/0.4/9/8/20                  | 2                | 50-51 | 26-46    | 36-41 | 56-61    | 24-26 | 74-77    | 4              | 41    | 61       | 1     | 51-52    |
| 90/0.4/9/10/20                 | 2                | 41-42 | 27-33    | 34-36 | 54-56    | 24-26 | 65-68    | 3              | 35    | 55       | 1     | 42-43    |
| 90/0.5/9/8/10                  | 0                | 62-65 | 67-76    | 41-42 | 51-52    | 2-14  | 64-79    | 9-10           | 36-37 | 46-47    | 0     | 62-65    |
| 90/0.5/9/10/10                 | 0                | 40-41 | 42-74    | 36-41 | 46-51    | 2-14  | 42-55    | 3              | 28-30 | 38-40    | 0     | 40-41    |
| 90/0.5/9/8/20                  | 3                | 71-73 | 151-265  | 40-45 | 60-65    | 44-47 | 115-120  | 21-23          | 43-44 | 63-64    | 2     | 73-75    |
| 90/0.5/9/10/20                 | 3                | 48-50 | 134-169  | 39-41 | 59-61    | 44-47 | 95-97    | 8-9            | 36-37 | 56-57    | 2     | 50-52    |

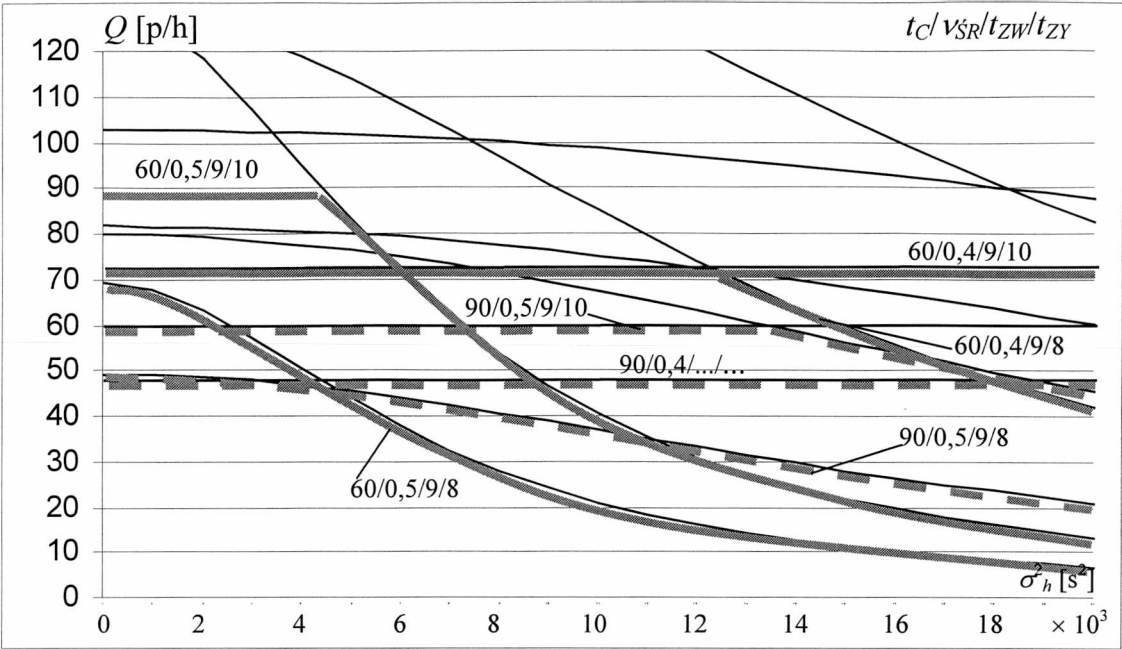
5.4 Skorygowane wartości przepustowości

Stosownie do określonych w rozdziale 3 wartości strat czasu możliwe jest określenie przepustowości dla konkretnych warunków i wartości parametrów ruchu. W sytuacji gdy wielkość strat nie różni się znacznie od wyznaczonych z modelu deterministycznego, dopuszcza się jego stosowanie. Za graniczne przyjęto różnice nie przekraczające 5 %. Oznacza to, że model deterministyczny może być stosowany przy długich sygnałach zielonych dla wszystkich relacji na obu skrzyżowaniach ( $t_{ZW}, t_{ZY} > 9$  s) oraz przy niskim zróżnicowaniu odstępów zgłoszeń ( $\sigma_h^2 = 0 \div 4000$  s<sup>2</sup>) i prędkości przejazdu ( $\sigma_v = 0 \div 0.7$  m/s). Wraz ze wzrostem natężenia ruchu wyrażonego przez  $v_{SR}$  oraz odległości między W i Y maleje podany wyżej zakres zastosowań modelu deterministycznego.

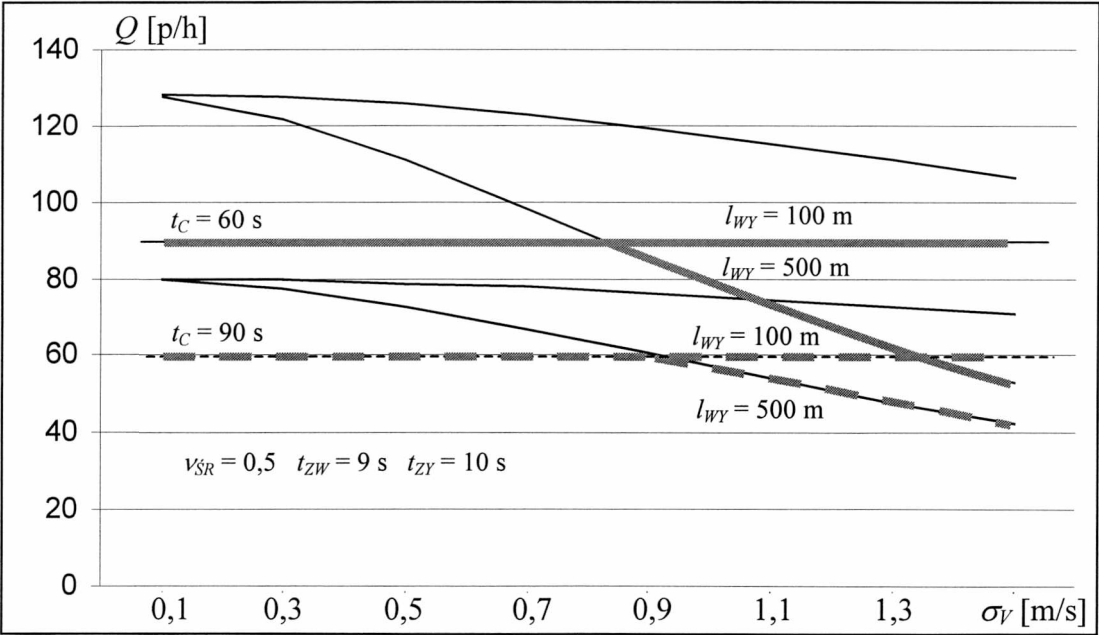
Na rysunkach 5.8 – 5.12 pokazano jak na przepustowość wpływa zmienność: długości światła zielonego, rozrzutu odstępów zgłoszeń w kanałach źródłowych, rozrzutu prędkości pojazdów na odcinku międzywęzłowym oraz zmienności czasu wymiany pasażerów na przystankach. Zaznaczono ograniczenie przepustowości wynikające z natężenia ruchu wyrażonego wskaźnikiem obciążenia wlotu. Wykorzystano straty czasu oraz czas zajęcia przekrojów krytycznych wyznaczone w rozdziale 5.3 oraz formułę (4.1) na obliczenie przepustowości.



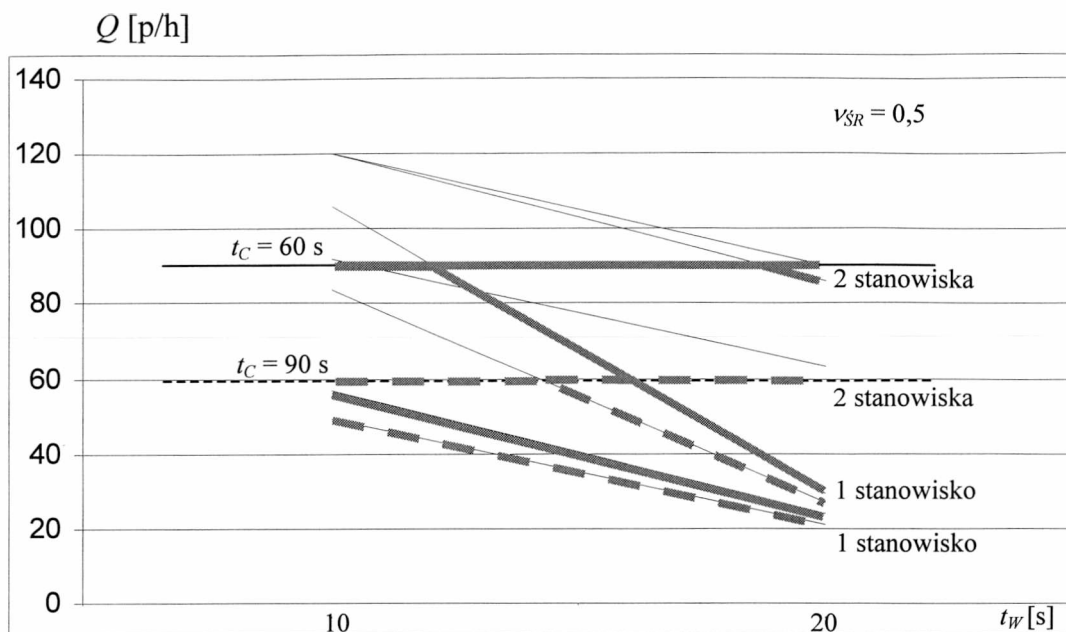
Rysunek 5.8: Wpływ zmienności długości światła zielonego na przepustowość



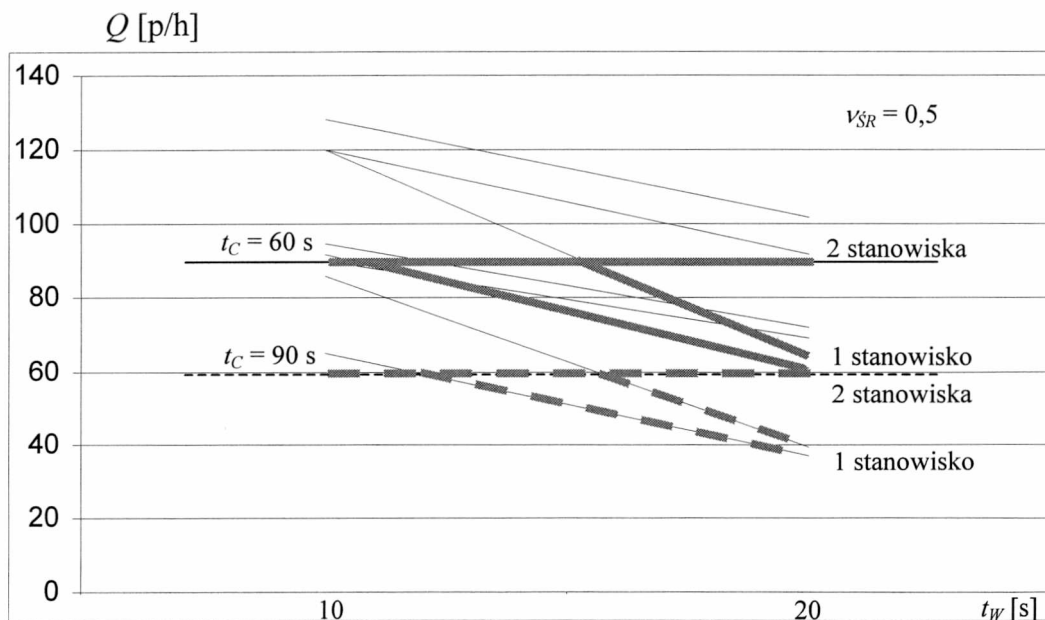
Rysunek 5.9: Wpływ zmienności rozrzutu odstępów zgłoszeń w kanałach źródłowych na przepustowość



Rysunek 5.10: Wpływ zmienności rozrzutu prędkości pojazdów na odcinku międzywęzłowym na przepustowość



Rysunek 5.11: Przepustowość przekroju PS jako funkcja czasu wymiany pasażerów



Rysunek 5.12: Przepustowość przekroju SP jako funkcja czasu wymiany pasażerów

Zaobserwowano zmniejszanie się przepustowości przekroju typu SK wraz ze zmniejszaniem się długości światła zielonego, wzrostem rozrzutu odstępów zgłoszeń między pojazdami w kanałach i wzrostem rozrzutu prędkości pojazdów na odcinku międzywęzłowym. Wpływ zmienności długości światła zielonego i zmienności odstępów zgłoszeń na przepustowość jest bardziej wyraźny dla cykli o mniejszej



długości. Natomiast wpływ zmienności prędkości pojazdów na przepustowość uwidacznia się wyraźniej dla dłuższych cykli i dłuższych odcinków międzywęzłowych. Dla niskich wartości wskaźnika obciążenia wlotu o przepustowości nie decydują straty czasu (wynika ona ze średnich odstępów między pojazdami).

Przepustowość przekrojów związanych z przystankami usytuowanymi na wlocie (PS) lub wylocie (SP) skrzyżowania z sygnalizacją świetlną maleje wraz ze wzrostem długości czasu wymiany pasażerów. Wpływ zróżnicowania czasu wymiany na przepustowość występuje przy dłuższych średnich czasach wymiany (20 s). Dla krótkich czasów wymiany czas zajęcia przekroju nie decyduje o przepustowości (jest ona warunkowana natężeniem ruchu wyrażonym wskaźnikiem obciążenia wlotu). Wyższe wartości przepustowości przekrojów typu PS i SP zaobserwowano dla cykli o mniejszej długości.

## 5.5 Przykład weryfikacji wyników badań

Wyznaczona w pracy przepustowość maksymalna nie jest możliwa do weryfikacji ponieważ nigdzie nie występują ekstremalne natężenia ruchu (dające wskaźnik obciążenia bliski  $v_G$ ). Trudno jest także o optymalny dobór wartości pozostałych parametrów charakteryzujących ruch. Możliwa jest natomiast ocena strat czasu wyznaczanych z modelu jako podstawy do określenia przepustowości. Na wiosnę roku 1999 dokonano we Wrocławiu pomiarów weryfikacyjnych na śródmiejskiej trasie tramwajowej: plac Społeczny – skrzyżowanie Kazimierza Wlk. z Krupniczą. Na tym odcinku znajdują się wszystkie przekroje charakterystyczne uwzględniane w modelu stochastycznym. Sytuację ogólną wraz z zaznaczeniem przekrojów charakterystycznych pokazano na rysunku 5.13.

### Dane dotyczące analizowanych skrzyżowań i przekrojów:

długości cykli sygnalizacyjnych: 80 s;

natężenia ruchu na wlotach: podano na rys. 5.13;

rozrzut odstępów zgłoszeń w kanałach przed przekrojem SK:  $\sigma_h^2 = 5000 \text{ s}^2$ ;

rozrzut prędkości pojazdów na odcinku międzywęzłowym przed przekrojem SK:

$\sigma_v = 0,7 \text{ m/s}$ ;

długość odcinka międzywęzłowego  $l = 200 \text{ m}$ ;

czas wymiany pasażerów i jego rozrzut na przystanku za skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną (przekrój SP):  $t_W = 20$  s,  $\sigma_t = 3$  s;

czas wymiany pasażerów i jego rozrzut na przystanku przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną (przekrój PS):  $t_W = 20$  s,  $\sigma_t = 4$  s;

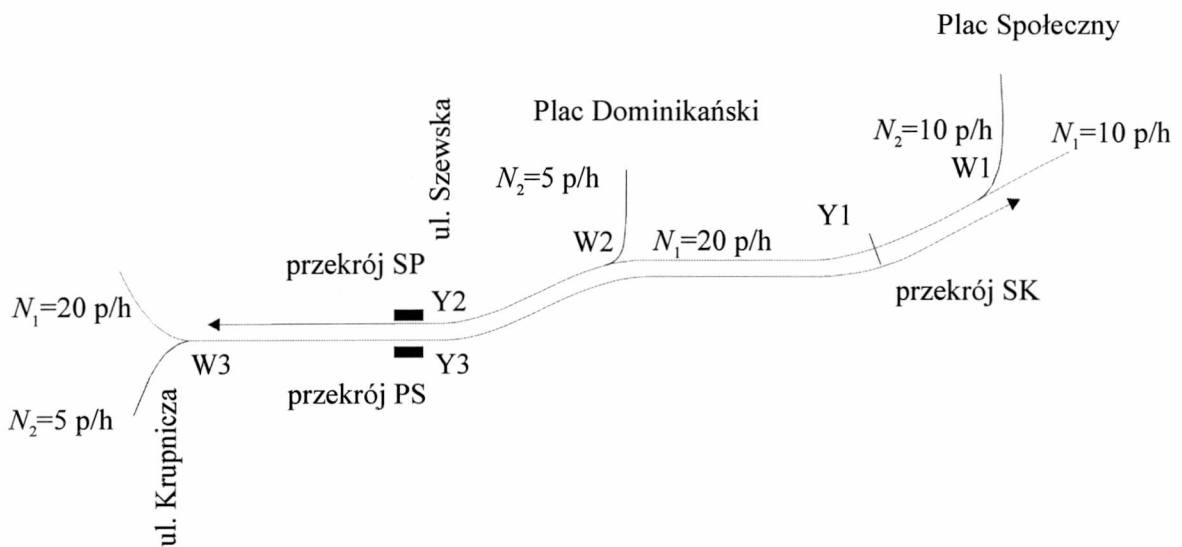
Zarejestrowane straty czasu:

przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną (przekrój SK): 20 s;

przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną za którym znajduje się przystanek (przekrój SP): 35 s;

przed przystankiem położonym przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną (przekrój PP): 16 s;

przy oczekiwaniu na możliwość odjazdu z przystanku położonego przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną (przekrój PS): 26 s.



Rysunek 5.13: Schemat odcinka pomiarów weryfikacyjnych

Wyznaczenie strat czasu dla przekroju SK:

średni wskaźnik obciążenia wlotu: wlot 1:  $v_1 = 0,22$ , wlot 2:  $v_2 = 0,22$ , wlot 3:  $v_3 = 0$  (brak wlotu),  $v_{SR} = 0,15$ ;

długości światła zielonego: skrzyżowanie W: 15s i 10s, średnio 12s, skrzyżowanie Y: 21s (do dalszych analiz przyjęto 15 s);

wyznaczenie strat  $S_0$  (tabela 5.1): dla  $t_C = 60$ s i  $v = 0,4$   $S_0 = 18$ s, dla  $t_C = 60$ s i  $v = 0,6$   $S_0 = 29$ s, dla  $t_C = 60$ s i  $v = 0,15$   $S_0 = 12$ s (interpolacja), dla  $t_C = 90$ s i  $v = 0,4$   $S_0 = 29$ s, dla  $t_C = 90$ s i  $v = 0,6$   $S_0 = 44$ s, dla  $t_C = 90$ s i  $v = 0,15$   $S_0 = 21$ s (interpolacja), dla  $t_C = 80$ s i  $v = 0,15$   $S_0 = 17$ s (interpolacja);

modyfikacje strat uwzględniające rozrzut odstępów zgłoszeń i rozrzut prędkości pojazdów: niski rozrzut odstępów zgłoszeń nie wpływa na wielkość strat (rysunek 5.5), z rysunku 5.6: dla  $l=100\text{m}$ .  $S_V=S_0 + 2\text{s}$ , dla  $l=500\text{m}$ .  $S_V=S_0 + 8\text{s}$ ,  $l=200\text{m}$ .  $S_V=S_0 + 4\text{s}$  (interpolacja);

ostatecznie  $S_{SK} = 21 \text{ s}$ .

#### Wyznaczenie strat czasu dla przekroju SP:

średni wskaźnik obciążenia wlotu: wlot 1:  $v_1=0,11$ , wlot 2:  $v_2=0,44$ , wlot 3:  $v_3=0$  (brak

wlotu),  $v_{SR}=0,18$ ;

długości światła zielonego: skrzyżowanie W: 11s i 8s, średnia ważona (wg natężeń na wlotach) 8.6s, skrzyżowanie Y: 18s (do dalszych analiz przyjęto 15 s);

wyznaczenie strat  $S_W$  (rysunek 5.7): dla  $v=0.4$  i  $t_C = 60\text{s}$   $S_W=37\text{s}$ , dla  $v=0.4$  i  $t_C = 90\text{s}$   $S_W=63\text{s}$ , dla  $v=0.4$  i  $t_C = 80\text{s}$   $S_W=54\text{s}$  (interpolacja), dla  $v=0.5$  i  $t_C = 60\text{s}$   $S_W=58\text{s}$ , dla  $v=0.5$  i  $t_C = 90\text{s}$   $S_W=95\text{s}$ , dla  $v=0.5$  i  $t_C = 80\text{s}$   $S_W=83\text{s}$  (interpolacja), ostatecznie dla  $v=0.18$  i  $t_C = 80\text{s}$   $S_W=35\text{s}$  (interpolacja).

#### Wyznaczenie strat czasu dla przekroju PS:

średni wskaźnik obciążenia wlotu: wlot 1:  $v_1=0,11$ , wlot 2:  $v_2=0,44$ , wlot 3:  $v_3=0$  (brak

wlotu),  $v_{SR}=0,18$ ;

długości światła zielonego: skrzyżowanie W: 21s i 9s, średnia ważona (wg natężeń na wlotach) 11.4s, skrzyżowanie Y: 18s (do dalszych analiz przyjęto 15 s);

wyznaczenie strat  $S_Y$  i  $S_{PP}$  (rysunek 5.7): dla  $v=0.4$  i  $t_C = 60\text{s}$   $S_Y=38\text{s}$ ,  $S_{PP}=22\text{s}$ , dla  $v=0.4$  i  $t_C = 90\text{s}$   $S_Y=56\text{s}$ ,  $S_{PP}=30\text{s}$ , dla  $v=0.4$  i  $t_C = 80\text{s}$   $S_Y=50\text{s}$ ,  $S_{PP}=27\text{s}$  (interpolacja), dla  $v=0.5$  i  $t_C = 60\text{s}$   $S_Y=40\text{s}$ ,  $S_{PP}=135\text{s}$ , dla  $v=0.5$  i  $t_C = 90\text{s}$   $S_Y=60\text{s}$ ,  $S_{PP}=155\text{s}$ , dla  $v=0.5$  i  $t_C = 80\text{s}$   $S_Y=54\text{s}$ ,  $S_{PP}=148\text{s}$  (interpolacja), ostatecznie dla  $v=0.18$  i  $t_C = 80\text{s}$   $S_Y=30\text{s}$ ,  $S_{PP}=12\text{s}$  (interpolacja).

#### Komentarz:

Straty czasu wyznaczone z modelu nieznacznie różnią się od zarejestrowanych (w przekroju SK: z modelu 21s, rejestrowane 20s, w przekroju SP: z modelu 35s, rejestrowane 35s, w przekroju PS (straty w Y): z modelu 30s, rejestrowane 26s, w przekroju PS (straty w PP): z modelu 12s, rejestrowane 16s). W ramach weryfikowanych parametrów można więc uznać model za poprawny.

## 6 PODSUMOWANIE

### 6.1 Uwagi ogólne

Celem niniejszej pracy było opracowanie metody określania przepustowości maksymalnej elementów sieci komunikacji zbiorowej. Analizowano charakterystyczny fragment sieci obejmujący zespół dwóch skrzyżowań z sygnalizacją świetlną i znajdujący się między nimi odcinek międzywęzłowy z wydzielonym torem dla pojazdów komunikacji zbiorowej. W ramach tego fragmentu odzwierciedlono warunki ruchu panujące w śródmieściach dużych, europejskich miast.

Po wykonaniu przeglądu modeli ruchu wykorzystywanych do obliczania przepustowości stwierdzono, że do rozwiązania zagadnień pracy konieczne jest zbudowanie nowego modelu ujmującego specyfikę ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej na trasach wydzielonych przy dużym natężeniu ruchu i zróżnicowanych typach pojazdów. W takich warunkach na płynność ruchu i przepustowość wpływają czynniki dotychczas kompleksowo nie uwzględniane: długość odcinka międzywęzłowego, natężenie ruchu na poszczególnych relacjach, długości i kolejność faz, koordynacja sygnalizacji, położenie przystanków względem skrzyżowania (sygnalizacji), rozkład odstępów między pojazdami zgłaszającymi się w kanałach źródłowych, rozkład prędkości pojazdów na odcinku międzywęzłowym, rozkład czasu wymiany pasażerów na przystankach. Czynniki te podzielono na deterministyczne i losowe.

Zbudowano prosty, analityczny model ruchu służący określeniu przepustowości wszystkich przekrojów krytycznych, czyli decydujących o przepustowości w analizowanym fragmencie sieci, przy założeniu braku czynników losowych (model deterministyczny). Za podstawę do określenia przepustowości przyjęto czas zajęcia przekrojów krytycznych obejmujący także różnego rodzaju straty czasu. W nawiązaniu do pomiarów zmienności parametrów ruchu określono, za pomocą modelu stochastycznego, zakres zastosowań modelu deterministycznego.

Pokazano wpływ poszczególnych parametrów ruchu na przepustowość, także w sytuacji dużego zakresu ich zmienności. Określono metodę wyznaczania

przepustowości, a dla charakterystycznych wartości parametrów sporządzono wykresy. Stwierdzono, że największe zaburzenia płynności ruchu (największe straty czasu) występują w przekrojach związanych z przystankiem usytuowanym bezpośrednio przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną. Przekroje te decydują więc o przepustowości całej sieci. Wykazano, że na przepustowość w tych przekrojach istotny wpływ mają czynniki deterministyczne, a mniejszy losowe, zwłaszcza przy niewielkich odległościach między skrzyżowaniami. Dla uzyskania bądź utrzymania płynności ruchu istotne staje się optymalne sterowanie ruchem w powiązaniu z lokalizacją przystanków. Dowiedziono tym samym słuszności tezy założonej na wstępie pracy.

## 6.2 Kierunki dalszych badań

Rozwiązania przedstawione w pracy dotyczą przepustowości maksymalnej, możliwej do osiągnięcia tylko w przypadku optymalnego doboru proporcji natężeń ruchu dla relacji i optymalnych podziałów cykli (momentów rozpoczęcia poszczególnych faz). Opisane warunki uzyskania optimum mogą być wykorzystywane na etapie planowania sieci połączeń oraz przy programowaniu sterowania ruchem w skali całej sieci. Do określenia przepustowości praktycznej, odpowiadającej konkretnym warunkom ruchowym, konieczne jest uwzględnienie wyżej wymienionych, dodatkowych parametrów. Powinno to być przedmiotem dalszych badań, których efektem może być sporządzenie katalogu rozwiązań wraz z podaniem ich przepustowości. Uwzględnić należy także mniejszą liczbę kanałów (wlotów) niż przyjęte w modelach, gdyż jest to sytuacja często spotykana w praktyce.

Wskazano, że najskuteczniejszym narzędziem do wyznaczania przepustowości, w sytuacji występowania dużej ilości parametrów o różnym charakterze (deterministyczne i losowe) i znacznym zakresie zmienności, jest modelowanie symulacyjne. Zbudowany na potrzeby pracy program, modelujący ruch we fragmencie sieci, można w prosty sposób rozbudować, tak by objął analizą dodatkowe parametry. Posłuży on wtedy do badań sytuacji ruchowych i obliczania przepustowości dla zindywidualizowanych warunków charakteryzujących praktycznie każdy węzeł w sieci.

## 7 LITERATURA

- [1] Adamski A. „Problem racjonalnej odległości między przystankami na linii komunikacji zbiorowej” Zeszyty Naukowo- Techniczne Oddziału SITK w Krakowie z. 43 „Problemy transportu i inżynierii lądowej w działalności naukowej i technicznej krakowskiego środowiska SITK” seria Monografie nr 2 Kraków 1996
- [2] Adamski A. „Problemy sterowania komunikacją zbiorową w miastach” Zeszyty Naukowo- Techniczne Oddziału SITK w Krakowie z. 64 „Sterowanie ruchem w miejskiej komunikacji zbiorowej” seria Materiały konferencyjne nr 27 Kraków 1998
- [3] Addison P. S. Low D. J. „Order and Chaos in the Dynamics of Vehicle Platoons” Traffic Engineering + Control 7,8/1996
- [4] Akcelik R. „Relating Flow, Density, Speed and Travel Time Models for Uninterrupted and Interrupted Traffic” Traffic Engineering + Control 9/1996
- [5] Aldrin M. „Traffic Volume Estimation from Short-Period Traffic Counts” Traffic Engineering + Control 12/1998
- [6] Arasan V. T. Jagadeesh K. „Effect of Heterogeneity of Traffic on Delay at Signalized Intersections” Journal of Transportation Engineering 5/1995
- [7] Arnold D. Bernd R. „Analyse des Lkw-Ankunftsverhaltens in Terminals des Kombinierten Verkehrs” Internationales Verkehrswesen 6/1998
- [8] Azzawi M. „An Evaluation of Current Traffic Models Used to Design Priority Junctions” Traffic Engineering + Control 5/1997
- [9] Brandt S. Irsch M. Hoffmann G. „Die Saarbahn – Ab durch die Mitte - schon 1997” Stadtverkehr 7 / 1996
- [10] Brilon W. Wu N. Lemke K. „Leistungsfähigkeit bei zweigeteilter Vorfahrt” Strassenverkehrstechnik 6/1996
- [11] Brilon W. Bondzio L. Wu N. „Neue Forschungsergebnisse zur Kapazität von Kreisverkehrsplätzen” Strassenverkehrstechnik 9/1997
- [12] Bryszewski M. Sambor A. „Lekka komunikacja szynowa w regionie Karlsruhe” Transport Miejski 7-8 / 1994

- [13] Carbaugh J. Godbole D. N. Sengupta R. „Safety and Capacity Analysis of Automated and Manual Highway Systems” *Transportation Research, Part C*, vol. 6C, no.1,2/1998
- [14] Chakroborty P. Deb K. Subrahmanyam P. S. „Optimal Scheduling of Urban Transit Systems Using Genetic Algorithms” *Journal of Transportation Engineering* 6/1995
- [15] Chang T. H. „Analysis of Characteristics of Mixed Traffic Flow of Autopilot Vehicles and Manual Vehicles” *Transportation Research, Part C*, vol. 5C, no.6/1997
- [16] Costa A. Markellos R. N. „Evaluating Public Transport Efficiency with Neural Network Models” *Transportation Research, Part C*, vol. 5C, no.5/1997
- [17] Czychuła W. Gertz J. Kopta T. Rudnicki A. „Opcje rozwoju systemu transportowego w Polsce” w „Alternatywna polityka transportowa. Zeszyt 3 opcje” *Biuletyn InE nr 7 / 97 Warszawa 1997*
- [18] Daganzo C. F. Lin W. H. Castillo J. M. „A Simple Physical Principle for the Simulation of Freeways with Special Lanes and Priority Vehicles” *Transportation Research, Part B*, vol. 31B, no.2/1997
- [19] Datka S. Suchorzewski W. Tracz M. „Inżynieria ruchu” WKiŁ Warszawa 1997
- [20] Dia H. Rose G. „Development and Evaluation of Neural Network Freeway Incident Detection Models Using Field Data” *Transportation Research, Part C*, vol. 5C, no.5/1997
- [21] Dostal M. „Die Stuttgarter Strassenbahn vor der umstellung auf Stadtbahn” *Strassenbahn* 2 / 1997
- [22] Drew R.D. „Traffic flow theory and control” wydanie radzieckie Transport Moskwa 1972
- [23] Druitt S. „An Introduction to Microsimulation” *Traffic Engineering + Control* 9/1998
- [24] Dydkowski G. Tomanek R. „Integracja komunikacji miejskiej w aglomeracji katowickiej” *Przegląd Komunikacyjny* 3/1995
- [25] Emmerich H. Nagatani T. Nakanishi K. „From Modified KdV-Equation to a Second-Order Cellular Automaton for Traffic Flow” *Physica A: Statistical And Theoretical Physics* v. 254, nos. 3-4, 1998

- [26] Friedberg J. „Krakowski szybki tramwaj, linia północ – południe” Zeszyty Naukowo- Techniczne Oddziału SITK w Krakowie z. 62 „Kierunki rozwoju komunikacji tramwajowej w Polsce” seria Materiały konferencyjne nr 25 Kraków 1998
- [27] Gaca S. Gondek S. Nowakowska M. „Wpływ opisu procesu zgłoszeń na wyniki obliczeń przepustowości wlotów podporządkowanych” Drogownictwo 3/1984
- [28] Gawlikowski A. „Ulica w strukturze miasta” Skrypt Politechniki Warszawskiej Warszawa 1992
- [29] Gniedenko B.W. Kowalenko I.N. „Wstęp do teorii obsługi masowej” PWN Warszawa 1971
- [30] Goebel S. „Oberhausen eröffnet Strassenbahn und weitert Verkehrsangebot um ein Drittel aus” Stadtverkehr 7 / 1996
- [31] Grajnert J. „Nowoczesne pojazdy komunikacji miejskiej” Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Wrocław 1995
- [32] „Gummitram bekommt behördliche Zulassung” Strassenbahn 2 / 1997
- [33] Hagring O. „A Further Generalization of Tanner’s Formula” Transportation Research, Part B, vol. 32B, no.6/1998
- [34] Hamed M. M. Easa S. M. Batayneh R. R. „Disaggregate Gap-Acceptance Model for Unsignalized T-Intersections” Journal of Transportation Engineering 1/1997
- [35] Hansen I. Westland D. „Vehrrkehrsstaus rational betrachtet” Strassenverkehrstechnik 11/1998
- [36] Hazim N. G. „Badania i symulacja ruchu drogowego na skrzyżowaniach typu rondo” Praca Doktorska (niepublikowana) Politechnika Wrocławska Raport Instytutu Inżynierii Lądowej z serii PRE nr 27/1991
- [37] Herrmann M. Kerner B. S. „Local Cluster Effect in Different Traffic Flow Models” Physica A: Statistical And Theoretical Physics v. 255, nos. 1-2, 1998
- [38] Hidas P. „A Car-Following Model for Urban Traffic Simulation” Traffic Engineering + Control 5/1998
- [39] Hoeltge D. „1998 in Bremen: das Jahr der Strassenbahn” Stadtverkehr 7-8 / 1998
- [40] Holland E. N. „A Continuum Model for the Dispersion of Traffic on Two-Lane Roads” Transportation Research, Part B, vol. 31B, no.6/1997



- [41] Hołubiec J. Rekuć L. „Wspomaganie komputerowe przy rozwiązaniu problemu synchronizacji w miejskiej komunikacji publicznej” Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITK w Krakowie z. 51 „Zarządzanie publicznym transportem zbiorowym w miastach” seria Materiały konferencyjne nr 16 Kraków 1997
- [42] Instrukcja obliczania przepustowości dróg zamiejskich GDDP Warszawa 1991
- [43] Instrukcja obliczania przepustowości dróg I i II klasy technicznej GDDP Warszawa 1995
- [44] Instrukcja projektowania małych rond GDDP Warszawa 1996
- [45] Jain R. Smith J. M. „Modeling Vehicular Traffic Flow Using M/G/C/C State Dependent Queueing Models” Transportation Science vol.31 4/1997
- [46] Janson B. N. Buchholz K. „Modified Delay Equations for Permitted Left Turns” Journal of Transportation Engineering 4/1998
- [47] Jercha A. „Koszty podróży w miejskiej sieci komunikacyjnej” Raport Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej z serii PRE nr 50/1980
- [48] Johansson T. „Busse mit alternativen Antrieben” Stadtverkehr 3 / 1998
- [49] Kaczmarek M. Piotrowski J. Cejrowski M. „Koncepcja sterowania ruchem ulicznym z priorytetem dla tramwaju na ulicy Głogowskiej w Poznaniu” Konferencja Naukowo- Techniczna „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego” Poznań 8 – 10. 10. 1997
- [50] Kaczmarek M. Krych A. Rakiewicz M. „Pilotażowa realizacja inteligentnego sterowania ruchem ulicznym z priorytetem dla tramwaju w Poznaniu” Zeszyty Naukowo- Techniczne Oddziału SITK w Krakowie z. 64 „Sterowanie ruchem w miejskiej komunikacji zbiorowej” seria Materiały konferencyjne nr 27 Kraków 1998
- [51] Kerner B. S. Rehborn H. „Messungen des Verkehrsflusses: Charakteristische eigenschaften von Staus auf Autobahnen” Internationales Verkehrswesen 5/1998
- [52] Kłosek K. Zych F. „Rola komunikacji tramwajowej w przyszłym systemie transportu zbiorowego województwa katowickiego” Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITK w Krakowie z. 62 „Kierunki rozwoju komunikacji tramwajowej w Polsce” seria Materiały konferencyjne nr 25 Kraków 1998

- [53] Komar Z. „Optymalizacja synchronizowanej sygnalizacji świetlnej na sieci ulicznej” Praca Doktorska (niepublikowana) Politechnika Wrocławska Raport Instytutu Inżynierii Lądowej z serii PRE nr 63/1979
- [54] Komar Z. Wolek Cz. „Inżynieria ruchu drogowego. Wybrane zagadnienia” Skrypt Politechniki Wrocławskiej Wrocław 1994
- [55] Konarski A. „Przepustowość dróg i ulic” Skrypt PWr Wrocław 1977
- [56] Kopiński M. „Matematyczne modele ruchu na wybranych skrzyżowaniach drogowych” Praca Doktorska (niepublikowana) Politechnika Wrocławska Raport Instytutu Inżynierii Lądowej z serii PRE nr 54/1981
- [57] Kopta T. Rudnicki A. „Przegląd rozwiązań umożliwiających realizację celów i zasad alternatywnej polityki transportowej” w „Alternatywna polityka transportowa. Zeszyt 4 Instrumenty” Biuletyn InE nr 8 / 98 Warszawa 1998
- [58] Kou C. Machemehl R. B. „Probabilistic speed-Estimation Measurement Errors through Video Images” Journal of Transportation Engineering 2/1998
- [59] Kozan E. „Comparison of Analytical and simulation Planning Models of Seaport Container Terminals” Transportation Planning and Technology” 3/1997
- [60] Krawczyk G. „Optymalizacja sieci miejskiej komunikacji szynowej” Zeszyty Naukowo- Techniczne Oddziału SITK w Krakowie z. 42 „Obsługa transportowa aglomeracji miejskich i ruchu lokalnego” seria Materiały różne nr 10 Kraków 1996
- [61] Kruszyna M. „Sytuowanie przystanków dla wygody pasażerów” Transport Miejski 10/1996
- [62] Kruszyna M. „Pararondo jako propozycja funkcjonalnego węzła przesiadkowego” Transport Miejski 4/1997
- [63] Kruszyna M. Lutogniewski J. Trzciniowicz B. Wierzbicki M. „Program modernizacji linii tramwajowej nr 7” (praca niepublikowana) Wrocław 1997
- [64] Kruszyna M. Wolek Cz. „Straty czasów tramwajów w rejonach przystanków” Transport Miejski 1 / 1998
- [65] Kruszyna M. „Wpływ organizacji ruchu na straty czasu pojazdów komunikacji zbiorowej” Zeszyty Naukowo- Techniczne Oddziału SITK w Krakowie z. 64 „Sterowanie ruchem w miejskiej komunikacji zbiorowej” seria Materiały konferencyjne nr 27 Kraków 1998

- [66] Kruszyna M. „Czas opuszczenia zajmowanego stanowiska przez pojazd komunikacji zbiorowej” ... (*w druku*)
- [67] Kruszyna M. Makuch J. Trzciniowicz B. „Autobus razem z tramwajem” ... (*w druku*)
- [68] Kurowski M. Pietrucha F. Rudnicki A. Sambor A. „Modułowa struktura modelowania funkcjonowania obiektów systemu miejskiego transportu zbiorowego” ...
- [69] Kurowski M. „Identyfikacja procesu funkcjonowania trójramiennego węzła tramwajowego” Konferencja naukowa Wydziału Transportu Politechniki Krakowskiej Kraków Muszyna 3 – 5. 12. 1985
- [70] Kurowski M. „Wpływ sposobu organizacji ruchu kołowego i pieszego na skrzyżowaniu na warunki funkcjonowania komunikacji tramwajowej” ...
- [71] Kurowski M. „Modelowanie ruchu tramwajowego w rejonie wlotu skrzyżowania z sygnalizacją świetlną” Zeszyty Naukowo- Techniczne Oddziału SITK w Krakowie z. 21 „Transport i budownictwo komunikacyjne w problematyce naukowej i technicznej krakowskiego środowiska SITK” Kraków 1992
- [72] Lam W. H. K. Poon A. C. K. Mung G. K. S. „Integrated Model for Lane-Use and Signal-Phase Designs” *Journal of Transportation Engineering* 2/1998
- [73] Ledoux C. „An Urban Traffic Flow Model Integrating Neural Networks” *Transportation Research, Part C*, vol. 5C, no.5/1997
- [74] Lee S. G. Khoo L. P. „Neurosimulation Modeling of a Scheduled Bus Route” *Journal of Transportation Engineering* 3/1997
- [75] Leszczyński J. „Modelowanie symulacyjne w transporcie kolejowym” WKiŁ Warszawa 1973
- [76] Leszczyński J. „Modelowanie systemów i procesów transportowych” Skrypt Politechniki Warszawskiej Warszawa 1994
- [77] Lingras P. „Traffic Parameter Estimation and Highway Classification: Rough Patterns Using a Neural Networks Approach” *Transportation Planning and Technology* 3/1998
- [78] Liu G. Lyrantzis A. S. Michalopoulos P. G. „Numerical Simulation of Freeway Traffic Flow” *Journal of Transportation Engineering* 6/1997
- [79] Marcinkowski J. „Rozkłady prawdopodobieństwa przydatne w rozwiązywaniu problemów transportu” Skrypt Politechniki Wrocławskiej Wrocław 1997

- [80] Martinelli D. R. Xu D. „Delay Estimation and Optimal Length for Four-Lane Divided Freeway Workzones” *Journal of Transportation Engineering* 2/1996
- [81] Milosavljević N. Teodorović D. Papić V. Parković G. „A Fuzzy Approach to the Vehicle Assignment Problem” *Transportation Planning and Technology* 1/1996
- [82] Mongeot H. „Modelling of Traffic Flow Dynamics in Incident Conditions Using the First-Order Macroscopic Approach” *Traffic Engineering + Control* 11/1997
- [83] Nagatani T. „Time-Dependent Ginzburg-Landau Equation the Jamming Transition in Traffic Flow” *Physica A: Statistical And Theoretical Physics* v. 258, nos. 1-2, 1998
- [84] Nam D. H. Drew D. R. „Traffic Dynamics: Method for Estimating Freeway Travel Times in Real Time from Flow Measurements” *Journal of Transportation Engineering* 3/1996
- [85] Obretenow A. Dimitrow B. „Teoria masowej obsługi. Poradnik” PWN Warszawa 1989
- [86] Poch M. Mannering F. „Negative Binomial Analysis of Intersection-Accident Frequencies” *Journal of Transportation Engineering* 2/1996
- [87] Podolski J. „Co to jest szybki tramwaj?” *Transport Miejski* 6/1998
- [88] Polus A. Craus J. Reshetnik I. „Non-Stationary Gap Acceptance Assuming Drivers' learning and Impatience” *Traffic Engineering + Control* 6/1996
- [89] Powell M. „Modelling the Behaviour of Motorcycles at Traffic Signals” *Traffic Engineering + Control* 10/1997
- [90] Rataj M. „Wybrane zagadnienia transportu pasażerskiego w RFN” *Zeszyty Naukowo- Techniczne Oddziału SITK w Krakowie* z. 42 „Obsługa transportowa aglomeracji miejskich i ruchu lokalnego” seria Materiały różne nr 10 Kraków 1996
- [91] „Regionalisierung des Nahverkehrs. Modellprojekt Rhein- Main” Frankfurt a.M. 1994
- [92] Rengaraju V. R. Trinadha R. „Vehicle-Arrival Characteristics at Urban Uncontrolled Intersections” *Journal of Transportation Engineering* 4/1995
- [93] Riechers D. „Die 17 fährt wieder” *Stadtverkehr* 7 / 1996
- [94] Riechers D. „Das Strassenbahnnetz von Strassburg wächst weiter” *Stadtverkehr* 3 / 1998

- [95] Rodrigue J. P. „Parallel Modelling and Neural Networks: an Overview for Transportation/Land Use Systems” *Transportation Research, Part C*, vol. 5C, no.5/1997
- [96] Rudnicki A. „Symulacja funkcjonowania przystanku autobusowego” *Archiwum Inżynierii Lądowej* tom XXIII z. 1/1977
- [97] Rudnicki A. „Analityczny model rozkładu odstępów czasu w potoku autobusów za wlotem skrzyżowania z sygnalizacją świetlną” ...
- [98] Rudnicki A. „Probabilistyczna metoda projektowania długości autobusowych zatok przystankowych w komunikacji miejskiej” PAN Kraków *Inżynieria Lądowa Ossolineum* 1987
- [99] Rudnicki A. (red.) „Obsługa komunikacyjna w obszarach zurbanizowanych w Polsce” *Zeszyty Naukowo- Techniczne Oddziału SITK w Krakowie* z. 30 seria *Monografie* nr 1 Kraków 1994
- [100] Rydzkowski W. Wojewódzka- Król E, „Współczesne problemy polityki transportowej” PWE Warszawa 1997
- [101] Schnabel W. Knot T. „Untersuchungen zur Durchlaßfähigkeit und zur Qualität des Verkehrsablaufs auf Kreisverkehrsplätzen” *Strassenverkehrstechnik* 4/1998
- [102] Shafahi Y. Haghani A. Gupta V. Carter E. C. „Simulation Model for Analyzing SPUDI with Actuated Signals” *Journal of Transportation Engineering* 5/1998
- [103] Simmonite B. F. Moore P. „Modelling Flares at Traffic Signal-Controlled Junctions” *Traffic Engineering + Control* 4/1997
- [104] Speakman D. „Sektor transportowy w Europie Środkowej i Wschodniej” w „Szanse i zagrożenia. Przegląd sektora transportu w Polsce i Europie Środkowo- Wschodniej” *Polski Klub Ekologiczny* Kraków 1997
- [105] Sokołowski J. „Modelowanie pracy ruchowej w węzłach sieci transportowej” PWN Warszawa 1980
- [106] Suchorzewski W. „Transport w miastach polskich. Główne problemy i drogi ich rozwiązania” *Konferencja Naukowo- Techniczna „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”* Poznań 8 – 10. 10. 1997
- [107] Szałkowski M. „Model generatora ruchu tramwajów w sieci” *Zeszyty Naukowo- Techniczne Oddziału SITK w Krakowie* z. 43 „Problemy transportu

- i inżynierii lądowej w działalności naukowej i technicznej krakowskiego środowiska SITK” seria Monografie nr 2 Kraków 1996
- [108] Szczuraszek T. „Model ruchu na międzywęzłowym odcinku drogi” *Archiwum Inżynierii Lądowej* tom XXXIV z. 3/1988
- [109] Sznajd- Weron K. Pękalski A. „Changes of a Continuous character Caused by Gene Flow. A Monte Carlo Study” *Physica A: Statistical And Theoretical Physics* v. 259, nos. 3-4, 1998
- [110] Teng J. Y. Tzeng G. H. „Fuzzy Multicriteria Ranking of Urban Transportation Investment Alternatives” *Transportation Planning and Technology* 1/1996
- [111] Timm F. B. „In Dresden startet erster sächsischer Verkehrsverbund” *Stadtverkehr* 3 / 1998
- [112] Troutbeck R. „A Review on the Process to Estimate Cowan M3 Headway Distribution Parameters” *Traffic Engineering + Control* 11/1997
- [113] Tsao H. S. J. Hall R. W. Chatterjee I. „Analytical Models for Vehicle/Gap Distribution on Automated Highway Systems” *Transportation Science* vol.31 1/1997
- [114] Wagner Ch. „Asymptotic Solutions for a Multi-Anticipative Car-Following Model” *Physica A: Statistical And Theoretical Physics* v. 260, nos. 1-2, 1998
- [115] Westphal S. „Bemessung von Einfahrten an planfreien Knotenpunkten von Stadtautobahnen” *Strassenverkehrstechnik* 6/1996
- [116] Węgiński J. „Metody probabilistyczne w projektowaniu transportu szynowego” WKiŁ Warszawa 1971
- [117] Wierzbicki M. „Analiza funkcjonowania systemu komunikacji tramwajowej na obszarze aglomeracji wrocławskiej” *Praca Dyplomowa (niepublikowana)* Politechnika Wrocławska Wrocław 1993
- [118] Wolek Cz. „Symulacja przepływu ruchu na węźle drogowym” *Praca Doktorska (niepublikowana)* Politechnika Wrocławska Raport Instytutu Inżynierii Lądowej z serii PRE nr 5/1982
- [119] Wolf J. „Planung einer Stadt- und Regionalbahn für die Stadt Zwickau” *Stadtverkehr* 7-8 / 1998
- [120] Wong S. C. Yang H. Yeung W. S. Cheuk S. L. Lo M. K. „Delay at Signal-Controlled Intersection with Bus Stops Upstream” *Journal of Transportation Engineering* 3/1998

- [121] Wu N. „Rückstaulängen an Lichtsignalanlagen unter verschiedenen Verkehrsbedingungen” Strassenverkehrstechnik 5/1996
- [122] Wu J. McDonald M. „TRGMSM: A Simulation Model for Light Rail Transit (LRT) at-grade Crossing Design” Traffic Engineering + Control 3/1996
- [123] Wytczne Projektowania Ulic GDDP Warszawa 1992
- [124] Zhang H. M. Ritchie S. G. „Freeway Ramp Metering Using Artificial Neural Networks” Transportation Research, Part C, vol. 5C, no.5/1997
- [125] Zhang X. Jarrett D. F. ”Stability Analysis of the Classical Car-Following Model” Transportation Research, Part B, vol. 31B, no.6/1997
- [126] Zieliński R. „Generatory liczb losowych” Wydawnictwa Naukowo Techniczne Warszawa 1972
- [127] Żabiński M. „Miejska komunikacja autobusowa – modelowanie i optymalizacja” Praca Doktorska (niepublikowana) Politechnika Wrocławska Raport Instytutu Inżynierii Lądowej z serii PRE nr 17/1985
- [128] Żak J. „Modelowanie i optymalizacja wielokryterialna funkcjonowania systemów transportowych komunikacji miejskiej” Praca Doktorska (niepublikowana) Politechnika Poznańska 1995

## STRESZCZENIE

W pracy badano przepustowość elementów sieci komunikacji zbiorowej. Uwzględniono specyfikę ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej na wydzielonym torze po którym mogą poruszać się zarówno tramwaje jak i autobusy. Za charakterystyczny i reprezentatywny element sieci komunikacyjnej przyjęto odcinek międzywęzłowy zamknięty obustronnie skrzyżowaniami z sygnalizacją świetlną. Na odcinku tym mogą wystąpić wszystkie charakterystyczne typy przekrojów decydujących o przepustowości całej sieci: przekrój przed skrzyżowaniem, przekrój przed przystankiem i ich kombinacje. Przekroje te nazwano krytycznymi. Analizowano przepustowość maksymalną, możliwą do uzyskania przy optymalnym układzie parametrów charakteryzujących ruch pojazdów. Jako podstawę do określenia przepustowości przyjęto czas zajęcia przekrojów krytycznych będący sumą czasu operacyjnego i strat czasu. Sprawdzono w jakich warunkach czas ten przekracza średnie odstępy między pojazdami wynikające z natężenia ruchu, co powoduje ograniczenie przepustowości. Przebadano zakres zmienności parametrów ruchu poprzez pomiary terenowe oraz wpływ tej zmienności na przepustowość za pomocą badań na modelach. Zbudowano dwa modele ruchu w analizowanym elemencie sieci: deterministyczny i stochastyczny. Model deterministyczny, bazujący na analizie matematycznej, przyjmuje brak zmienności parametrów ruchu, natomiast stochastyczny, realizowany za pomocą symulacji komputerowej, uwzględnia zidentyfikowaną wcześniej zmienność tych parametrów. Wyniki uzyskane z modelu stochastycznego posłużyły do weryfikacji modelu deterministycznego. Podano w jakich warunkach można stosować model deterministyczny. Wyniki modelu stochastycznego zweryfikowano na podstawie pomiarów wykonanych we Wrocławiu.



## SUMMARY

The dissertation investigates the capacity of elements of public transport network. It takes into consideration the specificity of traffic of public transport vehicles on a separated way shared by buses and trams. It is assumed that a section of way closed at both ends by light controlled junctions is a characteristic and representative element of transport network. On this particular kind of section one may find all characteristic types of places which condition the capacity of all network, such as the place immediately before the junction, the place immediately before the stop, and combinations of these places. These places are called critical places. The analysis is focused on maximal capacity which may be achieved when the parameters of traffic have an optimal structure. Time of staying in critical places – which is the sum of operating time and the losses of time – is regarded as the basis of estimating the maximal capacity. It has been checked under which circumstances the decrease of capacity may be noticed – the decrease occurring when time of staying exceeds the average gaps between vehicles which are in turn conditioned by the traffic volume. Using field experiments the range of changes in parameters of traffic was analysed, while using models – the influence of the mentioned range of changes on the capacity was estimated. Two models of traffic were constructed for the analysed element of the network: the deterministic model and the stochastic model. The deterministic model – based on mathematical analysis – assumes constancy of parameters of traffic, and the stochastic model – realised by computer simulations – takes into account formerly identified changeability of the parameters of traffic. The results achieved thanks to the stochastic model were used for the purpose of verification of the deterministic model. It was also stated which circumstances the deterministic model may be used. The results coming from the stochastic model were verified on the basis of field experiments carried out in Wrocław.



mgr inż. Maciej KRUSZYNA



Instytut Inżynierii Lądowej

Politechniki Wrocławskiej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27

50-370 Wrocław

---

Raport wpłynął do Redakcji Wydawnictw I-14 w sierpniu 1999 roku

Lista odbiorców:

|                           |   |        |
|---------------------------|---|--------|
| 1. Promotor               | - | 1 egz. |
| 2. Recenzenci             | - | 2 egz. |
| 3. Autor                  | - | 3 egz. |
| 4. Biblioteka Główna      | - | 2 egz. |
| 5. Biblioteka i OINT I-14 | - | 2 egz. |

---

|        |  |         |
|--------|--|---------|
| Razem: |  | 10 egz. |
|--------|--|---------|