



KRZYSZTOF GASZ¹⁾
MACIEJ KRUSZYŃSKA²⁾

ANALIZY PROCESU ZGŁOSZEŃ PIESZYCH DO PRZEJŚCIA PRZEZ JEZDNIĘ

STRESZCZENIE. W artykule opisano analizy procesu zgłoszeń pieszych do przejścia przez jezdnię. Podstawą badań były pomiary i obserwacje ruchu pieszych wykonane na kilkunastu przejściach we Wrocławiu. Przejścia te wyposażone są w sygnalizację świetlną oraz cechują się znaczną liczbą pieszych oraz pojazdów. Scharakteryzowano zmiany liczby zgłaszających się pieszych dla różnych interwałów pomiarowych (w tym na długości cyklu) oraz rozkład odstępów zgłoszeń. Wykonano analizę widmową szeregów czasowych procesu zgłoszeń oraz analizę autoregresji. W podsumowaniu artykułu omówiono potencjalne możliwości wykorzystania wyników wykonanych analiz.

1. WPROWADZENIE

Badania procesów związanych z ruchem na drogach są bardzo liczne i dotyczą różnych aspektów, takich jak: ogólne charakterystyki przepływu, proces zgłoszeń, zaburzenia ruchu, czy bezpieczeństwo. Mimo, iż większość prac dotyczy ruchu pojazdów, podejmuje się również badania nad ruchem pieszych.

Opracowano metody określania przepustowości w ruchu pieszych, często opierając się na analogiach do ruchu pojazdów i stosując różne modele ruchu [1]. Najszerszej

¹⁾ mgr inż. – doktorant, Politechnika Wroclawska, Instytut Inżynierii Lądowej

²⁾ dr inż. – Politechnika Wroclawska, Instytut Inżynierii Lądowej

opisywano zależności pomiędzy prędkością ruchu a jego natężeniem [2 -5]. W literaturze krajowej podejmowano problematykę ruchu pieszych [6] ze szczególnym uwzględnieniem aspektów bezpieczeństwa ruchu [7], [8] oraz potrzeb osób niepełnosprawnych [9], [10]. Prowadzono badania prędkości pieszych na przejściach przez jezdnię [11] oraz porównywano straty czasu pieszych i pojazdów [12].

Spośród najnowszych kierunków badań wskazać można na:

- stosowanie mikroskopowych modeli ruchu do opisu zachowań pieszych [13 - 15],
- opis strat czasu pieszych analogicznie jak dla ruchu samochodów (proces poruszania się przy zielonym sygnale wraz z charakterystycznymi opóźnieniami) [16],
- stosowanie technik wideo do rejestracji ruchu pieszych jako wyjściowy etap modelowania [15],
- kwantyfikacja jakości obsługi pieszych ("indeks mobilności", poziomy obsługi poprzez analogię do poziomów swobody ruchu) [17], [18].

Opis zgłoszeń pieszych do przejścia przez jezdnię wykonuje się najczęściej poprzez rozkłady zmiennej losowej charakteryzującej odstępy czasu pomiędzy zgłaszającymi się osobami lub poprzez rozkłady zmiennej losowej charakteryzującej liczbę osób zgłaszających się do przejścia w określonych i krótkich przedziałach czasowych. Najczęściej wykorzystuje się rozkłady: równomierny i wykładniczy [13], [19], podobnie jak w przypadku procesu zgłoszeń pasażerów na przystanek autobusowy [20].

Mimo, iż dostrzeżono że obecność sygnalizacji świetlnej może wpływać na proces zgłoszeń pieszych do przejścia przez jezdnię, zjawisko to nie zostało jak dotąd wyczerpująco zbadane. Tymczasem przejścia przez jezdnię, jako miejsca konfliktu poszczególnych grup użytkowników dróg, są bardzo ważnymi elementami układów komunikacyjnych. Z kolei przejścia wyposażone w sygnalizację świetlną są zazwyczaj obciążone ruchem pojazdów i pieszych o znacznych natężeniach. Dokładny opis procesu zgłoszeń wszystkich użytkowników pozwoli lepiej sterować ruchem i umożliwi wdrożenie efektywnych strategii sterowania realizujących przyjęte, konkretne cele.

W opracowaniu autorzy prezentują wyniki analiz procesu zgłoszeń pieszych do przejścia przez jezdnię wyposażonego w sygnalizację świetlną. Opisano miejsca prowadzonych obserwacji i przeprowadzono szereg analiz statystycznych. Skomentowano różnorodność uzyskanych wyników oraz nakreślono możliwości ich wykorzystania.

2. OPIS POMIARÓW

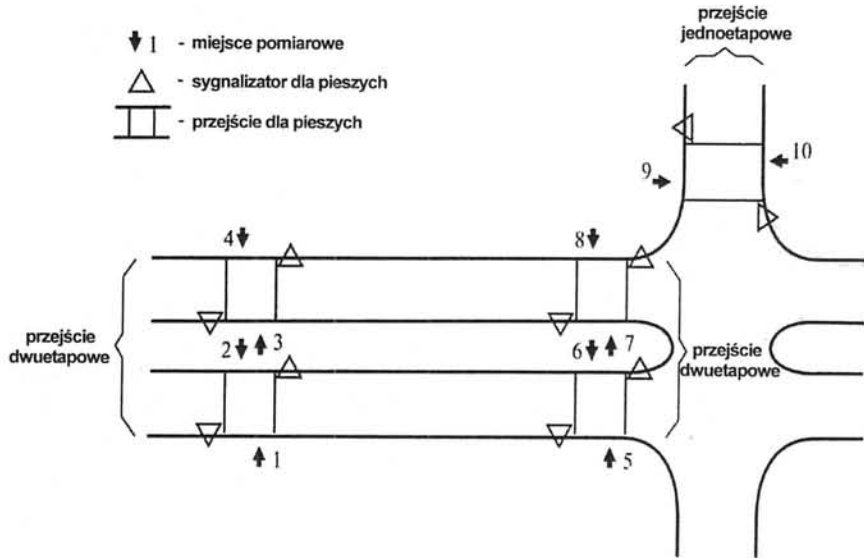
W roku 2003 przeprowadzono szereg obserwacji procesu zgłoszeń pieszych do przejścia przez jezdnię. Rejestrowano liczbę osób dochodzących do przejścia w stałym przedziale czasowym określonym na 10 sekund. Taka długość przedziału czasowego ustalona została ze względu na chęć przeprowadzenia jak najdokładniejszych analiz.

Rejestracja zgłoszeń pieszych w rozbiciu na przedziały o mniejszej długości byłaby zbyt uciążliwa. Dodatkowo zapisywano, jaki sygnał dla pieszych wyświetlany jest w danym przedziale czasowym. Gdy w danym przedziale czasowym następowała zmiana sygnału wybierano i rejestrowano sygnał o dłuższym czasie trwania w danym przedziale.

Obserwacje i pomiary wykonano w różnych porach roku (i przy różnych warunkach pogodowych): w lecie i jesienią, z tym że nie analizowano wpływu zmiennych warunków atmosferycznych na zachowania i proces zgłoszeń pieszych. Wybrano przejścia o dużym natężeniu ruchu pieszych położone w sąsiedztwie dworca kolejowego oraz wyższej uczelni. Miejsca te cechowało także duże natężenie ruchu pojazdów, co pozwoliło nie uwzględniać pieszych przechodzących na czerwonym świetle (było ich bardzo niewiele). Wybrane przejścia różniły się parametrami geometrycznymi, usytuowaniem względem skrzyżowania, długością cyklu i długością sygnału zielonego.

W dalszej części pracy stosowane jest określone nazewnictwo (nie zawsze powszechnie stosowane). Objasnienie poszczególnych terminów znajduje się poniżej a nazwy te są zilustrowane rysunkiem 1. W [6] używa się nazw: przejście pojedyncze i przejście podwójne do określenia potencjalnych etapów na drodze pieszego pomiędzy jedną a drugą krawędzią ulicy. W niniejszej pracy autorzy stosują określenia: przejście jednoetapowe i dwuetapowe (zgodnie z sugestią recenzenta). Gdy jezdnie ulicy dwujezdniowej rozdziela ażyl o odpowiedniej szerokości, droga do pokonania rozdziela się na dwa etapy, które w zależności od synchronizacji sterowania sygnalizacjami dla obu etapów można przejść jednorazowo, bądź na dwa razy. Przejście takie będzie nazywane dwuetapowym w odróżnieniu od jednoetapowego przejścia przez ulicę jednojezdniową.

W ramach każdego przejścia wskazać można dwa punkty pomiarowe, do rejestracji procesu zgłoszeń pieszych oddzielnie z obu stron przejścia. Punkty takie pokazano na rysunku 1 i ponumerowano od 1 do 10. Punkty 2, 3, 6 i 7 nazywane są wewnętrznymi ponieważ leżą na wyspie rozdzielającej obie części przejścia dwuetapowego. Pozostałe punkty (1, 4, 5, 8, 9 i 10) nazywane są zewnętrznymi. Niektóre spośród punktów zewnętrznych (1 i 4) cechuje swobodny dopływ pieszych, to znaczy niezaburzony przez żaden czynnik zewnętrzny. Takimi punktami będą przede wszystkim przejścia na odcinku międzywęzłowym, przy których nie ma w bliskiej odległości żadnych dużych generatorów ruchu, takich jak przystanki komunikacji zbiorowej. Pozostałe punkty zewnętrzne (5, 8, 9 i 10) posiadają dopływy zaburzone, ponieważ proces zgłoszeń pieszych jest do nich zakłócany z uwagi na bliskość sąsiednich przejść. Sytuacja taka wystąpi prawie zawsze na dużym skrzyżowaniu, gdzie udział pieszych pokonujących przejścia przez co najmniej dwa wloty jest znaczny oraz na przejściach, w pobliżu których znajduje się duży generator ruchu, taki jak przystanek komunikacji zbiorowej (zazwyczaj autobusowy). Punkt wewnętrzny także może cechować się zaburzonym dopływem, jeżeli na wyspie rozdzielającej jezdnie zlokalizowany jest przystanek komunikacji zbiorowej (zazwyczaj tramwajowy).



s.1. Ilustracja stosowanych terminów
 1.1. Description of used terms

Na podstawie powyższego podziału oraz charakteru dojścia pieszych do przejścia na długości cyklu (szerzej opisanego w dalszej części artykułu) punkty, w których dokonano pomiarów przypisano do jednej z pięciu grup. Podział na poszczególne grupy przedstawia się następująco:

- grupa A – punkty zewnętrzne i maksymalna liczba pieszych dochodzących podczas sygnału zielonego,
- grupa B – punkty zewnętrzne i maksymalna liczba pieszych dochodzących podczas sygnału czerwonego;
- grupa C – punkty zewnętrzne i równomierne rozłożenie dochodzących pieszych;
- grupa D – punkty wewnętrzne i maksymalna liczba pieszych dochodzących podczas sygnału zielonego;
- grupa E – punkty wewnętrzne i maksymalna liczba pieszych dochodzących podczas sygnału czerwonego.

Opis grup oraz charakterystyczne dane punktów pomiarowych do nich zaliczonych umieszczono w tabelicy 1. W analizach statystycznych wykorzystano pakiet STATISTICA.

Tablica 1. Charakterystyki punktów w rozbiu na grupy
 Table 1. Characteristics of the points with partition on the groups

Grupa	Lokalizacja punktów pomiarowych	Długość cyklu [s]	Długość sygnału zielonego dla pieszych [s]	Rodzaj przejścia dla pieszych
A	na zewnątrz	zmienna, 80, 100, 110	zmienna, 20, 44	jednoetapowe dwuetapowe
B	na zewnątrz	zmienna, 80, 100, 110	zmienna, 8, 10	jednoetapowe dwuetapowe
C	na zewnątrz	80, 100, 110	10, 13, 20	jednoetapowe dwuetapowe
D	w pasie rozdziału	zmienna, 100,110	zmienna, 10, 20	dwuetapowe
E	w pasie rozdziału	zmienna	zmienna	dwuetapowe

3. ZMIANY LICZBY ZGŁASZAJĄCYCH SIĘ PIESZY DLA RÓŻNYCH INTERWAŁÓW POMIAROWY

Liczba pieszych dochodzących do przejść przez jezdnię w interwałach 10-sekundowych jest bardzo zróżnicowana niezależnie od lokalizacji. Podczas analiz średniej, wartości minimalnej i maksymalnej, wariancji, współczynnika zmienności oraz kwantyli 50 i 85 sprawdzano, czy liczba pieszych w dłuższych interwałach czasu stabilizuje się. Badania wykonano dla interwałów: 10-sekundowych, 30-sekundowych, 1-minutowych, 2-minutowych i 5-minutowych. Rezultaty tych badań dla wybranych punktów pomiarowych z grupy A i D pokazano w tablicy 2 oraz na rysunkach 2 i 3.

Wraz ze wzrostem długości interwału rośnie również średnia liczba zgłoszeń pieszych w interwale i jej wariancja. Parametrem, który pozwala połączyć średnią liczbę zgłoszeń i jej błąd standardowy, a zarazem określić zmienność liczby pieszych dla różnych interwałów czasu jest współczynnik zmienności. Opisuje się go wzorem (1).

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad , \quad (1)$$

gdzie:

s – odchylenie standardowe liczby pieszych w danym interwale,

\bar{x} – wartość średnia liczby pieszych.

Współczynniki zmienności dla kolejnych interwałów maleją. Można więc stwierdzić, że im dłuższy interwał pomiarowy tym liczba zgłoszeń będzie się stabilizować wokół pewnego poziomu. Widoczne jest to również na rysunkach: 2 i 3. Oczywiście

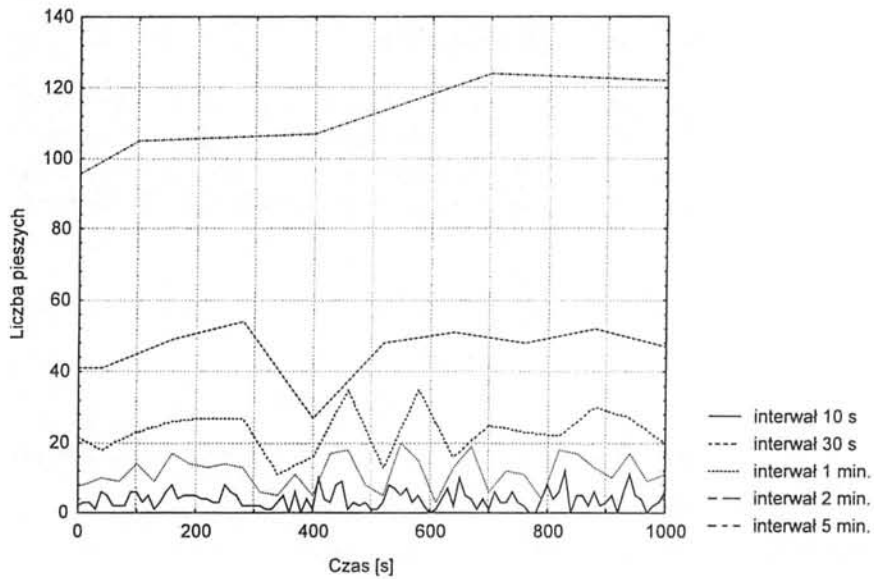
trzeba mieć na uwadze fakt, że jest to proces niestacjonarny i branie interwałów bardzo długich nie przyniesie oczekiwanych rezultatów.

Tablica 2. Zmiany liczby pieszych zgłaszających się w różnych interwałach
Table 2. Changes of number of approaching pedestrians in different intervals

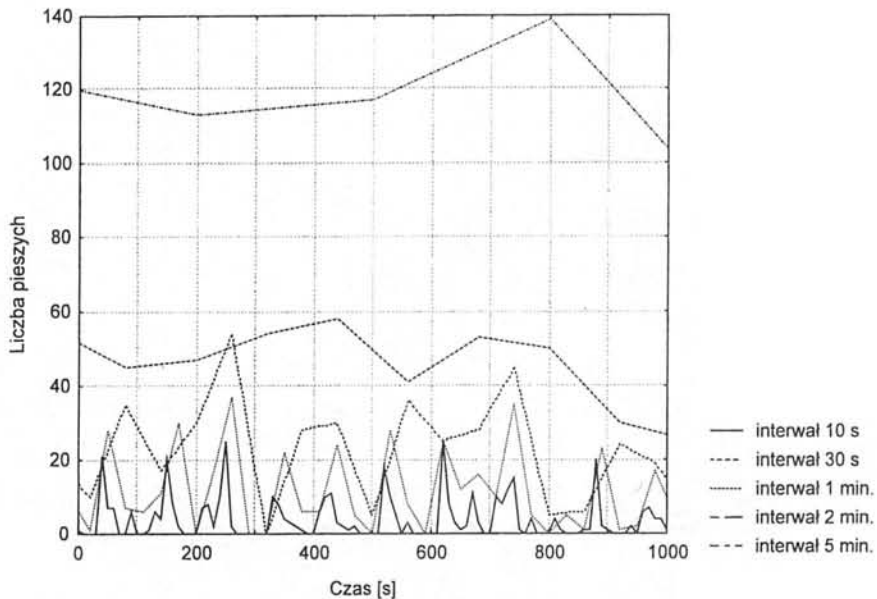
	Parametry opisujące zmienną liczbę pieszych	INTERWAŁY:				
		10 s	30 s	60 s	120 s	300 s
Wybrany punkt pomiarowy z grupy A	Średnia	3,52	10,58	21,17	42,33	105,83
	Wartość minimalna	0	0	3	27	76
	Wartość maksymalna	13	21	35	65	133
	Wariancja	6,37	20,13	42,90	87,82	327,81
	Odchylenie standardowe	2,52	4,48	6,55	9,37	18,11
	Współczynnik zmienności	71,52	42,39	30,95	22,14	17,11
	Kwantyl 50	3	10	20	42,5	106
	Kwantyl 85	6	16	27,45	51,65	122,7
Wybrany punkt pomiarowy z grupy D	Średnia	4,27	12,81	25,63	51,25	128,13
	Wartość minimalna	0	0	0	25	86
	Wartość maksymalna	26	38	54	77	165
	Wariancja	32,71	115,18	164,03	152,39	497,61
	Odchylenie standardowe	5,72	10,73	12,81	12,34	22,31
	Współczynnik zmienności	133,92	83,76	49,98	24,09	17,41
	Kwantyl 50	2	10,5	28	53,5	130,5
	Kwantyl 85	10	26	37,15	61,15	143,75

Ciekawe wyniki uzyskuje się analizując kwantyle. Są to wielkości, które informują jakiej wartości nie przekracza odpowiedni procent wyników. Przedstawiono analizę dwóch kwantyli: k_{50} i k_{85} . W przypadku interwału 10-sekundowego wartość k_{85} jest kilkakrotnie większa od wartości k_{50} . Natomiast już podczas interwału 1-minutowego k_{85} nie różni się od k_{50} więcej niż o 80%.

W dalszych rozważaniach wykonano analizy tylko dla interwału 10-sekundowego.



Rys.2. Zmiany liczby pieszych zgłaszających się do przykładowego punktu z grupy A
Fig.2. Changes of number of approaching pedestrians to representative point from the group A



Rys.3. Zmiany liczby pieszych zgłaszających się do przykładowego punktu z grupy D
Fig.3. Changes of number of approaching pedestrians to representative point from the group D

4. CHARAKTER POTOKU ZGŁOSZEŃ

Badania wykazały, że podobnie jak potok zgłoszeń pasażerów na przystanek komunikacji zbiorowej [20], tak również potok zgłoszeń pieszych do przejścia przez jezdnię jest niestacjonarnym procesem Poissona. Liczbę zgłoszeń pieszych w zadanym przedziale czasowym w tym procesie można opisać rozkładem Poissona, wyrażonym równaniem (2).

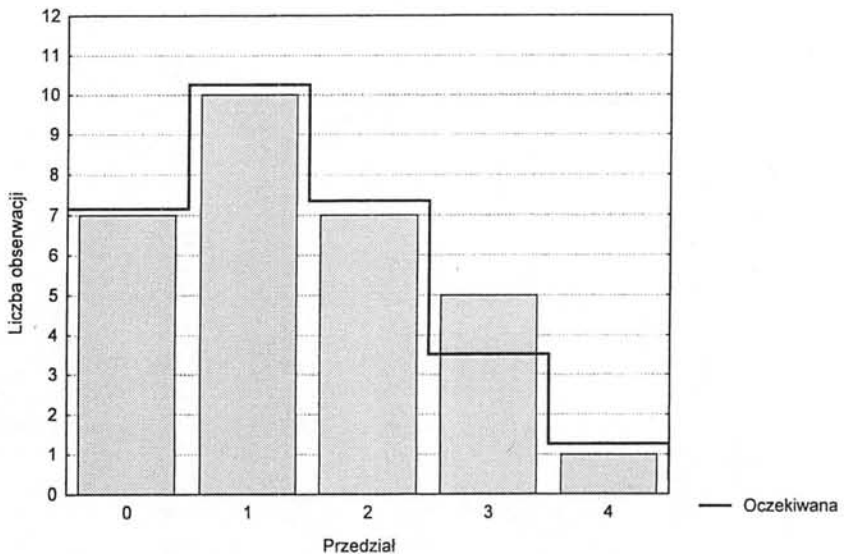
$$P_k(t) = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda}, \quad (2)$$

gdzie:

- $P_k(t)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia k zgłoszeń w przedziale $[0,t]$,
- λ – średnia liczba zgłoszeń w tym przedziale.

Równanie (2) dotyczy tylko dojeżdż do przejść z zewnątrz (punktów zewnętrznych). W przypadku dojeżdż do przejść w pasie rozdziału (punktów wewnętrznych) rozkład pieszych trudno jest opisać jednym konkretnym rozkładem.

Na rysunku 4 przedstawiono histogram rozkładu liczby pieszych dochodzących do przejścia w wybranym punkcie z grupy B wraz z dopasowanym rozkładem Poissona.



Rys.4. Histogram rozkładu liczby pieszych zgłaszających się do przykładowego punktu z grupy B

Fig.4. Histogram of distribution of pedestrian number, which approaches to the representative point from the group B

Natomiast w tabelicy 3 zawarto wartości parametrów rozkładu Poissona dla wybranych punktów z poszczególnych grup, prawdopodobieństwa, z jakimi dopasowane są histogramy rozkładu pieszych do rozkładu Poissona oraz współczynniki korelacji Pearsona.

Tablica 3. Parametry rozkładu Poissona dla wybranych punktów z poszczególnych grup
Table 3. Parameters of Poisson distribution for selected points from particular groups

Grupa	Wartość średnia λ	Prawdopodobieństwo dopasowania histogramu do rozkładu Poissona	Współczynnik korelacji Pearsona R
A	0,92	0,06	0,74
	2,13	0,64	0,82
	1,92	0,39	0,86
	4,11	0,47	0,87
	1,25	0,12	0,92
	3,27	0,17	0,81
	2,99	0,19	0,93
	3,55	0,10	0,86
	4,19	0,12	0,85
	2,78	0,15	0,60
B	1,50	0,97	0,97
	1,20	0,22	0,88
	1,07	0,25	0,78
	1,45	0,26	0,95
	2,86	0,18	0,93
	2,59	0,08	0,83
	2,83	0,07	0,87
	1,61	0,25	0,93
	1,89	0,34	0,95
C	0,88	0,71	0,97
	2,16	0,57	0,91
	1,44	0,95	0,96
	1,70	0,11	0,92
	1,90	0,48	0,95
	2,49	0,21	0,83

Przeprowadzone badania wykazały, że proces zgłoszeń pieszych wykazuje dużą niestacjonarność. Podczas analizy wyników uzyskanych z godzinnego pomiaru pieszych w wybranym punkcie z grupy A, średnia liczba zgłoszeń w interwałach 10-minutowych λ wynosiła od 2,78 do 4,19. Podobną wielkość rozrzutu uzyskano również dla punktów z pozostałych grup.

5. ZMIANY LICZBY PIESZYCH ZGŁASZAJĄCYCH SIĘ W TRAKCIE CYKLU

Liczba pieszych dochodzących do przejścia przez jezdnię zależy od wielu czynników, takich jak: lokalizacja, pora dnia, pora roku. Jak wykazały badania wartości te zmieniały się znacznie w trakcie pomiarów. Mamy więc do czynienia z procesem niestacjonarnym.

Rozpatrując zmienność liczby pieszych w ciągu pojedynczego cyklu nie można udzielić jednoznacznej odpowiedzi na temat charakteru tej zmienności. Analizowana próbka pieszych dla pojedynczego cyklu okazuje się za mała, toteż wyniki dla poszczególnych cykli różnią się znacznie od siebie. Jednak, gdy przyjmiemy się uśrednione wartości z kilku cykli w odniesieniu do długości pojedynczego cyklu można zauważyć pewne tendencje.

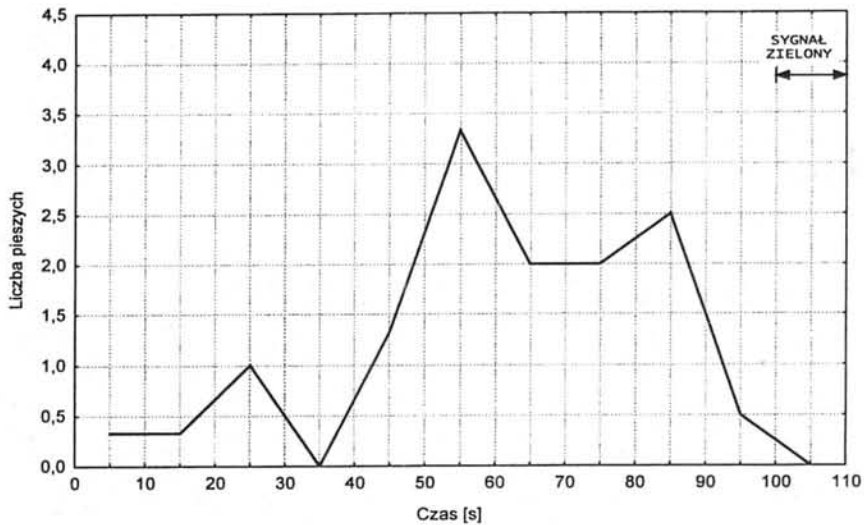
W przypadku swobodnego dopływu pieszych do punktu zewnętrznego (grupa A) stwierdzono maksimum (szczyt) liczby pieszych w trakcie wyświetlania sygnału zielonego. Fakt ten można wytłumaczyć tym, iż sygnalizator dla pieszych jest widziany przez pieszych już z pewnej odległości. Gdy zapala się na nim sygnał zielony piesi przyspieszają, by zdążyć przejść podczas tego sygnału. W przypadku, gdy na sygnalizatorze dla pieszych wyświetlany jest sygnał czerwony, a dodatkowo ruszają pojazdy, piesi zwalniają, by zminimalizować czas postoju przed przejściem przez jezdnię.

Na dojeźdżach do punktów z grupy B duża liczba pieszych zgłaszała się podczas sygnału czerwonego (rys. 5). Punkty te również znajdują się po zewnętrznej stronie jezdni. Jednak dopływ pieszych do tych przejść nie jest przypadkowy, lecz zakłócony poprzez obecność w pobliżu przystanku autobusowego lub poprzez konieczność pokonywania przez pieszych kolejno kilku przejść w obrębie jednego skrzyżowania. Dopływ pieszych do analizowanego przejścia jest uwarunkowany sygnałem zielonym na poprzednim przejściu (lub przyjazdem autobusu), co powoduje, że piesi dochodzą tłumnie do analizowanego przejścia w pewnej części cyklu, w której wyświetlany jest dla nich sygnał czerwony.

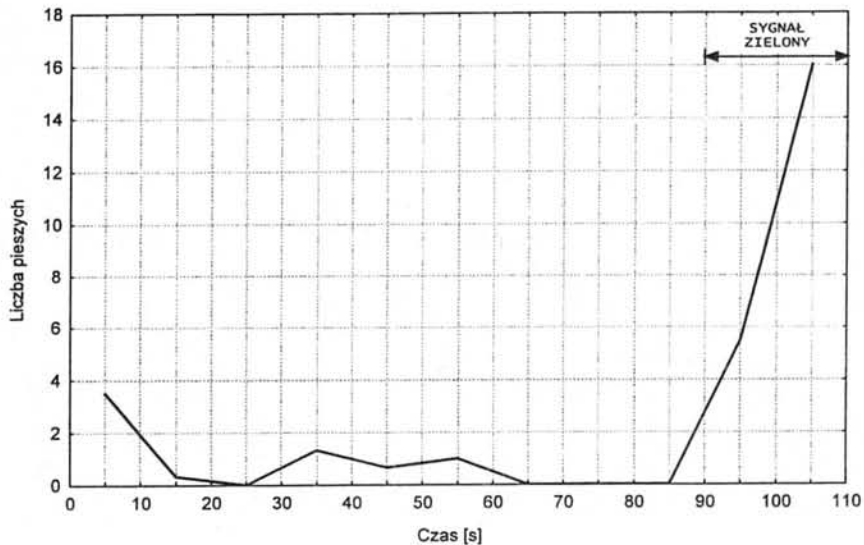
W punktach pomiarowych z grupy C wystąpił brak wyraźnego szczytu zgłoszeń pieszych lub kilka szczytów zarówno podczas sygnału zielonego jak i czerwonego. Można więc mówić, o jednakowo prawdopodobnym dojeździe pieszych do tych przejść w poszczególnych etapach cyklu. Mamy tu do czynienia z sytuacją, gdy sygnały wyświetlane przez sygnalizatory nie mają żadnego wpływu na proces dojeżdżania.

W przypadku dojeźdż do punktów z grupy D największa liczba pieszych zgłaszała się do przejścia podczas sygnału zielonego (rys. 6), ale były to punkty wewnętrzne (czyli położone na wyspie dzielącej jezdnię). Z sytuacją tą mamy do czynienia, gdy możliwe jest pokonanie obu części przejścia jedna po drugiej, bez czekania w pasie rozdziału. Możemy mówić wtedy o koordynacji obu części przejścia. Kiedy w pasie rozdziału nie występuje przystanek tramwajowy piesi dochodzą do takich przejść tylko podczas

sygnału zielonego, pomijając oczywiście fakt przejścia pieszego na czerwonym świetle.



Rys.5. Rozkład liczby pieszych zgłaszających się w cyklu do punktu z grupy B
Fig.5. Distribution of number of approaching pedestrians in the cycle to point from the group B



Rys.6. Rozkład liczby pieszych zgłaszających się w cyklu do punktu z grupy D
Fig.6. Distribution of number of approaching pedestrians in the cycle to point from the group D

Na dojściach do punktów (wewnętrznych) z grupy E nie występuje koordynacja obu części przejścia lub w pasie rozdziału znajduje się przystanek tramwajowy. W takim przypadku potok pieszych pojawia się podczas sygnału czerwonego.

Proces dojścia pieszych do przejść na długości cyklu nie jest jednakowy dla wszystkich punktów pomiarowych. Zależy przede wszystkim od lokalizacji punktów pomiarowych oraz obecności w pobliżu innych przejść i generatorów ruchu. Charakter procesu dojścia pieszych na długości cyklu ma duże znaczenie przy wyznaczaniu strat czasu pieszych na przejściach z sygnalizacją świetlną.

6. ANALIZA WIDMOWA SZEREGÓW CZASOWYCH PROCESU ZGŁOSZEŃ

Szeregi czasowe są to serie kolejnych pomiarów wykonane w równych odstępach czasu. Charakteryzują się nieprzypadkowym porządkiem oraz cyklicznością składników. Celem analizy szeregów czasowych jest wykrycie natury zjawiska opisanego sekwencją obserwacji oraz prognozowanie przyszłych wartości szeregu czasowego.

Do opisu natury zjawiska pomocna jest analiza widmowa (Fouriera). Jej zadaniem jest dekompozycja szeregu czasowego na kilka funkcji sinus i cosinus o różnych częstotliwościach w celu wyznaczenia tych, które okazują się szczególnie silne. Poszczególne elementy szeregu czasowego można zapisać w postaci modelu regresyjnego, opisanego zależnością (3):

$$x_t = a_0 + \sum [a_k \cdot \cos(\lambda_k \cdot t) + b_k \cdot \sin(\lambda_k \cdot t)] , \quad (3)$$

gdzie:

a_0 – stała,

a_k, b_k – współczynniki regresji określające stopień, w jakim odpowiednie funkcje są skorelowane z danymi,

λ_k – częstotliwość wyrażona w radianach na jednostkę czasu, obliczana wg zależności (4):

$$\lambda_k = 2 \cdot \pi \cdot \nu_k , \quad (4)$$

gdzie:

ν_k – częstotliwość wyrażona liczbą cykli w jednostce czasu.

Sumując kwadraty współczynników przy sinusie i cosinusie dla każdej częstotliwości można otrzymać periodogram [21], [22]. Wartości periodogramu oblicza się z równania (5):

$$P_k = (a_k^2 + b_k^2) \cdot n / 2 , \quad (5)$$

gdzie:

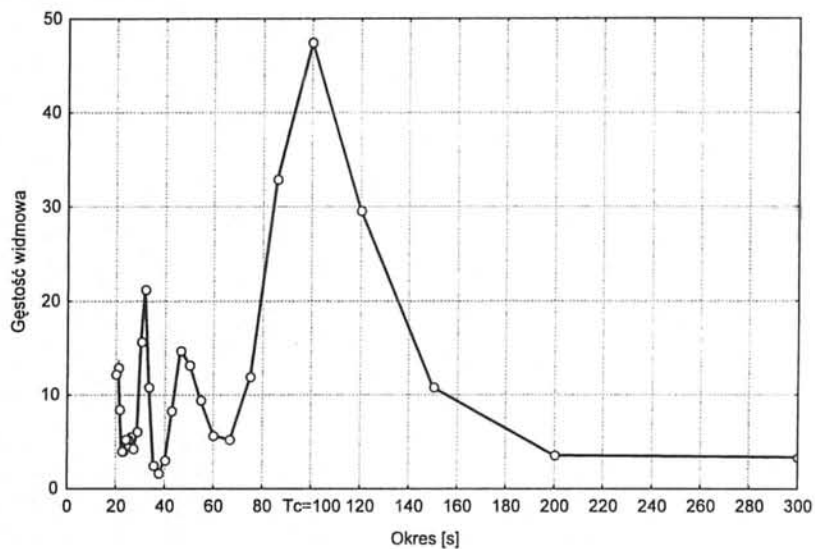
P_k – wartość periodogramu przy częstotliwości ν_k ,

n – liczba elementów szeregu.

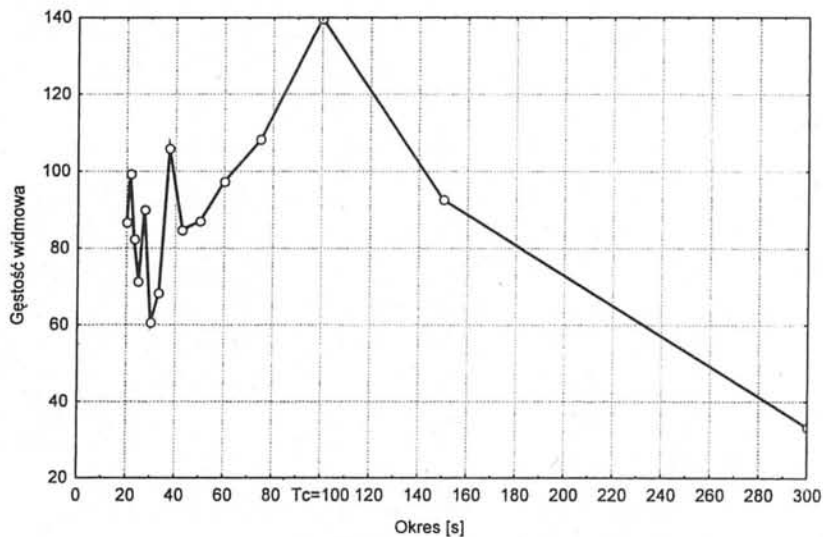
Wartości periodogramu informują o korelacji funkcji sinus i cosinus z obserwowanymi danymi. W przypadku stwierdzenia dla danej częstotliwości dużej wartości periodogramu (większej niż dla pozostałych częstotliwości) można wnioskować, że istnieje silna okresowość o danej częstotliwości. Wartości periodogramu podlegają znacznym wahaniom losowym, co uwydatnia się w postaci wielu “chaotycznych” ostrzy. Aby znaleźć obszary częstotliwości mające największy wkład w strukturę harmoniczną szeregu należy sporządzić wykresy gęstości widmowej. Można to uzyskać poprzez wygładzenie wartości periodogramu przy pomocy ważonej średniej ruchomej.

Rozpatrując wyniki uzyskane z analizy widmowej stwierdzono, że dla większości punktów pomiarowych istnieje cykliczność o okresie równym długości cyklu. Również zauważalne są okresy o długości innej niż długość cyklu. W zależności od wzajemnej relacji między poszczególnymi okresami można wyróżnić pięć przypadków, pokazanych na rysunkach 7 ÷ 11:

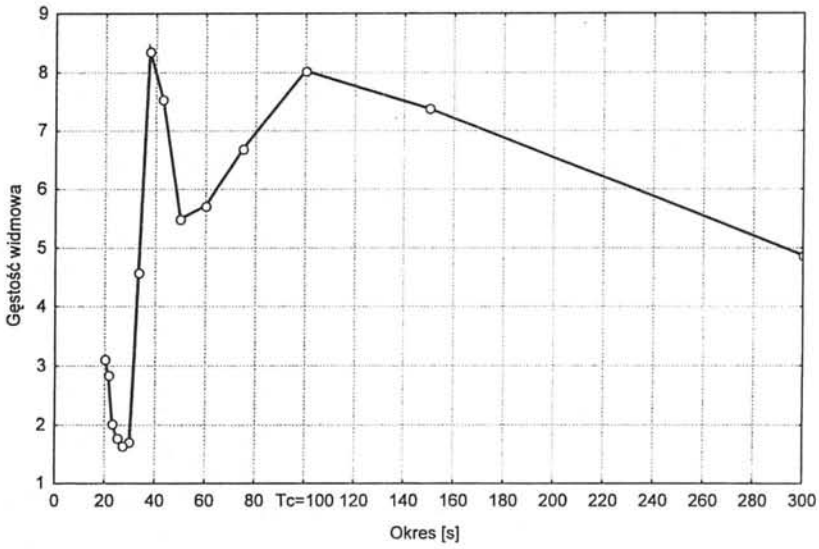
1. istnieje okres odpowiadający maksymalnej wartości gęstości widmowej o długości równej długości cyklu, pozostałe okresy są nieznaczące (rys. 7),
2. istnieje okres odpowiadający maksymalnej wartości gęstości widmowej o długości równej długości cyklu, lecz również znaczne są krótsze okresy, zwłaszcza o długości połowy długości cyklu (rys. 8),
3. istnieją dwa okresy o zbliżonych lub jednakowych wartościach gęstości widmowej o długości równej długości cyklu i jej połowy (rys. 9),
4. istnieje okres odpowiadający maksymalnej wartości gęstości widmowej o długości mniejszej od długości cyklu, natomiast okres o długości cyklu jest nieznaczący (rys. 10),
5. istnieje okres odpowiadający maksymalnej wartości gęstości widmowej o długości mniejszej od długości cyklu, natomiast brak wyraźnego okresu o długości cyklu (rys. 11).



Rys.7. Gęstość widmowa w wybranym punkcie z grupy B
 Fig.7. Spectral density for representative point from the group B

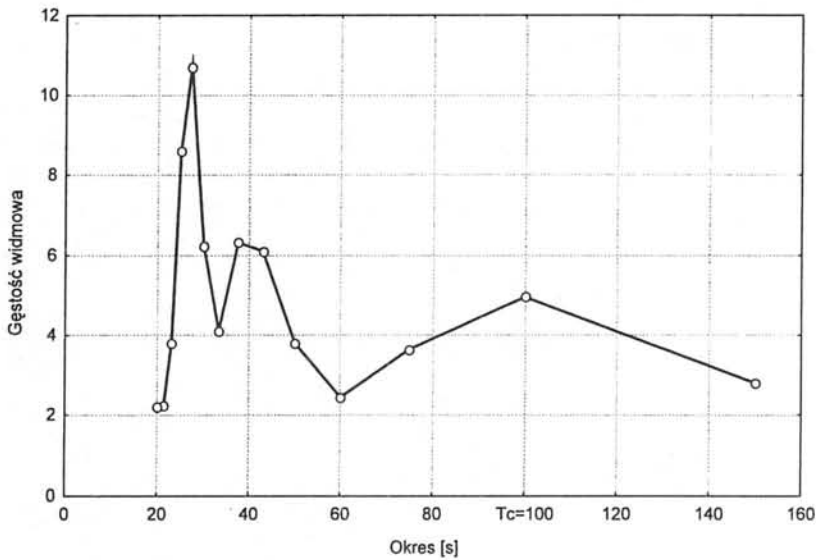


Rys.8. Gęstość widmowa w wybranym punkcie z grupy D
 Fig.8. Spectral density for representative point from the group D



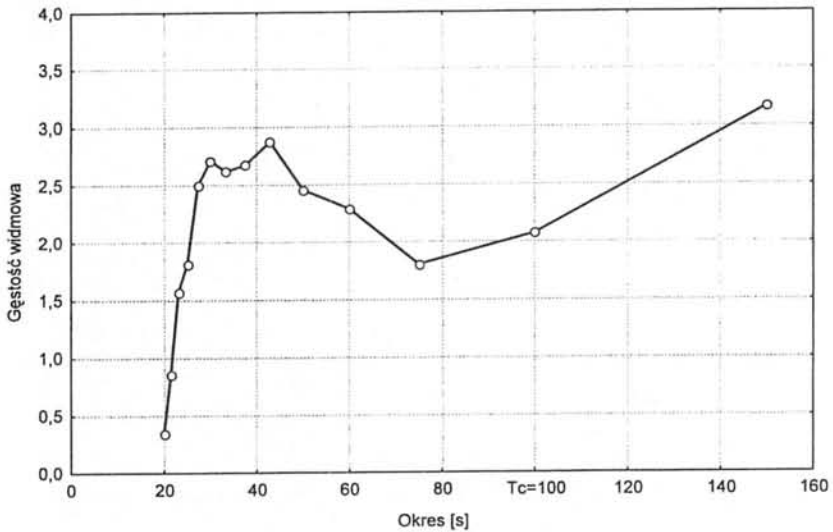
Rys.9. Gęstość widmowa w wybranym punkcie z grupy A, z dwoma wyraźnymi okresami

Fig.9. Spectral density for representative point from the group A with two distinct periods



Rys.10. Gęstość widmowa w wybranym punkcie z grupy C

Fig.10. Spectral density for representative point from the group C



Rys.11. Gęstość widmowa w wybranym punkcie z grupy A, z jednym wyraźnym okresem o długości mniejszej od długości cyklu

Fig.11. Spectral density for representative point from the group A with one distinct period, which is less than cycle length

7. ANALIZA AUTOREGRESJI

W przypadku wielu szeregów czasowych poszczególne obserwacje w tym szeregu są wzajemnie zależne, tzn. można oszacować współczynniki modelu, które opisują kolejne elementy szeregu na podstawie elementów wcześniejszych. Proces ten nosi nazwę procesu autoregresyjnego. Można go przedstawić za pomocą równania (6):

$$x_t = \xi + \Phi_1 \cdot x_{t-1} + \Phi_2 \cdot x_{t-2} + \dots + \varepsilon, \quad (6)$$

gdzie:

Φ_1, Φ_2 – parametry modelu autoregresyjnego,

ξ – stała,

ε – składnik losowy.

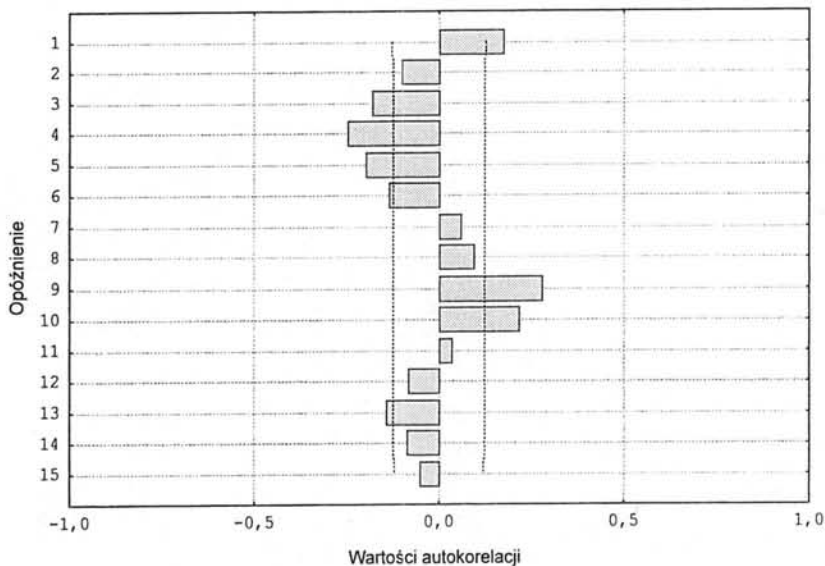
Niezależnie od procesu autoregresyjnego, każdy element szeregu może zależeć od kombinacji liniowej składników losowych z przeszłości. Proces ten nosi nazwę procesu średniej ruchomej. Można go opisać formułą (7):

$$x_t = \mu + \varepsilon_t - \Theta_1 \cdot \varepsilon_{t-1} - \Theta_2 \cdot \varepsilon_{t-2} - \dots, \quad (7)$$

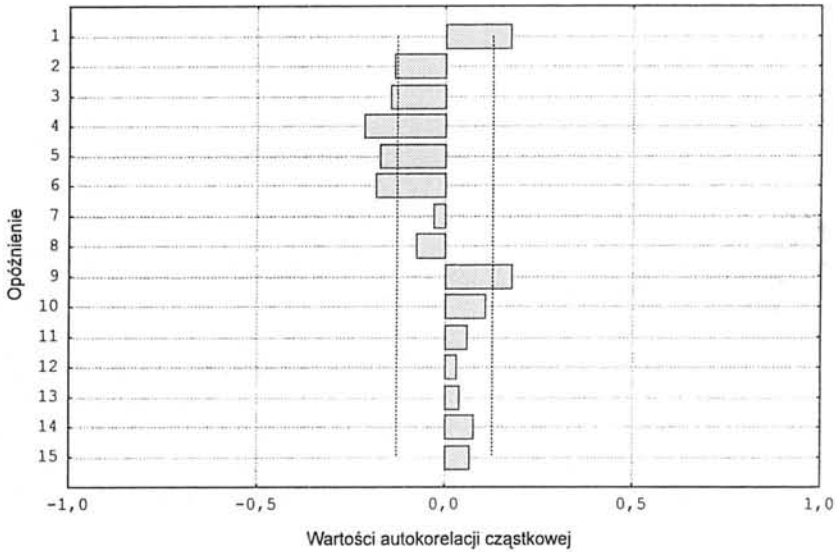
gdzie:

- μ – stała,
- Θ_1, Θ_2 – parametry modelu średniej ruchomej,
- ε_t – składnik losowy dla obserwacji t .

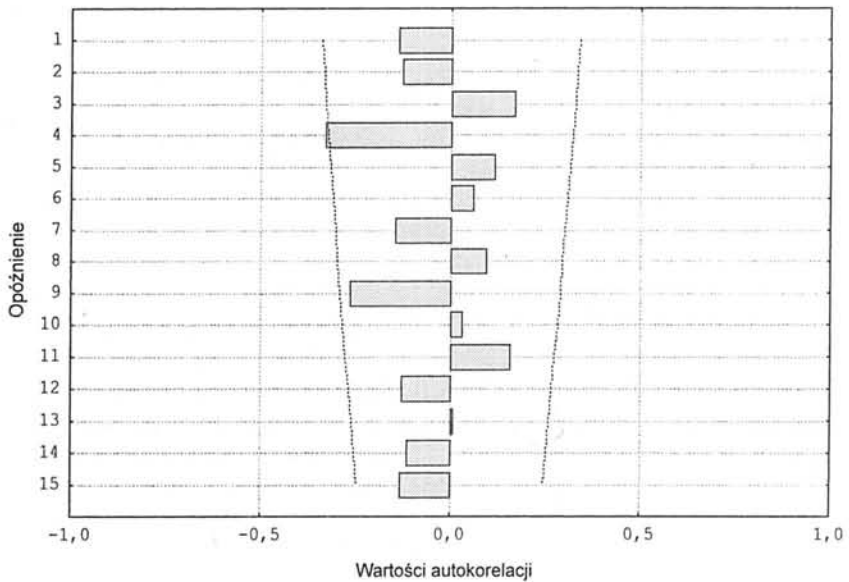
Model autoregresyjny średniej ruchomej - ARIMA (ang. *Auto-Regressive Integrated Moving Average*) służy do prognozowania elementów szeregów czasowych. Model ten łączy cechy procesu autoregresyjnego i procesu średniej ruchomej. Zapis modelu jest trójskładnikowy. Pierwszy składnik (p) informuje o liczbie parametrów autoregresyjnych modelu. Drugi składnik (d) mówi o liczbie różnicowań szeregu, by doprowadzić go do szeregu stacjonarnego. Ostatni składnik (q) to liczba parametrów średniej ruchomej. Ogólnie model ARIMA można zapisać w postaci (p, d, q). Aby dobrać właściwy model do danego szeregu konieczna jest analiza wykresów autokorelacji i autokorelacji cząstkowej. Wykresy autokorelacji dla punktów z grupy A i D przedstawiono na rysunkach 12 ÷ 15.



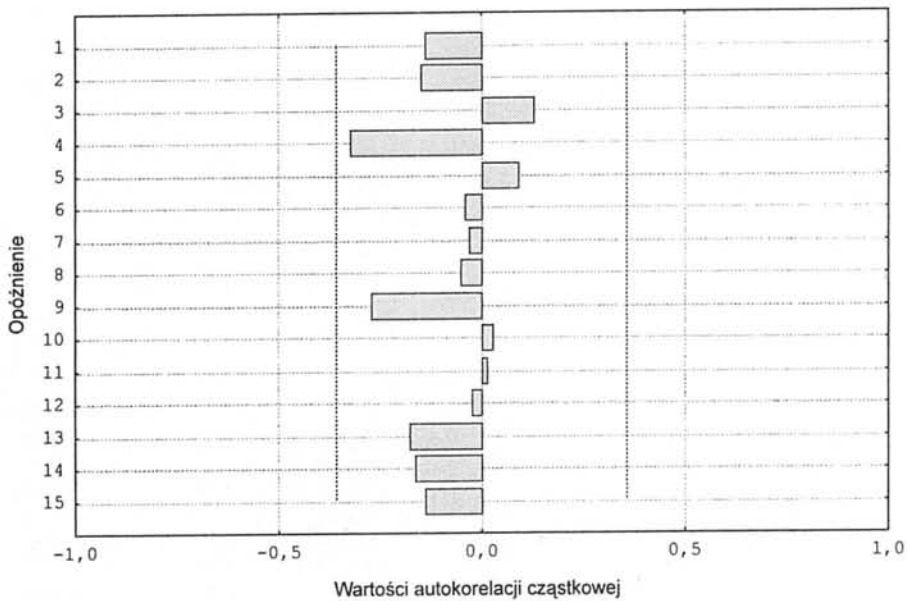
Rys.12. Wykres autokorelacji dla punktu z grupy D
 Fig.12. Autocorrelation function for a point from the group D



Rys.13. Wykres autokorelacji cząstkowej dla punktu z grupy D
 Fig.13. Partial autocorrelation function for a point from the group D



Rys.14. Wykres autokorelacji dla punktu z grupy A
 Fig.14. Autocorrelation function for a point from the group A



Rys.15. Wykres autokorelacji cząstkowej dla punktu z grupy A
 Fig.15. Partial autocorrelation function for a point from the group A

Dla poszczególnych grup punktów pomiarowych modele ARIMA przedstawiają się następująco:

- grupa A – model (0, 0, 2),
- grupa B – model (1, 0, 0),
- grupa C – model (1, 0, 0),
- grupa D – model (1, 7, 0).

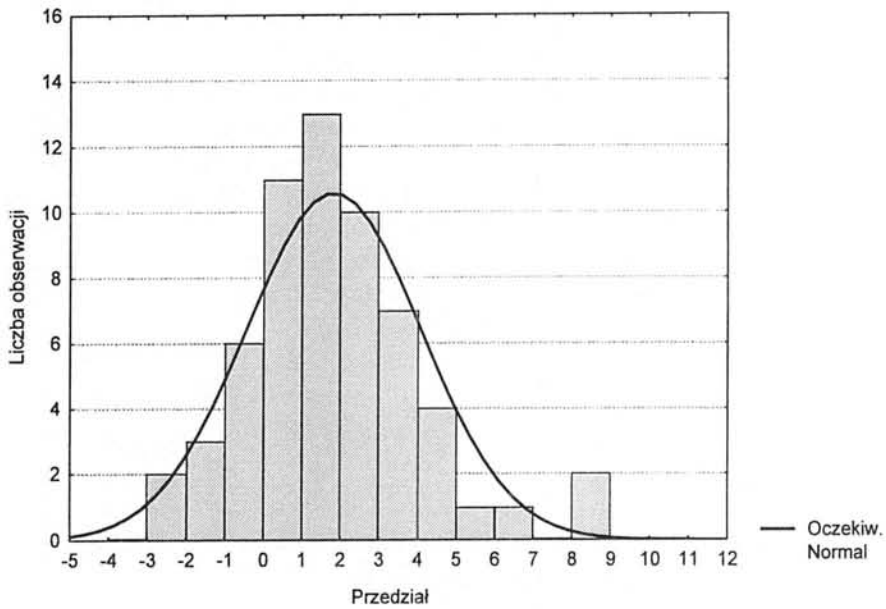
Dla punktów z grupy E nie osiągnięto zadawalającego modelu aż do ósmego rzędu różnicowania. Przyczyną tego może być zbyt mała liczba obserwacji oraz ich bardzo duże zróżnicowanie.

Wartości parametrów modelu ARIMA, ich błędy standardowe, warunkowe sumy kwadratów reszt (MS), wartości prawdopodobieństwa dopasowania rozkładu reszt do rozkładu normalnego oraz współczynniki korelacji Pearsona zamieszczono w tabelicy 4.

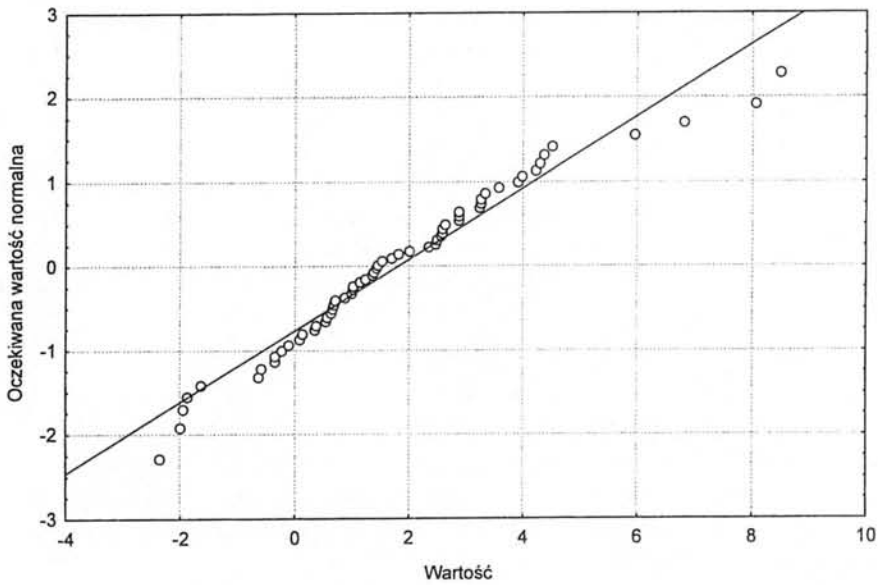
Tablica 4. Parametry modelu ARIMA
Table 4. Parameters of ARIMA model

Grupa	Model ARIMA	Parametry autoregresyjne p	Parametry średniej ruchomej q	Błędy standardowe	Sumy kwadratów reszt MS	Prawdopodobieństwo dopasowania rozkładu reszt do rozkładu normalnego	Współczynnik korelacji Pearsona R
A	(0, 0, 2)	-	-0,49	0,19			
		-	-0,12	0,17	1,76	0,10	0,67
		-	-0,21	0,33			
		-	-0,29	0,30	6,88	0,26	0,82
		-	-0,73	0,18			
		-	-0,43	0,17	3,67	0,09	0,77
		-	-0,83	0,11			
		-	-0,40	0,13	8,77	0,73	0,92
		-	-0,44	0,05			
		-	-0,34	0,04	11,93	0,24	0,98
		-	-0,34	0,16			
		-	-0,23	0,12	3,05	0,14	0,82
B	(1, 0, 0)	0,66	-	0,14	1,99	0,70	0,86
		0,67	-	0,13	1,73	0,10	0,87
		0,62	-	0,15	2,22	0,19	0,67
		0,44	-	0,17	2,09	0,59	0,44
		0,59	-	0,11	3,11	0,04	0,89
C	(1, 0, 0)	0,48	-	0,12	5,82	0,54	0,94
		0,61	-	0,11	6,53	0,13	0,85
		0,43	-	0,13	5,73	0,37	0,91
		0,69	-	0,10	4,71	0,23	0,88
D	(1, 7, 0)	-0,85	-	0,11	11157	-	0,86
		-0,85	-	0,11	10062	-	0,79
		-0,88	-	0,11	4108	0,42	0,76
		-0,85	-	0,03	24676	0,19	0,94
		-0,88	-	0,10	31850	-	0,81
		-0,85	-	0,03	18675	0,13	0,95

Model jest poprawnie dobrany, gdy rozkład reszt jest rozkładem normalnym, zaś na normalnym wykresie prawdopodobieństwa reszty leżą na linii prostej. Przykładowe wykresy rozkładu reszt i normalnego wykresu prawdopodobieństwa dla punktu z grupy A przedstawiono na rysunkach 16 i 17.



Rys.16. Histogram rozkładu reszt modelu ARIMA dla punktu z grupy A
Fig.16. Histogram of ARIMA model distribution of residuals for a point from the group A



Rys.17. Normalny wykres prawdopodobieństwa reszt modelu ARIMA dla punktu z grupy A
Fig.17. Normal graph of ARIMA model probability of residuals for a point from the group A

Tylko dla punktów z grupy A model zawiera dwa parametry średniej ruchomej. Oba parametry są ujemne. Dla pozostałych przejść model zawiera jeden parametr autoregresyjny. Dla przejść z grupy B i C parametr jest dodatni o wartościach z przedziału $[0,43; 0,69]$. Parametr ten informuje o związku pomiędzy elementem szeregu a elementem poprzednim. Gdy parametr osiąga wartość bliską jedności oznacza to, iż kolejne elementy niewiele różnią się od poprzednich. Natomiast gdy osiąga wartość -1 znaczy to, iż na przemian pojawiają się elementy dodatnie i ujemne o wartościach podobnych lecz przeciwnych znakach. W przypadku, gdy parametr uzyskuje wartość zera lub bliską zera poszczególne elementy szeregu mają znikomą wpływ lub nie mają go wcale na kolejne elementy. Dla punktów usytuowanych w pasie rozdziału konieczne jest kilkukrotne różnicowanie szeregu.

8. PODSUMOWANIE

Dojście pieszych do przejścia, podobnie jak większość zdarzeń związanych z komunikacją, jest zjawiskiem losowym. Oprócz tego jest procesem niestacjonarnym. W przypadku dojść do punktów zewnętrznych jest niestacjonarnym procesem Poissona. Wielkość liczby pieszych zgłaszających się do przejścia ulega zmianie w kolejnych cyklach. W krótkich interwałach czasu (10 sekund) proces jest bardzo zróżnicowany. Współczynnik zmienności niejednokrotnie przekracza 100%. Im dłuższy interwał tym współczynnik zmienności maleje, co odpowiada stabilizowaniu się liczby pieszych na pewnym poziomie. Zmiany liczby pieszych zgłaszających się do przejścia zachodzą również w trakcie cyklu. Nie są jednak identyczne dla wszystkich przejść. Na badanych przejściach wytypowano 5 grup z różnym rozkładem liczby pieszych na długości cyklu. Obserwacje prowadzone były w jednakowych odstępach czasu, co pozwoliło zastosować charakterystyki opisujące szeregi czasowe. Na podstawie analizy widmowej ustalono, że w większości przypadków istnieje cykliczność zmian liczby pieszych o okresie równym długości cyklu. Szereg czasowy opisano również modelem ARIMA. Dla większości przejść model zawiera tylko jeden parametr autoregresyjny, co świadczy o bliskim związku elementu tego szeregu z elementem wcześniejszym.

Przeprowadzone pomiary i analizy pozwoliły opisać proces zgłoszeń pieszych do przejścia przez jezdnię. Dzięki temu można zweryfikować istniejące modele opisujące straty czasu pieszych podczas przejść przez jezdnie na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Badania mogą przyczynić się również do projektowania sygnalizacji świetlnej z większym uwzględnieniem potrzeb pieszych. Szczególnie w sytuacji, gdy piesi muszą, zmierzając do celu podróży, przejść przez kilka jezdni w obrębie jednego skrzyżowania.

Często w literaturze pojawiają się tendencje, by poszczególne zjawiska opisywać w dłuższej perspektywie czasowej. Ma to na celu przedstawienie rozwoju danego zjawiska, a przez to wyeliminowanie przypadkowości, z jaką można się spotkać, gdy

zjawisko obserwuje się tylko w krótkim okresie. Zastosowanie szeregów czasowych pozwoliło opisać proces zgłoszeń pieszych do przejść przez jezdnie w sposób dynamiczny. Wykorzystanie analiz szeregów czasowych, zwłaszcza modeli ARIMA, umożliwia również prognozowanie przyszłych elementów tego szeregu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Hughes R.L.*: A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transportation Research, Part B*, **36**, 2002
- [2] *Lam H.K.W., Cheung C.Y.*: Pedestrian speed/flow relationship for walking facilities in Hong Kong. *Journal of Transportation Engineering*, July/August 2000
- [3] *Lam H.K.W., Lee J.Y.S., Cheung C.Y.*: A study of the bi-directional pedestrian flow characteristics at Hong Kong signalized crosswalk facilities. *Transportation*, **29**, 2002
- [4] *Mitchell D.H., Smith J.M.G.*: Topological network design of pedestrian networks. *Transportation Research, Part B*, **35**, 2001
- [5] *Zacharias J.*: Modeling pedestrian dynamics in Montreal's underground city. *Journal of Transportation Engineering*, September/October 2000
- [6] *Makuch J.*: Ruch pieszy w miastach. I. seminarium "Bezpieczeństwo i wygoda pieszych", Kazimierz Dolny 1999
- [7] *Szczuraszek T., Kempa J., Bebyn G., Chmielewski J.*: Analiza miejsc niebezpiecznych dla pieszych. II. seminarium "Bezpieczeństwo i wygoda pieszych", Kazimierz Dolny 2000
- [8] *Molecki B.*: Bezpieczeństwo i wygoda pieszych w drodze na przystanki komunikacji zbiorowej. II. seminarium "Bezpieczeństwo i wygoda pieszych", Kazimierz Dolny 2000
- [9] *Schwartz L.*: Problemy pieszych niepełnosprawnych i środki ich ograniczania. II. seminarium "Bezpieczeństwo i wygoda pieszych", Kazimierz Dolny 2000
- [10] *Gajewska B., Czerniak S.M.*: Droga dla pieszych widziana przez przechodniów, w tym przez osoby niepełnosprawne. *Drogi i Mosty*, 1/2003
- [11] *Kruszyna M.*: Prędkość pieszego na przejściu przez jezdnię. *Bezpieczne Drogi*, 12/99
- [12] *Kruszyna M.*: The green light time split at pedestrian crossing with consideration of different road users - zgłoszone do Archives of Transport
- [13] *Liu R., da Silva J.P.C., da Maia Seco A.J.*: A bi-modal microsimulation tool for the assessment of pedestrian delays and traffic management. 9 międzynarodowa konferencja "Travel Behaviour Research", Gold Coast, lipiec 2000
- [14] *Teknomo K., Takeyama Y., Inamura H.*: Microscopic pedestrian simulation model to evaluate lane-like segregation of pedestrian crossing. Konferencja "Infrastructure planning", **24**, Kouchi - Japan, listopad 2001

- [15] Teknomo K., Takeyama Y., Inamura H.: Tracking system to automate data collection of microscopic pedestrian traffic flow. 4 konferencja "Eastern Asia Society For Transportation Studies", 3, Hanoi - Vietnam, październik 2001
- [16] Akcelik R., Bennett S., Felton A.: Pedestrian movement characteristics at signalised intersections. 23 konferencja australijskiego Institute of Transport Research, Melbourne, grudzień 2001
- [17] Jaskiewicz F.: Pedestrian level of service based on trip quality. Konferencja "Urban street symposium", Dallas - Texas, lipiec 1999
- [18] Stonor T., de Arruda Campos M.B., Smith A.: Towards a walkability index. 3 konferencja "Steps towards liveable cities", San Sebastian - Spain, maj 2002
- [19] Hughes R.G. and others: Evaluation and application of pedestrian modeling capabilities using computer simulation. Final report of work, The university of North Carolina, Highway Safety Research Center, lipiec 2002
- [20] Kirchheim A., Rudnicki A.: Die Darstellung des Fahrgastflusses im Nahverkehrs als ein stochastischer Prozess. International Conference on the Applications of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering, University of Architecture and Building, Weimar 1997
- [21] STATISTICA PL dla Windows. Tom III "Statystyki cz.II", podręcznik użytkownika, Kraków 1997
- [22] Gajek L., Kałuszka M.: Wnioskowanie statystyczne. Modele i metody. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993

ANALYSES OF PEDESTRIAN ENTRY - PROCESS TO PEDESTRIANS CROSSING

Abstract

In this paper the analyses of pedestrian entry - process to road pedestrians crossing are described. Measurements and observations of pedestrian movements, made at several crossings in Wrocław, were the basis for the research. These crossings are signal - controlled and have significant numbers of pedestrians and vehicles. In the article changes of number of approaching pedestrians for different measure intervals (including cycle length) and entry - intervals distribution are characterised. Both spectral analysis of time - series of entry - process and autoregression analysis are carried out. The possibilities of applications of these analyses are discussed.