

Marek BAUER*

Politechnika Krakowska

OPIS PROBABILISTYCZNY ODCHYLEK PUNKTUALNOŚCI KOMUNIKACJI ZBIOROWEJ

Streszczenie. W referacie omówiono znaczenie punktualności pojazdów komunikacji zbiorowej. Dokonano analizy statystycznej odchyłek od rozkładu jazdy, a otrzymane wyniki przedstawiono w postaci histogramów. Opisano różnice pomiędzy wartościami średnimi, wariancjami i rozkładami odchyłek komunikacji autobusowej i tramwajowej w dni robocze i świąteczne. Porównano statystyki testów z odpowiadającymi im wartościami krytycznymi.

PROBABILISTIC DESCRIPTION OF PUNCTUALITY DEVIATION OF PUBLIC TRANSPORT VEHICLES

Summary. In this paper the meaning of punctuality of public vehicles was shown. Statistical analysis deviations of public transport time-tables was executed. Histograms of frequency deviations were presented. Differences between mean values, variances (standard deviations) and distributions of buses and trams in workdays and holidays were described. Finally, comparison of statistics of tests with critical values was done.

1. Istota punktualności komunikacji zbiorowej

Punktualność jest cechą transportu publicznego polegającą na tym, że określony pojazd osiąga, opuszcza lub mija zadany punkt linii we wcześniej ustalonym momencie czasu, w ramach określonej tolerancji. Najczęściej jest to zgodność rzeczywistego czasu odjazdu z przystanku z czasem rozkładowym. Punktualność jest istotna zarówno z punktu widzenia przewoźnika, jak i pasażera. Dla przewoźnika jest miarą dotrzymania deklaracji świadczonych usług, określonych w umowie z podmiotem zamawiającym, np. gminą. Ponadto, jako czynnik świadczący o wysokiej jakości wpływa na zwiększenie popytu na usługi przewozowe. Z kolei, dla pasażera wysoka punktualność stanowi podstawę do

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Andrzej Rudnicki

dokładnego planowania podróży, co szczególnie w przypadku małych częstotliwości kursowania pojazdów komunikacji zbiorowej ma duże znaczenie. Coraz większa ilość pasażerów przybywa na przystanek, kierując się informacją zawartą w rozkładzie jazdy, co jest spowodowane coraz łatwiejszym do niego dostępem (przystanki, internet). Niedotrzymanie rozkładu jazdy jest więc w ocenie podróżnego wyrazem zawodności obsługi.

1.1. Pojęcie odchyłki od rozkładu jazdy

Ponieważ dotrzymanie absolutnej punktualności nie jest realne, niezbędne jest określenie przedziału tolerancji, wewnątrz którego odjazdy traktowane są jako punktualne. W tym celu wprowadzono pojęcie odchyłki od rozkładu jazdy [3].

Odchyłka „d” – jest to różnica pomiędzy czasem odjazdu t_r przewidzianym w rozkładzie jazdy a rzeczywistym czasem t_c odjazdu z przystanku, która jest definiowana za pomocą wzoru:

$$d = t_r - t_c [\text{min}].$$

Wartości dodatnie odchyłek odpowiadają nadspieszeniom, natomiast wartości ujemne – opóźnieniom odjazdu z przystanku. Najczęściej za punktualny uznaje się odjazd z maksymalnie minutowym przyspieszeniem lub z maksymalnie 3-minutowym opóźnieniem.

2. Ocena parametrów rozkładu odchyłek od rozkładu jazdy

2.1. Wielkość próby pomiarowej

Do analizy wykorzystano wyniki pomiarów jakości funkcjonowania komunikacji zbiorowej w Krakowie, wykonanych w ramach systemu SKUT [4] w seriach dwumiesięcznych w 2000 roku. Zaobserwowano 11021 pojazdów komunikacji miejskiej, w których podróżowało 435621 pasażerów. Jest to próba reprezentatywna - przy założonym poziomie ufności $1-\alpha=0,95$ oraz błędzie maksymalnym $b_{\max}=0,01$, wystarczające byłoby wykonanie 9040 pomiarów. Analizę statystyczną przeprowadzono w oparciu o [1] i [2].

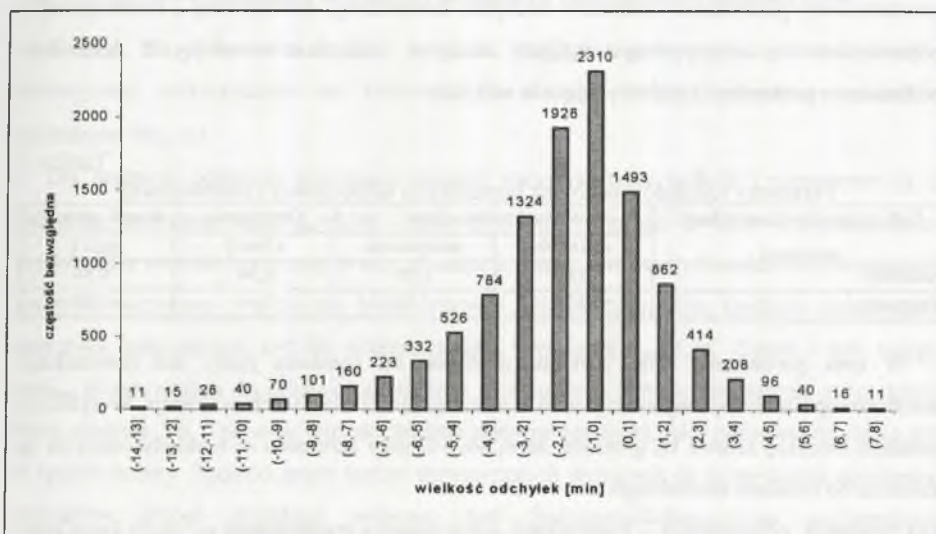
Zarejestrowane pojazdy podzielono na grupy pojazdów – najpierw na autobusy i tramwaje, a następnie na dni robocze i świąteczne. Liczebności poszczególnych grup pojazdów zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Zestawienie próby pomiarowej

Grupa pojazdów komunikacji zbiorowej	Liczba zaobserwowanych	
	pojazdów	pasażerów
Autobusy – dzień roboczy	5923	232052
Autobusy – dzień świąteczny	1254	31193
Autobusy ogółem	7177	263245
Tramwaje – dzień roboczy	3165	154142
Tramwaje – dzień świąteczny	679	18234
Tramwaje ogółem	3844	172376
Autobusy i Tramwaje ogółem	11021	435621

Z powodu dużej liczby zarejestrowanych wyników zdecydowano się na podział odchyłek na klasy o rozpiętościach równych jedną minutę. W ten sposób uzyskano przedziały prawostronnie domknięte. Oznacza to, że odjazdy absolutnie punktualne zostały zakwalifikowane jako nadspieszone, co jednak nie ma większego wpływu na kształt otrzymanego rozkładu odchyłek od rozkładu jazdy dla komunikacji zbiorowej w Krakowie. Największe zarejestrowane opóźnienie odjazdu wyniosło 29 minut, największe nadspieszenie 12 minut, zatem zakres odchyłek to 41 minut. Na rysunku 1 przedstawiono histogram częstości występowania odchyłek dla komunikacji zbiorowej z zakresu od 11 minut opóźnienia do 8 minut nadspieszenia, co odpowiada przedziałowi $(x-3,5s; x+3,5s]$.



Rys. 1. Histogram częstości odchyłek od rozkładu jazdy dla komunikacji zbiorowej w Krakowie w 2000 roku

Fig. 1. Histogram of frequency deviation for public transport vehicles in Cracow in 2000 year

Dla zbioru odchyłek komunikacji zbiorowej obliczono szereg parametrów pozycyjnych, miar rozrzutu oraz innych charakterystyk. Średnie opóźnienie wyniosło $d_0 = -2,52$, natomiast średnie nadspieszenie $d_n = 1,48$ minuty. Odchylenie standardowe osiągnęło wartość $s = 2,79$ minuty, współczynnik asymetrii $g_1 = 1,03$, współczynnik skupienia $K = 4,03$, współczynnik zmienności $v = -2,05$, a współczynnik nierównomierności $H = -1,48$. Wielkości przedstawionych parametrów świadczą nie tylko o większej liczbie ujemnych odchyłek, ale również o większym ich rozrzucie.

3. Porównanie odchyłek dla komunikacji autobusowej i tramwajowej

Komunikacja autobusowa różni się znacznie od tramwajowej chociażby tylko sposobem jazdy. Tramwaj jest z reguły mniej podatny na zakłócenia pochodzące od ruchu drogowego, zwłaszcza gdy korzysta z wydzielonego torowiska. Z drugiej strony szyna stanowi pewną barierę – np. w przypadku awarii jednego z pojazdów, drugi nie jest w stanie go ominąć, co niekiedy prowadzi do zablokowania całej trasy. Dlatego też sprawdzono, czy różnice dzielące komunikację autobusową i tramwajową mają wpływ na rozkłady odchyłek. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie rozkładów odchyłek komunikacji autobusowej i tramwajowej z odniesieniem do sumarycznego rozkładu odchyłek, natomiast w tabelicy 2 zestawiono podstawowe parametry charakteryzujące te rozkłady.

Tabela 2

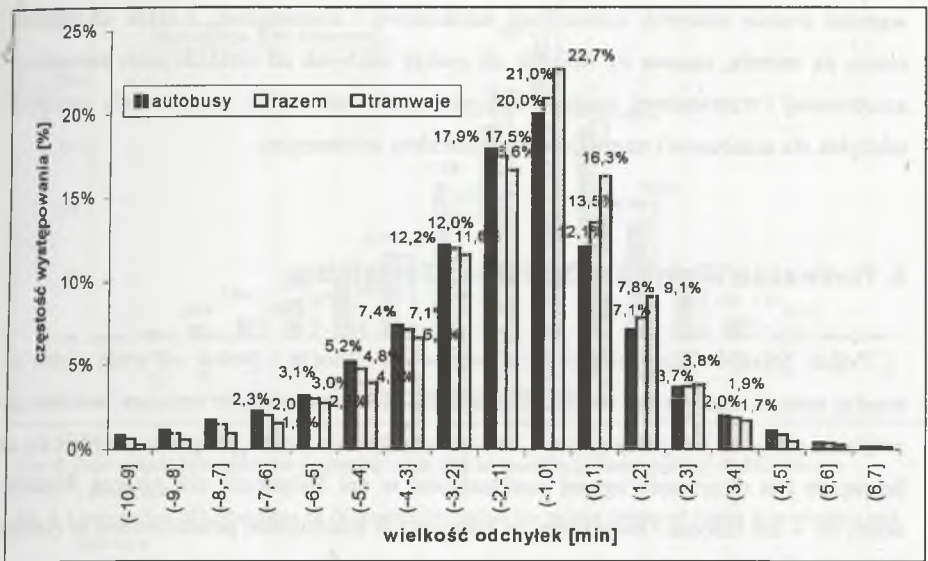
Parametry rozkładów odchyłek komunikacji autobusowej i tramwajowej

Grupa pojazdów komunikacji zbiorowej	Wartość średnia [min]		Odchylenie s [min]	Współ. asymetrii g_1 [-]
	opóźnień	nadspieszeń		
Autobusy	-2,67	1,59	2,94	-0,98
Tramwaje	-2,23	1,31	2,46	-1,03

W celu porównania miar rozrzutu odchyłek od rozkładu jazdy dla komunikacji autobusowej i tramwajowej skorzystano z testu istotności dla dwóch wariancji. Weryfikacji poddano hipotezę zerową H_0 głoszącą, że $\sigma_1^2 - \sigma_2^2 = 0$, przy założeniu że rozkłady odchyłek są zbliżone do rozkładu normalnego.

Dla wariancji, odpowiednio – komunikacji autobusowej i tramwajowej $s_A^2 = 8,62$ [min²] oraz $s_T^2 = 6,05$ [min²], otrzymano wartość statystyki testu $F = 1,425$ i porównano ją z wartością krytyczną testu na poziomie istotności $\alpha = 0,01$ $F_{kr} = 1,068$ oraz $\alpha = 0,05$ $F_{kr} = 1,048$. W obu

przypadkach $F > F_{kr}$, a zatem hipotezę o równości wariancji odrzucono z ryzykiem błędu równym 1%. Wariancje odchyłek komunikacji autobusowej i tramwajowej różnią się istotnie.



Rys. 2. Porównanie histogramów częstości odchyłek od rozkładu jazdy dla komunikacji autobusowej i tramwajowej

Fig. 2. Comparison of histograms of frequency deviation for public transport buses and trams

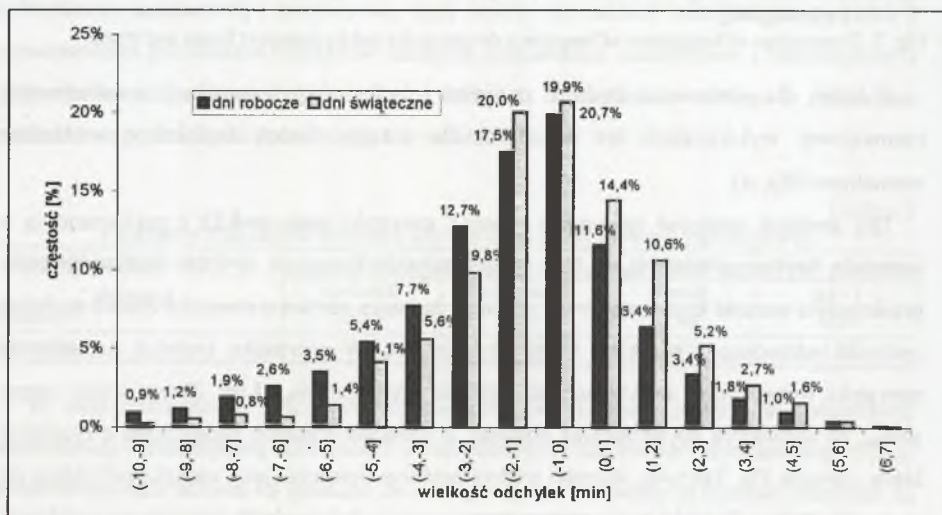
Z kolei, dla porównania średnich opóźnień i nadspieszzeń komunikacji autobusowej i tramwajowej wykorzystano test istotności dla różnicy dwóch średnich o rozkładzie normalnym $N(\mu, \sigma)$.

Dla średnich opóźnień otrzymano wartość statystyki testu $u=8,22$ i porównano ją z wartością krytyczną testu $u_{kr}=1,96$ - przy poziomie istotności $\alpha=0,05$. Statystyka testu przekroczyła wartość krytyczną $u > u_{kr}$, a zatem hipotezę zerową o równości dwóch średnich opóźnień odrzucono z ryzykiem błędu równym 5%. W przypadku średnich nadspieszzeń statystyka testu wynosi $u=5,96$ wobec wartości krytycznej $u_{kr}=1,96$. Zatem i tym razem $u > u_{kr}$, co upoważnia do odrzucenia hipotezy o równości średnich nadspieszzeń z ryzykiem błędu równym 5%. Tak więc wartości średnie zarówno opóźnień, jak i nadspieszzeń różnią się w sposób istotny. Spośród grupy testów statystycznych służących do sprawdzania zgodności rozkładów dwóch populacji wybrano test Smirnowa-Kołmogorowa porównujący dystrybuanty empiryczne dwóch rozkładów. W obliczeniach uwzględniono podział odchyłek na klasy o jednonumitowych rozpiętościach. Statystyka testu $\lambda=3,88$, przekroczyła wartość krytyczną $\lambda_{kr}=1,36$, zatem istnieje podstawa do odrzucenia hipotezy o identyczności

porównywanych rozkładów. Różnica pomiędzy rozkładami odchyłek komunikacji autobusowej i tramwajowej jest statystycznie istotna. Ponieważ zarówno wariancje, jak i wartości średnie odchyłek komunikacji autobusowej i tramwajowej, a także ich rozkłady różnią się istotnie, nasuwa się wniosek, że analizy odchyłek od rozkładu jazdy komunikacji autobusowej i tramwajowej powinny być prowadzone oddzielnie, a zestawienia wspólnych odchyłek dla autobusów i tramwajów mają charakter orientacyjny.

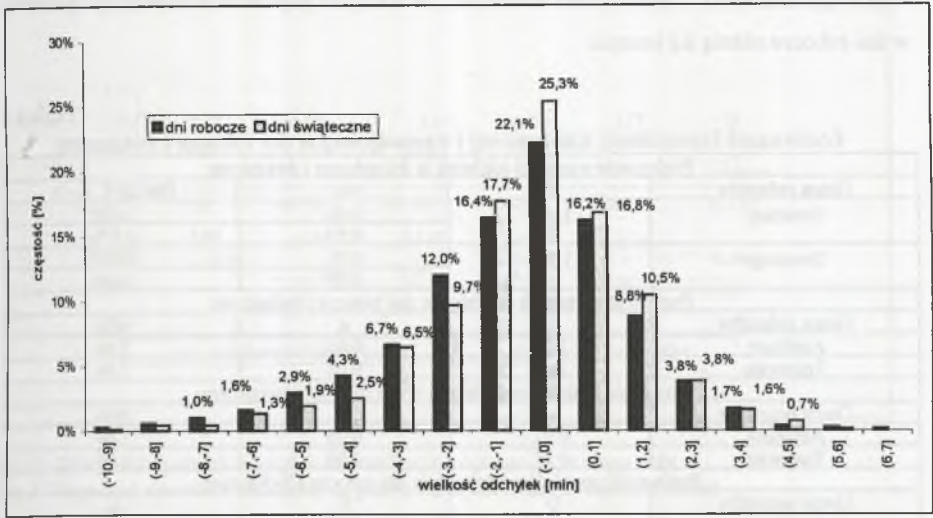
4. Porównanie odchyłek w dni robocze i świąteczne

Potoki pojazdów komunikacji zbiorowej w dni robocze i wolne od pracy różnią się między sobą. Z reguły w dni świąteczne częstotliwość kursowania jest mniejsza, podobnie jak natężenie ruchu wszystkich pojazdów. Mniejsze są również potoki pasażerów. Wydaje się, że łatwiejsze jest utrzymanie lepszej punktualności w dni świąteczne niż robocze. Rozkłady odchyłek w dni robocze i świąteczne dla komunikacji autobusowej przedstawiono na rysunku 3, natomiast dla komunikacji tramwajowej na rysunku 4.



Rys. 3. Porównanie histogramów częstości odchyłek komunikacji autobusowej w dni robocze i świąteczne

Fig. 3. Comparison of histograms of frequency deviation for public transport buses in workdays and holidays



Rys. 4. Porównanie histogramów częstości odchyłek komunikacji tramwajowej w dni robocze i świąteczne

Fig. 4. Comparison of histograms of frequency deviation for public transport trams in workdays and holidays

W tabelicy 3 przedstawiono wyniki wybranych parametrów rozkładów odchyłek w dni robocze i świąteczne.

Tabela 3

Parametry rozkładów odchyłek w dni świąteczne i robocze

Grupa pojazdów komunikacji zbiorowej	Wartość średnia [min]		Odchylenie s [min]	Współczynnik g_1 [-]
	opóźnień	nadspieszzeń		
Autobusy – dni robocze	-2,76	1,57	2,98	-0,96
Autobusy – dni świąteczne	-2,15	1,64	2,61	-1,06
Tramwaje – dni robocze	-2,28	1,31	2,48	-0,90
Tramwaje – dni świąteczne	-1,98	1,29	2,34	-1,77

Z histogramów przedstawionych na rysunkach 3 i 4 oraz z danych zamieszczonych w tabelicy 3 wynika, że większe wartości opóźnień dotyczą dni roboczych. Również wielkości współczynników asymetrii świadczą o większym udziale kursów opóźnionych w dni robocze. Dla porównania odpowiadających sobie parametrów odchyłek w dni robocze i świąteczne osobno dla komunikacji autobusowej i tramwajowej wykonano ten sam zestaw testów statystycznych co w przypadku porównania komunikacji autobusowej i tramwajowej. Wyniki testów oraz odpowiadające im wartości krytyczne zamieszczono w tabelicy 4.

Wartości obliczonych testów istotności wskazują na znaczne różnice pomiędzy parametrami w dni robocze i świąteczne. Jedynie w przypadku średnich nadspieszzeń rodzaj dnia nie ma

większego znaczenia. Zatem można stwierdzić, że odchyłki pojazdów komunikacji zbiorowej w dni robocze różnią się istotnie.

Tablica 4

Porównanie komunikacji autobusowej i tramwajowej w dni robocze i świąteczne

Porównanie wariancji odchyłek w dni robocze i świąteczne			
Grupa pojazdów	F	α	$F(\alpha, n_A-1, n_T-1)$
Autobusy	1,298	0,01	1,109
		0,05	1,076
Tramwaje	1,126	0,01	1,153
		0,05	1,106
Porównanie średnich opóźnień w dni robocze i świąteczne			
Grupa pojazdów	u	α	u(α)
Autobusy	7,25	0,05	1,96
Tramwaje	2,82	0,05	1,96
Porównanie średnich nadspieszeń w dni robocze i świąteczne			
Grupa pojazdów	u	α	u(α)
Autobusy	0,91	0,05	1,96
Tramwaje	0,27	0,05	1,96
Porównanie rozkładów odchyłek w dni robocze i świąteczne			
Grupa pojazdów	D	λ	λ_T
Autobus	0,1352	4,35	1,36
Tramwaje	0,0650	1,58	1,36

5. Rozkład odchyłek w ciągu roku

Wielkości średnich odchyłek od rozkładu jazdy zmieniają się w ciągu roku. Wynika to ze zmieniających się warunków atmosferycznych (pory roku), sezonowości (okres wakacyjny, szkolny), a także z losowości próby. Łamane zmienności odchyłek sporządzono w oparciu o wartości średnie z dwumiesięcznych pomiarów – zostały przedstawione na rysunku 5 (komunikacja autobusowa) oraz na rysunku 6 (komunikacja tramwajowa). Wartości odchyłeń standardowych w ciągu roku zamieszczono w tablicy 5.

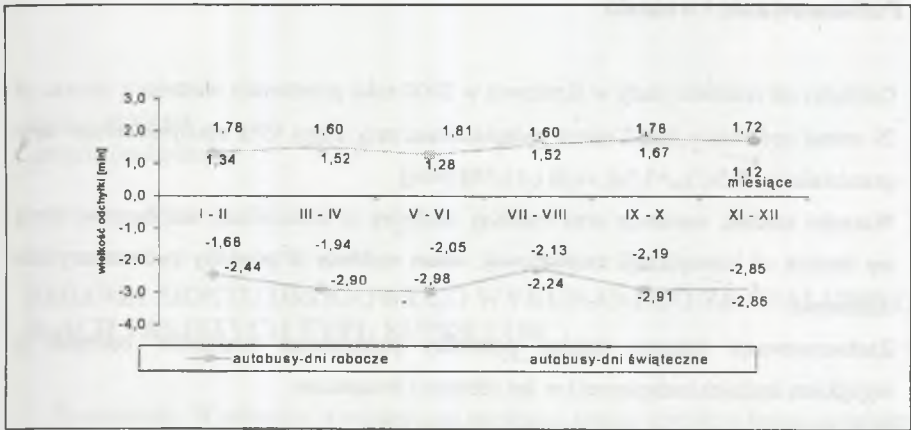
Tablica 5

Zmienność odchyłeń standardowych w ciągu roku

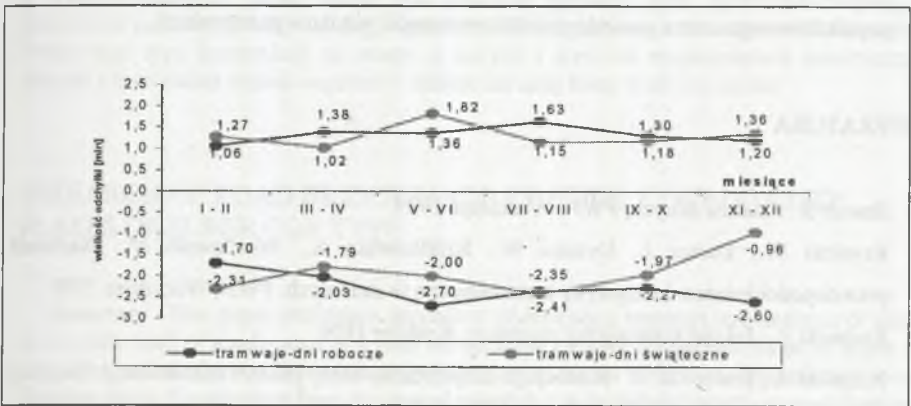
Grupa pojazdów komunikacji zbiorowej	Odchylenie standardowe [min]					
	I - II	III - IV	V - VI	VII - VIII	IX - X	XI - XII
Autobusy – dni robocze	2,80	2,77	2,83	2,65	3,41	3,13
Autobusy – dni świąteczne	2,25	2,08	2,45	2,61	2,55	3,23
Tramwaje – dni robocze	1,93	2,49	2,82	2,63	2,33	2,58
Tramwaje – dni świąteczne	2,40	1,71	3,22	2,39	2,21	1,47

W celu porównania rozrzutu odchyłek na przestrzeni roku 2000 wykonano test Bartletta polegający na weryfikacji hipotezy o równości wielu wariancji: $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \dots = \sigma_k^2$.

Porównanie statystyk testów z wartościami krytycznymi przedstawiono w tablicy 6.



Rys. 5. Zmienność średnich odchyłek komunikacji autobusowej w ciągu roku
Fig. 5. Frequency deviation variability of public transport buses all the year round



Rys. 6. Zmienność średnich odchyłek komunikacji tramwajowej w ciągu roku
Fig. 6. Frequency deviation variability of public transport trams all the year round

Tablica 6

Porównanie wariancji odchyłek w ciągu roku

Grupa pojazdów komunikacji zbiorowej	χ^2	α	$\chi^2_{kr}(1-\alpha, k-1)$
Autobusy - dni robocze	82,281	0,05	11,071
Autobusy - dni świąteczne	48,454	0,05	11,071
Tramwaje - dni robocze	87,142	0,05	11,071
Tramwaje - dni świąteczne	77,554	0,05	11,071

We wszystkich rozważanych przypadkach statystyka testu przekracza wartość krytyczną: $\chi^2 > \chi^2_{kr}$, co oznacza, że istnieją podstawy do odrzucenia hipotezy o równości wielu wariancji. Wskazuje to na duże zróżnicowanie wariancji odchyłek w ciągu roku.

6. Podsumowanie i wnioski

- 1) Odchyłki od rozkładu jazdy w Krakowie w 2000 roku przybierały wartości z zakresu od 29 minut opóźnienia do 12 minut nadspieszenia, przy czym 99% odchyłek mieści się w przedziale $(x_{sr}-3,5s; x_{sr}+3,5s)$, czyli $(-11,+8)$ [min].
- 2) Wartości średnie, wariancje oraz rozkłady odchyłek w komunikacji autobusowej różnią się istotnie od komunikacji tramwajowej, zatem rozkłady te powinny być rozpatrywane oddzielnie.
- 3) Zaobserwowano znaczne różnice pomiędzy parametrami rozkładów odchyłek (z wyjątkiem średnich nadspieszeń) w dni robocze i świąteczne.
- 4) Duże zróżnicowanie wariancji odchyłek w ciągu roku.
- 5) Uzasadniony byłby dalszy podział odchyłek na godziny szczytu, co jednak nie jest łatwe ze względu na dość dużą rozpiętość okresu szczytowego, zwłaszcza w przypadku szczytu popołudniowego oraz z powodu nierównomierności potoków pasażerskich.

LITERATURA

1. Brandt S.: Analiza danych, PWN, Warszawa 1999.
2. Krysiński W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M.: Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. PWN, Warszawa 1999.
3. Rudnicki A.: Jakość komunikacji miejskiej. Kraków 1999.
4. Rudnicki A., Starowicz W.: Koncepcja statystycznej oceny jakości komunikacji zbiorowej w Krakowie. Materiały konferencyjne „Metody oceny i kontroli funkcjonowania komunikacji zbiorowej”, Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITK w Krakowie, nr 15 (50), Kraków 1996.

Recenzent: Prof. dr inż. Czesław Lewinowski

Abstract

In this paper the meaning of punctuality of public vehicles was shown. Statistical analysis deviations of public transport time-tables was executed. Histograms of frequency deviations were presented. Differences between mean values, variances (standard deviations) and distributions of buses and trams in workdays and holidays were described. Finally, comparison of statistics of tests with critical values was done.