

Marek BAUER\*  
Politechnika Krakowska

## MODELE REGRESJI DLA ODCHYLEK W PUNKTUALNOŚCI AUTOBUSÓW KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono klasyfikację czynników wpływających na pogarszanie się punktualności kursowania autobusów. Zaprezentowano grupę modeli statystycznych, opisujących zależność wielkości odchyłki od rozkładu jazdy dla wybranych czynników. Dokonano statystycznej analizy uzyskanych modeli, przedstawiono wnioski dotyczące dalszych badań.

## REGRESSION MODELS FOR DEVIATIONS IN PUNCTUALITY OF PUBLIC TRANSPORT BUSES

**Summary.** In this paper the classification of factors which have an effect on punctuality of public vehicles was shown. The group of statistical models, which describes the relationship between deviation of public transport time-tables and the selected factors were shown. Statistical analysis of obtained models was executed. Finally the conclusions to apply the models for further research were shown.

### 1. Czynniki wpływające na brak punktualności pojazdów komunikacji zbiorowej w miastach

Punktualność jest jedną z najważniejszych cech transportu publicznego, wyrażającą zgodność rzeczywistego czasu odjazdu z przystanku z czasem rozkładowym. Ponieważ dotrzymanie absolutnej punktualności nie jest ani realne, ani konieczne, niezbędne jest określenie przedziału tolerancji, wewnątrz którego odjazdy traktowane są jako punktualne. W tym celu wprowadzono pojęcie odchyłki od rozkładu jazdy.

Odchyłka „d” jest różnicą pomiędzy czasem odjazdu  $t_r$  przewidzianym w rozkładzie jazdy a rzeczywistym czasem  $t_e$  odjazdu z przystanku, definiowaną za pomocą wzoru:

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

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

Wartości dodatnie odchyłek odpowiadają odjazdom przed czasem rozkładowym, natomiast wartości ujemne – opóźnieniom odjazdu z przystanku. Najczęściej za punktualny uznaje się odjazd z przedziału między maksymalnie minutowym przyspieszeniem a maksymalnie 3-minutowym opóźnieniem.

Istnieje bardzo wiele czynników mogących wpływać na brak punktualności autobusów komunikacji miejskiej. Najliczniejszą grupę stanowią czynniki bezpośrednio związane z podstawowymi funkcjami komunikacji zbiorowej, czyli z przewozem pasażerów między kolejnymi przystankami i wymianą pasażerów na przystankach. Czynniki dotyczące procesu poruszania się autobusów oznaczono symbolem (J), natomiast dotyczące wymiany – symbolem (W). Do grupy tej należą:

- natężenie ruchu pojazdów (J),
- brak priorytetów w ruchu dla komunikacji zbiorowej (wydzielenie pasa ruchu, torowiska, dostosowanie programu sygnalizacji) (J),
- straty czasu na skrzyżowaniach, zależne od rodzaju relacji (J),
- występowanie wydzielonych przejść dla pieszych z sygnalizacją świetlną na odcinkach między przystankami (J),
- prędkość jazdy (maksymalna i możliwa) (J),
- niewystarczająca przepustowość ulic i pasów wydzielonych (J),
- wypadki z udziałem pojazdów komunikacji zbiorowej (J) i (W),
- wypadki bez udziału pojazdów komunikacji zbiorowej (J),
- awarie pojazdów komunikacji miejskiej (J) i (W),
- awarie innych pojazdów (J),
- napełnienia pojazdów (J) i (W),
- opóźnienie lub przyspieszenie pojazdu względem rozkładu jazdy na poprzednich przystankach (J) i (W),
- parametry taboru (rodzaj, pojemność, ilość i rozstaw drzwi, udogodnienia dla pasażerów) (J) i (W),
- liczba pasażerów znajdujących się w pojeździe podjeżdżającym do przystanku i z niego odjeżdżającym (W),
- liczba pasażerów wysiadających (W),
- liczba pasażerów wsiadających (W),
- liczba pasażerów ustępujących miejsca wysiadającym (W),
- udział poszczególnych drzwi w procesie wymiany (W),
- infrastruktura przystanku (powierzchnia do stania, oświetlenie, wiata i inne) (W),

- odległość zatrzymania pojazdu względem wiaty (W),
- natężenie ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej (W),
- liczba pojazdów na przystanku (W),
- wielkość potoku pasażerów (W),
- rodzaj przystanku (węzeł przesiadkowy, przystanek „zwykły”, na żądanie) (W),
- proces zgłoszeń pasażerów na przystanek (W),
- sposób uiszczenia opłaty za przejazd (W),
- zatłoczenie powierzchni oczekiwania (W),
- kompletność informacji dla pasażerów (W).

Pozostałe, rozpatrywane czynniki są związane z organizacją komunikacji miejskiej, warunkami środowiskowymi i lokalnymi oraz z czynnikiem ludzkim. Do grupy tej należą:

- nierealistyczne rozkłady jazdy (O),
- działania dyspozytorskie (np. przytrzymywanie) (O),
- polityka komunikacyjna (O),
- warunki atmosferyczne (S),
- pora roku, sezonowość (S),
- rodzaj dnia (dzień roboczy, dzień świąteczny, sobota) (S),
- pora dnia (szczyt poranny, popołudniowy, międzyszczyt) (S),
- dyspozycja i właściwości psychofizyczne kierowców (L),
- dyscyplina pasażerów (L).

Niestety, mnogość czynników praktycznie uniemożliwia kompleksowe ich zbadanie. Niektóre wpływy (np. związane z czynnikiem ludzkim) są całkowicie niemierzalne, inne (np. liczba pasażerów ustępujących miejsca wysiadającym) trudne do dokładnego ustalenia i czasochłonne. Z kolei ustalenie wpływu czynników lokalnych i środowiskowych wymaga dużej i zróżnicowanej próby pomiarowej.

## 2. Modele narastania niepunktualności

### 2.1. Próba pomiarowa

Analizę czynników wpływających na zakłócenia punktualności autobusów oparto na wynikach pomiarów, wykonanych w Krakowie, w kwietniu 2003 roku, w przeciętny dzień roboczy. Pomiaru wykonano na czterech liniach miejskich – liniach zwykłych o numerach

105 i 115 oraz liniach przyspieszonych 501 i 502. Linia nr 105 o długości 5,5 km ma charakter promienisty, łączy rejon centrum z rejonami mieszkalnymi, natomiast linie 115 (15,5 km), 501 (22 km) i 502 (21 km) są liniami średnicowymi, biegnącymi przez centrum.

Badania punktualności były prowadzone wewnątrz pojazdów, poruszających się wzdłuż linii, z wykorzystaniem zegarów aktualizowanych satelitarnie. Napełnienia pojazdów, liczbę pasażerów wsiadających i wysiadających szacowano techniką wzrokową. Podczas pomiarów rejestrowano momenty zatrzymania autobusów na przystankach, momenty zakończenia wymiany pasażerów, włączenia się do ruchu, momenty zatrzymania i ruszania na odcinkach międzyprzystankowych (linia 501 i 502), napełnienia pojazdów podjeżdżających na przystanki, liczbę pasażerów wsiadających i wysiadających (linia 105).

Zarejestrowane wartości posłużyły do obliczenia zbioru parametrów: wielkości odchyłek od rozkładu jazdy, czasu postoju autobusu na przystanku, czasu wymiany pasażerów, czasu przejazdu odcinka, czasu traconego na przystankach (otwieranie i zamykanie drzwi, hamowanie, ruszanie, sprzedaż biletów przez kierowcę) i odcinkach międzyprzystankowych. Wykorzystano również informacje dotyczące odległości między przystankami, co pozwoliło na określenie prędkości przejazdu poszczególnych odcinków sieci.

Ogółem, zarejestrowano 527 odchyłek od rozkładu jazdy, mieszczących się w przedziale od 16,70 minut opóźnienia do 7,02 minut nadspieszenia. Analizie poddano wyniki pomiarów dotyczących 75 przystanków oraz 74 odcinków międzyprzystankowych.

## 2.2. Analiza wyników pomiarów

Analizę wyników pomiarów przeprowadzono z zastosowaniem pakietu Statgraphics. Na podstawie wstępnej analizy ustalono, że rozkład wszystkich odchyłek ( $n=527$ , próba duża) jest zbliżony do normalnego. Przeciętna wartość odchyłki to 1,90 minuty opóźnienia, natomiast odchylenie standardowe wyniosło 3,49 minuty.

Na podstawie dostępnych danych utworzono modele regresji prostej opisujące zależność odchyłki od rozkładu jazdy ( $d_n$ ) od odchyłki na poprzednim przystanku ( $d_{n-1}$ ), prędkości przejazdu od początku linii ( $v_0$ ), czasu przejazdu od początku linii ( $t_{p0}$ ) oraz odległości od początku linii ( $s_0$ ). Wybrane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Zestawienie modeli regresji prostej

Zależność	Model	Współczynnik korelacji R
$d_n (d_{n-1})$	$d_n = -0,083 + 0,99d_{n-1}$	0,949
$d_n (v_0)$	$d_n = -18,47 + 5,55 \ln(v_0)$	0,383
$d_n (t_{p0})$	$d_n = -0,579 - 0,059t_{p0}$	-0,303
$d_n (s_0)$	$d_n = -0,77 - 0,455 (s_0)^{0,5}$	-0,143

Jedynie w przypadku porównania odchyłek zmierzonych na dwóch kolejnych przystankach zaobserwowano bardzo dużą korelację, co jest spowodowane w większości niewielkimi odległościami pomiędzy sąsiednimi przystankami i relatywnie krótkimi czasami przejazdu. Wyraz wolny w uzyskanym wzorze okazał się statystycznie nieistotny, nawet na poziomie istotności 0,10, zatem, model ten nie wyjaśnia zjawiska narastania niepunktualności.

Również niskie wartości współczynników korelacji dla pozostałych zależności spowodowały konieczność utworzenia modeli złożonych, bazujących na większej liczbie zmiennych objaśniających. Wykonano szereg obliczeń wpływu dostępnych parametrów na wielkość odchyłki. W wyniku zastosowania analizy dyskryminacyjnej uzyskano grupę modeli narastania odchyłek, opartych na zależności:

$$d_n (d_{n-1}, t_{wn}, v_n(t_{pn}, s_n)),$$

gdzie:

$d_n$  – odchyłka od rozkładu jazdy [min],

$d_{n-1}$  – odchyłka od rozkładu jazdy na przystanku poprzednim [min],

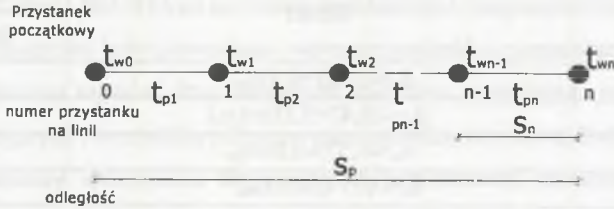
$t_{wn}$  – czas pobytu na przystanku [min],

$v_n$  – prędkość przejazdu odcinka [km/h],

$t_{pn}$  – czas przejazdu odcinka [min],

$s_n$  – odległość od poprzedniego przystanku [km].

Graficzny obraz modelu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat modelu narastania niepunktualności  
 Fig. 1. Scheme of model for unpunctualities increase

Jako czas postoju autobusu na przystanku przyjęto okres od chwili zatrzymania pojazdu do momentu włączenia się do ruchu. W przypadku występowania zatoki autobusowej był to moment jej opuszczenia i zajęcia pasa ruchu, w przypadku zatrzymań na jezdni była to chwila odjazdu z przystanku. Natomiast czas przejazdu odcinka międzyprzystankowego, to okres od chwili włączenia się do ruchu na poprzednim przystanku do momentu zatrzymania.

Analiza wpływu poszczególnych parametrów doprowadziła do utworzenia modeli regresji wielorakiej dla poszczególnych linii oraz wspólnego modelu dla wszystkich linii. W przypadkach braku istotności poszczególnych elementów dążono do ich redukcji. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 2.

Modele sporządzono na podstawie danych mieszczących się w następujących przedziałach:  $d_n, d_{n-1}$  [-16,70; 7,02 min],  $t_{wn}$  [0,08; 2,27 min],  $v_n$  [2,8; 65,5 km/h].

W przypadku modeli dla poszczególnych linii uzyskano bardzo wysokie wartości współczynnika determinacji, świadczące o dobrym dopasowaniu modelu. Współczynniki regresji dla odchyłki na przystanku poprzednim we wszystkich przypadkach są istotne na poziomie istotności 0,01. Wartości współczynnika regresji dla czasu wymiany pasażerów są istotne w modelach dla linii 105 i 502, natomiast dla prędkości przejazdu odcinka linii jedynie w modelach dla linii nr 502. Ponadto, większą istotnością współczynników regresji charakteryzują się modele, które nie zawierają wyrazu wolnego.

Model wspólny dla wszystkich analizowanych linii charakteryzuje się bardzo wysoką wartością współczynnika determinacji – model wyjaśnia 93% wyników, przy czym wszystkie współczynniki modelu są istotne na poziomie istotności 0,01. Wartości standardowego błędu

estymacji osiągają wartości od 0,64 do 1,02, co oznacza, że modele te w wystarczający sposób wyjaśniają wpływ czynnika losowego na proces narastania odchyłek. Zestawienie przedziałów ufności dla poszczególnych współczynników modelu przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 2  
Zestawienie modeli regresji wielorakiej dla poszczególnych linii i grupy linii

Nr linii	Liczba elementów	Model	Współczynnik determinacji
	n		R <sup>2</sup>
105	197	$d_n = 0,854d_{n-1} - 1,21t_{wn} + 0,0086v_n$	89,4%
105	197	$d_n = -0,68 + 0,814d_{n-1} - 0,593t_{wn} + 0,025v_n$	67,9%
115	21	$d_n = 0,875d_{n-1} + 0,073t_{wn} - 0,085v_n$	93,7%
115	21	$d_n = -2,10 + 0,821d_{n-1} + 0,43t_{wn} - 0,023v_n$	73,4%
501	121	$d_n = 0,996d_{n-1} + 0,125t_{wn} - 0,011v_n$	95,6%
501	121	$d_n = -0,04 + 0,995d_{n-1} + 0,162t_{wn} - 0,010v_n$	92,7%
502	128	$d_n = 0,992d_{n-1} - 1,12t_{wn} + 0,025v_n$	92,8%
502	128	$d_n = -0,93 + 0,985d_{n-1} - 0,793t_{wn} + 0,054v_n$	93,4%
<b>wszystkie</b>	<b>527</b>	<b><math>d_n = 1,006d_{n-1} - 1,274t_{wn} + 0,020v_n</math></b>	<b>93,0%</b>
wszystkie	527	$d_n = -0,87 + 0,996d_{n-1} - 0,767t_{wn} + 0,045v_n$	91,4%

Tabela 3  
Przedziały ufności dla współczynników modelu regresji wielorakiej dla wszystkich badanych linii

Parametr	Wartość parametru	Przedział ufności (poz. ufn. 0,95)
$d_{n-1}$	1,006	(0,979; 1,033)
$t_{wn}$	-1,274	(-1,614; -0,934)
$v_n$	0,020	(0,014; 0,026)

### 3. Podsumowanie i wnioski

- 1) Istnieje duża liczba bardzo zróżnicowanych czynników wpływających na pogorszenie punktualności.
- 2) Model regresji prostej opisujący zależność pomiędzy odchyłkami z dwóch sąsiadujących przystanków nie wyjaśnia zjawiska narastania niepunctualności.
- 3) Na podstawie analizy odchyłek od rozkładu jazdy, przeprowadzonej na czterech liniach miejskich, uzyskano model regresji wielorakiej uwzględniający wpływy: odchyłki na przystanku poprzednim, czasu postoju autobusu na przystanku oraz prędkości przejazdu

odcinka linii. Natomiast modele odchyłek dla poszczególnych linii oddzielnie różnią się pomiędzy sobą istotnie.

- 4) Do ustalenia bardziej wiarygodnych modeli konieczne jest uzyskanie znacznie większej próby pomiarowej, poprzez wykonanie podobnych pomiarów na innych liniach obsługiwanych przez autobusy.
- 5) Konieczne jest rozważenie zależności pomiędzy odchyłkami zarejestrowanymi nie na sąsiadujących przystankach, np. tylko na przystankach węzłowych lub co kilka przystanków. Pozwoli to na lepszy opis czynnika losowego wpływającego na narastanie niepunktualności.
- 6) W dalszych badaniach będą uwzględnione niektóre, inne (poza badanymi) czynniki wpływające na pogarszanie się punktualności.

#### LITERATURA

1. Bauer M.: Opis probabilistyczny odchyłek punktualności komunikacji zbiorowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, nr 95, Gliwice 2002.
2. Dobosz M.: Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań. Warszawa 2001.
3. Praca zbiorowa pod redakcją Rudnickiego A.: Obsługa komunikacyjna w obszarach zurbanizowanych w Polsce. Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITK w Krakowie, nr 1 (30), Kraków 1994.
4. Rudnicki A.: Jakość komunikacji miejskiej. Kraków 1999.
5. 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

The classification of factors which have an effect on punctuality of public vehicles was presented. Statistical models, which describe the relationship between deviation of public transport time-tables and the selected factors were shown. Statistical analysis of obtained models was executed, the conclusions to apply the models for further research were shown.