

Marek BAUER*
Politechnika Krakowska

ZAŁOŻENIA SYMULACYJNEGO MODELU PUNKTUALNOŚCI AUTOBUSÓW KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono istotę zjawiska narastania zakłóceń punktualności kursowania autobusów miejskiej komunikacji zbiorowej. Zaprezentowano matematyczny opis linii komunikacji zbiorowej oraz zarys modelu symulacyjnego, opisującego ruch pojazdów komunikacji miejskiej wzdłuż linii. Zaproponowano wstępną formalną postać modelu dynamicznego. Przedstawiono wnioski dotyczące dalszych badań.

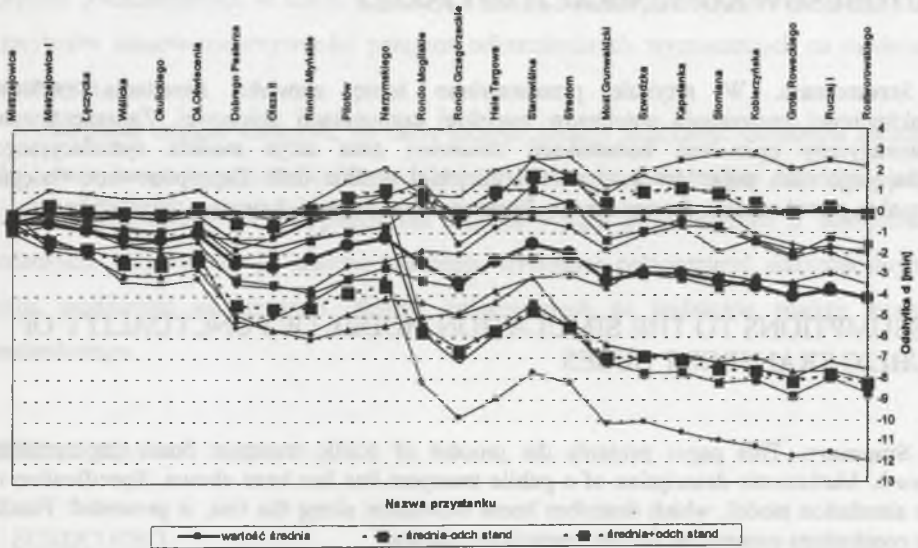
ASSUMPTIONS TO THE SIMULATION MODEL OF PUNCTUALITY OF PUBLIC TRANSPORT BUSES

Summary. This paper presents the process of public transport buses unpunctuality growth. Mathematic description of a public transport line has been shown. Specification of the simulation model, which describes buses movement along the line, is presented. Finally the conclusions concerning further research are shown.

1. Zjawisko niepunktualności

W opinii pasażerów punktualność jest jedną z najważniejszych cech funkcjonowania miejskiej komunikacji zbiorowej. Jest ona istotna zarówno dla pasażerów oczekujących na pojazd na przystanku, jak również dla osób znajdujących się w pojeździe poruszającym się wzdłuż linii. Wielkości odchyłek od rozkładu jazdy zmieniają się wraz ze zmianą położenia pojazdu wzdłuż linii. Zmianom ulegają nie tylko wartości odchyłek, ale również ich znak. Przykładowe wyniki pomiarów odchyłek, wykonanych w Krakowie na linii nr 128, zilustrowano na rys.1. O ile w przypadku przyspieszeń we fragmentach stosunku do rozkładu jazdy - na pewnych fragmentach linii, kierujący pojazdem (posiadający informacje o wielkości przyspieszenia) może poprzez celowe zwalnianie doprowadzić do zmniejszenia lub

zlikwidowania niepunktualności, o tyle w sytuacjach znacznych opóźnień często nie ma możliwości powrotu na kurs punktualny (rys.1.). Prowadzi to często do pogłębiania opóźnień, co w przypadku długich interwałów międzypojazdowych ma szczególne znaczenie. Znajomość zjawiska narastania niepunktualności może być pomocna przy konstrukcji realistycznych rozkładów jazdy, uwzględniających różnorodność i złożoność czynników wpływających na obniżenie punktualności. Ponadto, może pomóc w efektywniejszym wykorzystywaniu technik dyspozytorskich.



Rys.1. Zestawienie trajektorii odchyłek od rozkładu jazdy wzdłuż miejskiej linii 128 w Krakowie w godzinach szczytu popołudniowego

Fig.1. Composition of paths of deviations from time-table along public transport line 128 in Cracow

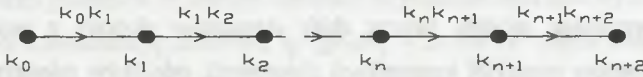
W niniejszym artykule opisano założenia do modelu symulacyjnego, którego zadaniem będzie odwzorowanie procesu narastania zakłóceń punktualności autobusów.

2. Opis linii komunikacji miejskiej

W ujęciu teorii grafów model pełnego kursu pojazdu miejskiej komunikacji zbiorowej można przedstawić jako digraf prosty cykliczny, najczęściej składający się z dwóch półkursów oraz dwóch odcinków buforowych, stanowiących połączenie owych półkursów na

końcówkach linii. Natomiast model półkursu można opisać jako digraf prosty zawierający x – wierzchołków oraz $x-1$ łuków (rys.2).

**SCHEMAT PÓŁKURSU LINII KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ
STRUKTURA DIGRAFU PROSTEGO**



$V(D) = \{ k_0, k_1, k_2, \dots, k_n, k_{n+1}, k_{n+2} \}$ - zbiór wierzchołków digrafu

$A(D) = \{ k_0 k_1, k_1 k_2, \dots, k_n k_{n+1}, k_{n+1} k_{n+2} \}$ - zbiór łuków digrafu

Rys.2. Schemat półkursu linii komunikacji miejskiej w ujęciu teorii grafów
Fig.2. Diagram of public transport half-line according graph theory

Zbiór wierzchołków digrafu jest utożsamiany ze zbiorem przystanków, natomiast zbiór łuków digrafu odpowiada zbiorowi odcinków międzyprzystankowych. Jeżeli wierzchołek k_0 stanowi odpowiednik przystanku początkowego, to dalszy przebieg półkursu jest sentencją kolejnych par elementów (modułów): odcinek międzyprzystankowy – przystanek.

3. Elementy modelu symulacyjnego

3.1. Założenia modelu

Proponowany model symulacyjny jest dyskretny w czasie – a czas w modelu przyjmuje wartości rosnące z zakresu liczb rzeczywistych. Ponadto, model ten ma układ zdarzeniowy, co oznacza, że symulator nie zwraca uwagi na stan modelu pomiędzy kolejnymi zdarzeniami. Z kolei – z uwagi na konieczność uwzględnienia w modelu warunków początkowych – model ma charakter nieautonomiczny. Model zawiera zarówno wartości deterministyczne, jak i zmienne losowe.

W analizowanym modelu przyjęto założenie, że czas pobytu autobusu na przystanku składa się z czasu wymiany pasażerów, czasu traconego przed i po zakończeniu wymiany oraz ewentualnie czasu sprzedaży biletów przez kierowcę. Natomiast czas hamowania i czas przyspieszania pojazdu wchodzi w skład czasów przejazdu odcinków sieci, odpowiednio poprzedzającego przystanek i po nim następującego. Jako czas tracony przez autobus na przystanku przyjęto okres od chwili zakończenia wymiany pasażerów (ewentualnie

zakończenia sprzedaży biletów przez kierowcę) do momentu włączenia się do ruchu. Czas tracony najczęściej wynika z niemożności wyjazdu z zatoki spowodowanej ruchem innych pojazdów.

3.2. Opis elementów składowych modelu symulacyjnego

Strukturę przyjętego modelu tworzy zbiór elementów złożony z pojazdów (w tym przypadku autobusów miejskiej komunikacji zbiorowej), odcinków międzyprzystankowych oraz przystanków. Dla elementów przyjętego modelu zaproponowano zbiór zmiennych opisowych:

• Pojazd

- Napełnienie pojazdu n [pas] - liczba pasażerów w pojeździe odjeżdżającym z przystanku, przyjmowana ze zbioru nieujemnych liczb całkowitych C_0^+ .
 - Liczba pasażerów wysiadających na przystanku l_{wy} [pas] - zmienna losowa z zakresu nieujemnych liczb całkowitych C_0^+ .
 - Pojemność nominalna autobusu N [pas], podawana przez producenta pojazdu – z zakresu dodatnich liczb całkowitych C^+ .
 - Maksymalna, rzeczywista pojemność autobusu N_{max} [pas] – ze zbioru dodatnich liczb całkowitych C^+ , $N_{max} > N$.
 - Maksymalna liczba strumieni wyjścia s_{wy} [str] - z zakresu dodatnich liczb całkowitych C^+ . Liczba strumieni wyjścia jest definiowana jako maksymalna liczba pasażerów mogąca jednocześnie znajdować się we wszystkich wyjściach pojazdu mogących brać udział w wymianie, przy założeniu że jeden pasażer zajmuje około 50 cm szerokości drzwi. W praktyce – drzwi pojazdu o szerokości mniejszej niż 1,0m można traktować jako jeden strumień, natomiast drzwi szersze niż 1,0m – jako dwa strumienie wyjścia.
 - Stopień napełnienia pojazdu podjeżdżającego na przystanek n_p [-], obliczany ze wzoru:

$$n_p = n / N.$$
 - Liczba pasażerów wysiadających, przypadająca na jeden strumień wyjścia l_{wyp} [pas/str], obliczana ze wzoru: $l_{wyp} = l_{wy} / s_{wy}$.
- #### • Odcinek międzyprzystankowy
- Długość odcinka l [km] – ze zbioru dodatnich liczb całkowitych C^+ .
 - Liczba skrzyżowań z sygnalizacją świetlną s_s [-] – liczba ze zbioru $\{0, 1, 2, 3, 4\}$.
 - Liczba skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej, na których pojazdy KZ nie mają pierwszeństwa ruchu s_z [-] – liczba ze zbioru $\{0, 1, 2, 3, 4\}$.

- Wydzielenie pasa ruchu dla komunikacji zbiorowej – rozkład dwupunktowy – ze zbioru {TAK, NIE}.
- Natężenie ruchu pojazdów w jednym kierunku q [poj/h] - z zakresu nieujemnych liczb całkowitych C_0^+ .
- Liczba pasów ruchu w jednym kierunku r - liczba ze zbioru {1, 2, 3}.
- Natężenie ruchu pojazdów w jednym kierunku na pojedynczym (nie wydzielonym) pasie obsługującym komunikację zbiorową q_r [poj/h] – liczba ze zbioru nieujemnych liczb całkowitych C_0^+ , proces zdeterminowany stacjonarny.
- Natężenie ruchu pojazdów na wydzielonym pasie dla komunikacji zbiorowej q_{kz} [poj/h] - z zakresu nieujemnych liczb całkowitych C_0^+ , proces zdeterminowany stacjonarny.

Przystanek

- Liczba stanowisk postojowych na przystanku s_p [-] - liczba ze zbioru {1, 2, 3}.
- Liczba pasażerów wsiadających na przystanku l_{ws} [pas] - zmienna losowa z zakresu nieujemnych liczb całkowitych.
- Maksymalna liczba strumieni wejścia s_{we} [str] - z zakresu dodatnich liczb całkowitych C^+ . Definicja liczby strumieni wejścia analogiczna jak w przypadku strumieni wyjścia.
- Liczba pasażerów wsiadających do pojazdu, przypadająca na jeden strumień wejścia l_{wsp} [pas/str], obliczana ze wzoru: $l_{wsp} = l_{ws} / s_{we}$.

3.3. Opis interakcji pomiędzy elementami modelu

Realizacja podstawowej funkcji komunikacji zbiorowej, polegającej na przewożeniu pasażerów, powoduje występowanie interakcji pomiędzy pojazdem a odcinkiem międzyprzystankowym oraz przystankiem. Interakcje uwzględnione w modelu to:

- Średni czas przejazdu odcinka międzyprzystankowego t_p [min] – z zakresu dodatnich liczb rzeczywistych R^+ . Czas przejazdu odcinka sieci można przedstawić jako funkcję regresji wielorakiej długości odcinka l [km], liczby skrzyżowań z sygnalizacją świetlną s_s [szt.] oraz liczby skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej, na których pojazdy KZ nie mają pierwszeństwa ruchu s_z [szt].

W wyniku badań własnych, na podstawie danych ze 111 odcinków międzyprzystankowych, uzyskano zależność: $t_p = 2,01 l_0 + 0,46 s_s + 0,84 s_z$ [min]

Model ten charakteryzuje się bardzo wysoką wartością skorygowanego współczynnika determinacji ($R^2=91,2\%$), co wskazuje na dobre dopasowanie modelu. Potwierdza to

wartość statystyki Durбина-Watsona, $DW=1,69$ - większa niż 1,4, świadcząca o braku korelacji pierwszego rzędu pomiędzy resztami.

- Rozrzut czasu przejazdu odcinka międzyprzystankowego ε_{tp} [min] – zmienna losowa z rozkładu Normalnego o zerowej wartości średniej.
- Czas tracony przez pojazd na oczekiwaniu na rozpoczęcie wymiany t_{to} [s] - z zakresu nieujemnych liczb rzeczywistych R_0^+ , zmienna losowa wg rozkładu empirycznego.
- Średni czas wymiany pasażerów na przystanku t_w [s] - z zakresu dodatnich liczb rzeczywistych R^+ , obliczany za pomocą regresji wielorakiej, jako zależność od stopnia napełnienia pojazdu podjeżdżającego na przystanek n_p [-] oraz zsumowanej liczby pasażerów wysiadających i wsiadających, przypadającej na jeden strumień wejścia/wyjścia $l_{wwp} = (l_{wy} + l_{ws}) / s$ [pas/str]. Model regresji wielorakiej, utworzony w wyniku analizy ze 141 przystanków przyjmuje postać: $t_w = 24,4 n_p + 4,43 l_{wwp}$ [s]. Zarówno wysoka wartość skorygowanego współczynnika determinacji ($R^2=95,7\%$), jak i wartość statystyki Durбина-Watsona, $DW=1,87$, potwierdzają dobre dopasowanie modelu.
- Rozrzut czasu wymiany ε_{tw} [min] – zmienna losowa z rozkładu Normalnego o zerowej wartości średniej.
- Występowanie sprzedaży biletów przez kierowcę - rozkład dwupunktowy ze zbioru {TAK, NIE}.
- Czas sprzedaży biletów przez kierowcę t_{sb} [s] – z zakresu nieujemnych liczb rzeczywistych R_0^+ , zmienna losowa opisana rozkładem empirycznym.
- Czas tracony przez pojazd na włączania się do ruchu t_{tr} [s] - z zakresu nieujemnych liczb rzeczywistych R_0^+ , zmienna losowa z rozkładu empirycznego.

Schemat blokowy opisujący proces poruszania się autobusu pomiędzy dwoma przystankami zwykłymi przedstawiono na rysunku 4. Natomiast rysunek 3 obrazuje poszczególne fazy procesu dla trzech przykładowych pojazdów. Przykładowy rzeczywisty przebieg procesu narastania zakłóceń punktualności pokazano na rysunku 1.

4. Wstęp do formalnego opisu przyjętego modelu symulacyjnego

Do formalnego opisu modelu symulacyjnego zaproponowano wykorzystanie modelu dynamicznego. W pierwszym przybliżeniu, jako opis układu przyjęto dyskretny stacjonarny układ liniowy przedstawiony zależnością:

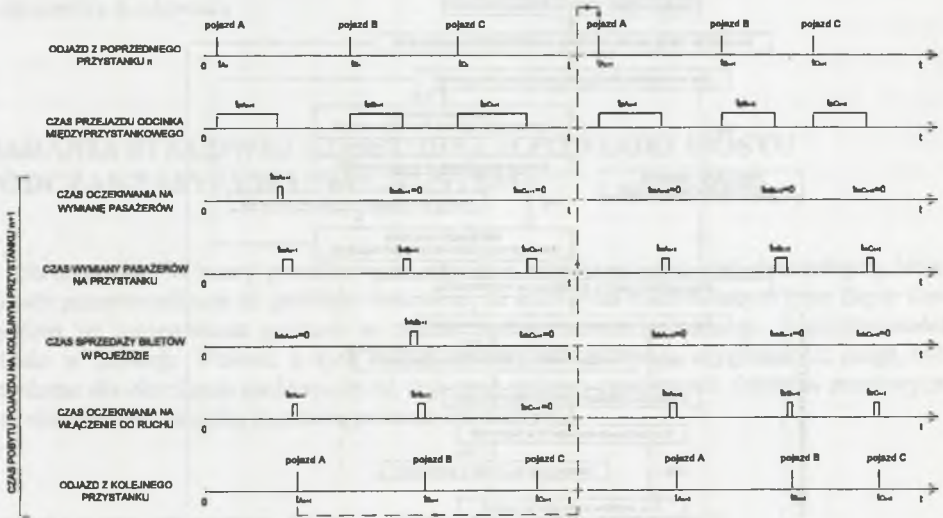
$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A} \mathbf{x}_k + \mathbf{B} \mathbf{u}_k \quad \mathbf{y}_k = \mathbf{C} \mathbf{x}_k + \mathbf{D} \mathbf{u}_k$$

\mathbf{x}_k – wektor stanu układu w chwili t , \mathbf{u}_k – m -wymiarowy wektor wymuszeń w chwili t ,

y_k – 1-wymiarowy wektor odpowiedzi w chwili t .

A, B, C, D – macierze o wymiarach, odpowiednio $n \times n, n \times m, l \times n, l \times m$ o elementach stałych.

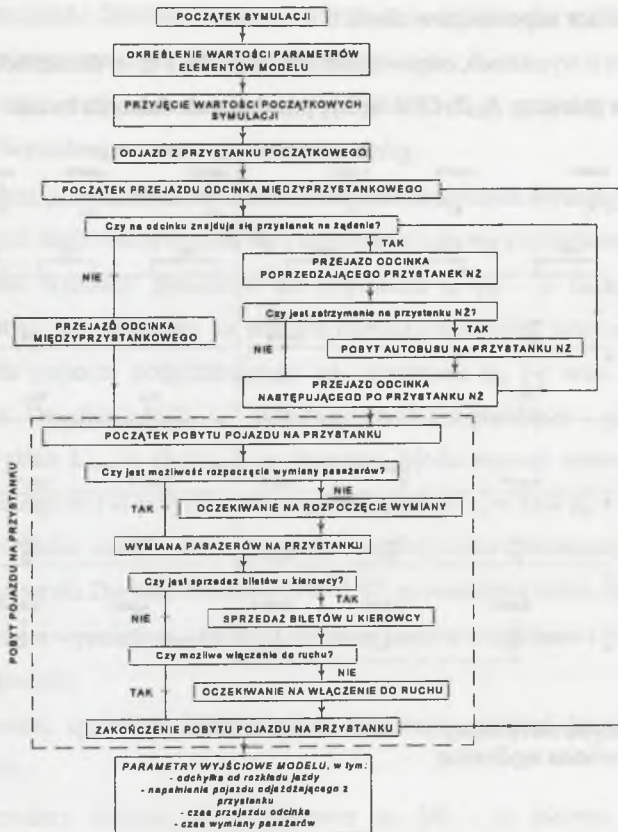
Estymacja elementów macierzy A, B, C, D będzie przedmiotem dalszych badań.



Rys. 3. Przykład wykorzystania symulacji
Fig. 3. Example of simulation application

5. Podsumowanie i wnioski dotyczące dalszych badań

- 1) Przejazd autobusu na linii jest realizacją procesu stochastycznego. Z założenia układ linii komunikacji zbiorowej jest układem stacjonarnym.
- 2) Model grafowy jest dobrym odwzorowaniem linii komunikacji zbiorowej, jako sekwencja modułów: odcinek międzyprzystankowy – przystanek.
- 3) Parametry modelu symulacyjnego punktualności autobusów komunikacji miejskiej zawierają zarówno składowe deterministyczne, jak i zmienne losowe.
- 4) Konieczne są dalsze badania parametrów rozkładów zmiennych losowych modelu, zwłaszcza na liniach o dużej liczbie przystanków.
- 5) W dalszych badaniach konieczne będzie utworzenie formalnej postaci opisu modelu, symulacja obsługi komunikacyjnej linii autobusowych i weryfikacja modelu.



Rys. 4. Schemat blokowy symulacji

Fig. 4. Block diagram of simulation

LITERATURA

1. Dobosz M.: Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań. Warszawa 2001.
2. Kaczorek T.: Teoria wielowymiarowych układów dynamicznych liniowych. Warszawa 1983.
3. Rudnicki A.: Jakość komunikacji miejskiej. Kraków 1999.
4. Zeigler B.P.: Theory of Modelling and Simulation. Toronto 1976.

Recenzent: Prof. dr inż. Wojciech Suchorzewski