

Adam MOLECKI

## POWIĄZANIA OGRANICZNIKÓW I GENERATORÓW INICJUJĄCYCH W SYMULACJACH RUCHU TRAMWAJOWEGO

**Streszczenie.** Artykuł omawia aspekty tworzenia symulacji ruchu tramwajowego. Przedstawiono między innymi wyniki analiz dotyczących rozkładów prawdopodobieństwa występowania czasów przejazdów przez odcinki ruchu swobodnego, czasów postojów na przystankach oraz opóźnień odjazdów z przystanków początkowych.

## CONNECTIONS BETWEEN TRAFFIC GENERATORS AND RESTRICTIONS IN TRAM TRAFFIC SIMULATORS

**Summary.** The article presents a tram simulations building method. There were presented inter alia results of time of passenger changes at stops, delays at beginning stop and passing free way track distributions analysis.

### 1. WPROWADZENIE

Tramwaj konwencjonalny stanowi jeden z najważniejszych środków publicznego transportu pasażerskiego w miastach Polski i Europy. Mimo budowy sieci transportowych o większych możliwościach przewozowych, takich jak metro czy szybki tramwaj, istniejące trasy tramwajowe nie tracą znaczenia. Łączą one stosunkowo wysoką zdolność przewozową, z dużą dostępnością i wygodą użytkowania dla pasażera.

W samej tylko Polsce funkcjonuje 14 sieci tramwajowych obejmujących łącznie 31 miast. Wykonywane jest na nich blisko 20% pracy przewozowej całej komunikacji miejskiej w Polsce [10, 13]. Narastająca kongestia ruchowa w miastach wymusza działania promujące środki transportu zbiorowego. Zwracają na to również uwagę twórcy polityki europejskiej [11]. Jedną z form promocji jest wdrażanie rozwiązań z zakresu inżynierii ruchu wspomagających płynny przejazd tramwajów (przejazd bez zatrzymań innych niż handlowe).

Punktualność jest jedną z najważniejszych dla pasażera cech transportu zbiorowego [5, 12]. W warunkach ruchu drogowego, w jakim prowadzona jest komunikacja tramwajowa, nawet gdy wykorzystuje wydzielone pasy, odchylenia od rozkładu jazdy nie są możliwe do całkowitego wyeliminowania. Punktualność jest tu wynikiem przepustowości układu i zapewnienia płynnego przejazdu, szczególnie przez skrzyżowania z innymi ciągami komunikacyjnymi. Przez płynność ruchu należy rozumieć miarę opisującą liczbę i długość postojów o charakterze innym niż handlowy. Bardzo istotne jest zatem, aby projektując infrastrukturę tramwajową i towarzyszącą nie tylko zapewniać możliwości przejazdu tramwaju, ale również zapewniać możliwie płynny ruch.

## 2. OCENA WPLYWU ROZWIĄZAŃ Z ZAKRESU INŻYNIERII RUCHU NA PŁYNNOŚĆ RUCHU TRAMWAJÓW

Identyfikacja czynników wpływających na przepustowość oraz płynność ruchu tramwajów pozwala na opracowanie metody służącej ocenie wpływu infrastruktury okołotramwajowej na funkcjonowanie linii tramwaju konwencjonalnego.

W szczególności badaniu poddaje się:

- identyfikację cech charakteryzujących trasy tramwaju konwencjonalnego, wpływających na pogorszenie płynności i przepustowości ruchu,
- określenie rozkładów prawdopodobieństwa występowania różnych czasów obsługi elementów infrastruktury tramwajowej.

Ze względu na fakt, że rozkłady prawdopodobieństw czasów przejazdu przez fragmenty tras nie w pełni wydzielone z ruchu innych pojazdów nie są wzajemnie niezależne, za najbardziej efektywne narzędzia określania płynności ruchu uznaje się metody symulacyjne Monte Carlo [14, 15]. Polegają one na wykonaniu szeregu mikrosymulacji przejazdu wszystkich przewidzianych rozkładowo pociągów tramwajowych przez odpowiednie fragmenty sieci. W takiej symulacji po zakończeniu przez pojazd obsługi jednego elementu infrastruktury kontrolowana jest możliwość rozpoczęcia obsługi kolejnego elementu – nie jest on zablokowany przez inny tramwaj. Jeżeli możliwość obsługi istnieje, przystępuje się do losowania czasu jej trwania według zadanego wcześniej rozkładu prawdopodobieństwa. Uśredniając wyniki czasów przejazdu i zatrzymań, uzyskane w wielu próbach, uzyskuje się prawdopodobny obraz rzeczywisty symulowanego zjawiska [6]. Badaniu może podlegać cała doba lub wybrany okres – np. pora szczytu.

Ze względów funkcjonalnych należy rozróżnić modelowanie:

- węzłów tramwajowych,
- skrzyżowań z trasami innych gałęzi transportu,
- przystanków,
- odcinków ruchu swobodnego oraz
- odcinków jednotorowych.

Do najważniejszych związków zachodzących pomiędzy poszczególnymi pociągami tramwajowymi zaliczono interakcje występujące na węzłach torowych. Wyróżnia się cztery rodzaje wzajemnych powiązań relacji:

- zabronione pierwszego rodzaju (odpowiedniki relacji sprzecznych w ruchu kolejowym) – wykorzystujących wspólny element infrastruktury (np. skrzyżowanie, rozjazd),
- zabronione drugiego rodzaju (gdy niekontrolowane przestawienie zwrotnicy mogłoby spowodować skierowanie dwóch pociągów tramwajowych na jeden element infrastruktury, a zatem zderzenie tramwajów),
- zabronione trzeciego rodzaju (gdy niekontrolowane przestawienie zwrotnicy mogłoby spowodować przekroczenie przez jeden pociąg tramwajowy skrajni drugiego pociągu tramwajowego),
- dopuszczone do jednoczesnego wykonywania.

Jak wspomniano wyżej, podstawą metody jest znajomość rozkładów występowania czasów obsługi poszczególnych elementów infrastruktury. Przeprowadzone analizy oparto na zapisach z urządzeń rejestrujących pracę pojazdów. Zawierały one szereg wielkości, związanych bezpośrednio z prowadzeniem ruchu i procesem handlowym, jak również wielkości technicznych związanych z chwilowym stanem pojazdu. Opracowano autorskie oprogramowanie służące selekcji danych ze względu na ich przydatność dla celów omawianej

pracy oraz dostosowaniem ich formatu do późniejszych analiz.

Następnie wyznaczono na ich podstawie rozkład prawdopodobieństwa występowania konkretnych odchyłeń odjazdów z przystanków początkowych od rozkładu jazdy [7], rozkłady prawdopodobieństw występowania konkretnych czasów wymiany pasażerów na przystankach w zależności od liczby pasażerów wsiadających i wysiadających [9] oraz rozkłady prawdopodobieństw występowania różnych czasów przejazdu odcinków swobodnych w zależności od długości tych odcinków [8].

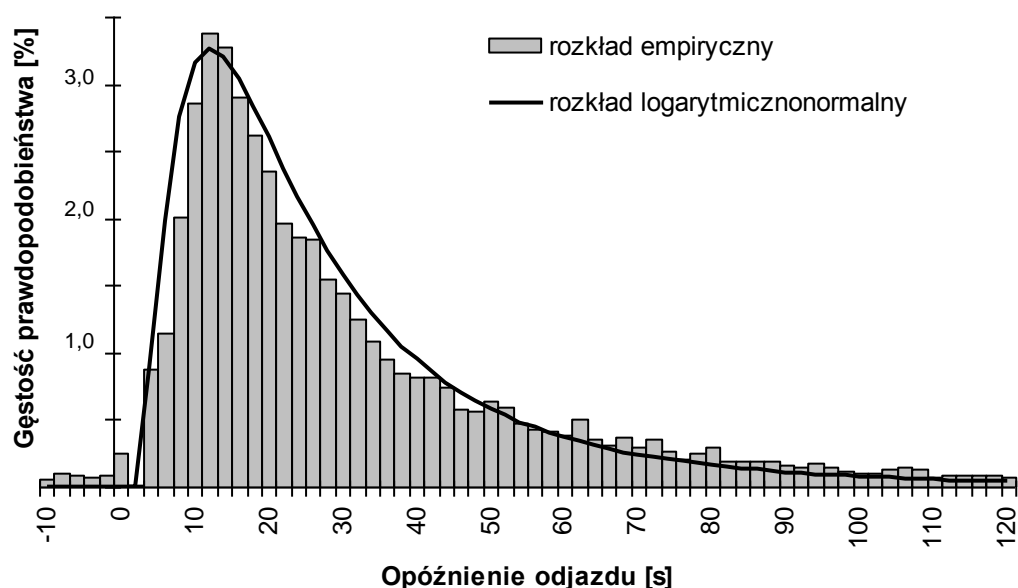
W przypadku opóźnień odjazdów z przystanku początkowego na podstawie próby empirycznej liczącej około 14,5 tys. zapisów za najbardziej zbliżony rozkład prawdopodobieństwa uznano rozkład logarytmiczno-normalny (rys. 1) o następujących parametrach:

$$f(t_o) = \frac{1}{2 \cdot t_o} \cdot e^{-\frac{(\ln(t_o) - 3)^2}{1,28}}, \quad [-] \quad (1)$$

gdzie:

$f(t_o)$  – funkcja gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia konkretnej wartości opóźnienia odjazdu z przystanku początkowego [-];

$t_o$  – wartość opóźnienia odjazdu z przystanku [s].



Rys. 1. Wykres gęstości prawdopodobieństwa w rozkładzie empirycznym wystąpienia konkretnego czasu opóźnienia odjazdu

Fig. 1. Density function of delay time at beginning stop distribution diagram

Czasy obsługi przystanków badano na podstawie próby empirycznej liczącej około 3,2 mln zapisów i za najbardziej zbliżony rozkład prawdopodobieństwa uznano rozkład logarytmiczno-normalny, którego parametry charakteryzowane są przez funkcje zależne od budowy pojazdu i liczby pasażerów wsiadających lub wysiadających na przystanku:

$$f(t_p) = \frac{1}{t_p \cdot \left( \frac{1}{2L_p + 2} + 0,18 \right) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln(t_p) - \ln(p \cdot L_p + q))^2}{2 \cdot \left( \frac{1}{2L_p + 2} + 0,18 \right)^2}}, \quad [-] \quad (2)$$

gdzie:

$f(t_o)$  – funkcja gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia konkretnej wartości czasu wymiany pasażerów [-];

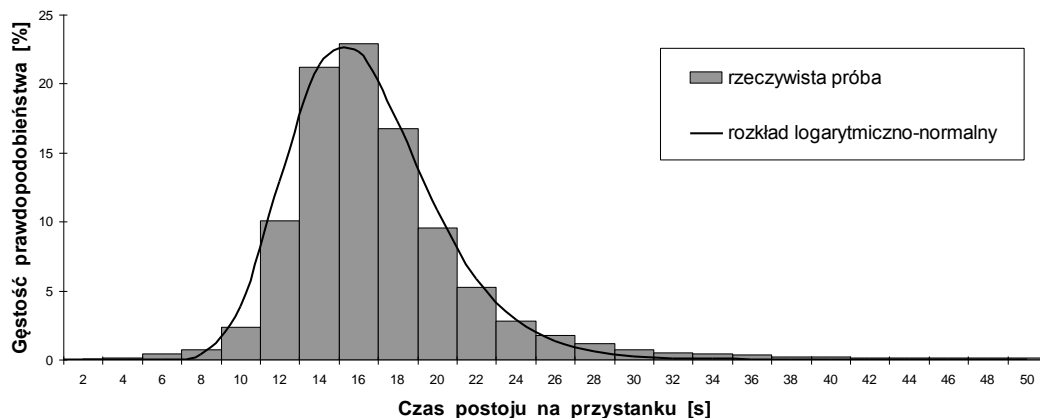
$t_p$  – czas wymiany pasażerów [s];

$L_p$  – liczba pasażerów korzystających z przystanku [-];

$p, q$  – parametr zależny od budowy pojazdu [-].

Analogiczne badania przeprowadzali również M. Bauer [2] i R. Bąk [4]. Przy tworzeniu modeli wykorzystywali oni odpowiednio rozkłady normalny i rozkład Gamma. Zaznaczali jednakże, że w ich ocenie korzystniejszy byłby rozkład logarytmiczno-normalny, lecz posiadane próby empiryczne były zbyt małe, by określić funkcje opisujące parametry tegoż rozkładu.

Na rysunku 2 przedstawiono wykres gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia konkretnego czasu postoju na przystanku przykładowo dla 10 osób wsiadających z pojazdu.



Rys. 2. Wykres gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia konkretnego czasu postoju na przystanku przy 10 osobach wsiadających lub wysiadających z pojazdu

Fig. 2. Density function of passenger changing time at stop distribution diagram

Rozkład czasów przejazdu przez odcinki ruchu swobodnego wyznaczono na podstawie próby empirycznej liczącej 261 tys. zapisów. Odnosząc się do rzeczywistej przejechanej długości (z dokładnością do 10 m) i czasu tej czynności uznano, że rozkład ten odpowiada również rozkładowi logarytmiczno-normalnemu:

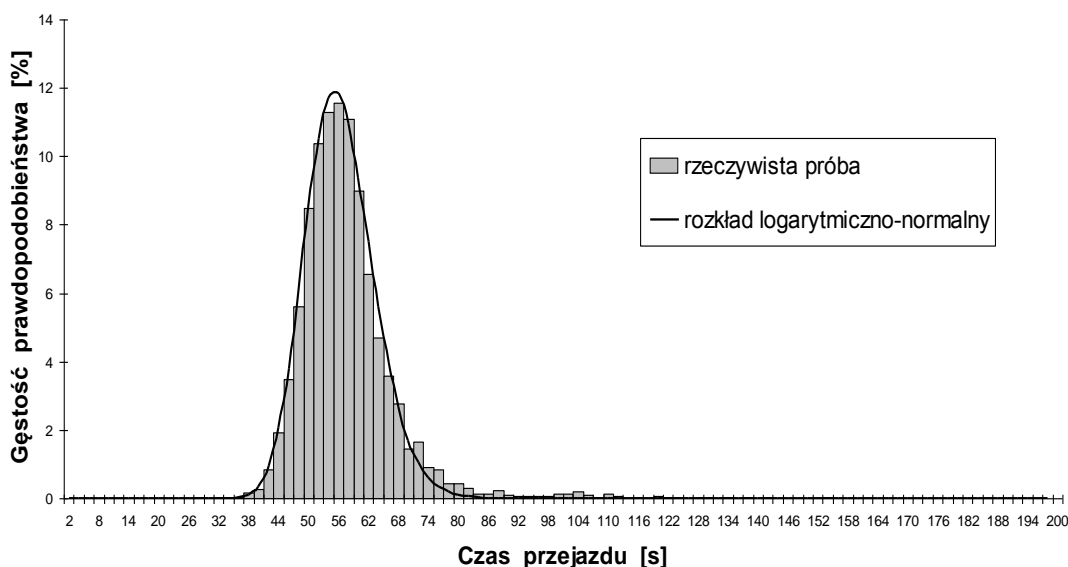
$$f(t_j) = \frac{10}{t_j \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln(t_j) - \ln(0,121s + 5,5))^2}{0,02}}, \quad [-] \quad (3)$$

gdzie:

$f(t_j)$  – funkcja gęstości prawdopodobieństwa występowania konkretnych wartości długości czasu przejazdu odcinka [-];

$s$  – długość odcinka ruchu swobodnego [m];  
 $t_j$  – czas przejazdu odcinka [s].

Na rysunku 3 zaprezentowano wykres gęstości prawdopodobieństwa czasu przejazdu przez odcinek ruchu swobodnego dla przykładowego przedziału długości tegoż odcinka 460-469 m. Podobne badania (dotyczące jednakże komunikacji autobusowej) przeprowadzał M. Bauer w Krakowie na pasach wydzielonych z ruchu pojazdów [1, 3]. W modelowaniu wykorzystywał on jednak rozkład normalny.



Rys. 3. Wykres gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia konkretnego czasu przejazdu odcinka ruchu swobodnego długości 460-469 m

Fig. 3. Density function of passing the freeway track time distribution diagram (example for length 460-469 m)

Poszczególne elementy oddzielone są buforami, w których następuje kontrola możliwości zajęcia kolejnego elementu sieci przez nadjeżdżający tramwaj. Informacja o liczbie przejazdów wymagających zatrzymania w buforze odniesiona do ogólnej liczby przejazdów świadczy o poziomie zapewnienia płynności ruchu. Odnotowuje się przy tym również długość czasu przebywania w buforze.

### 3. PODSUMOWANIE

Wyniki pracy mogą służyć w pracach projektowych przy modernizacji i budowie nowych tras tramwajowych. Posługiwanie się przedstawionymi metodami pozwala na ograniczenie kosztów związanych z dostosowywaniem sieci komunikacyjnej do wymogów jakościowych stawianych przez pasażerów poprzez przeprowadzanie analiz porównawczych skutków wdrażania różnych wariantów organizacji ruchu. Pozwala tym samym na minimalizację ryzyka związanego z wprowadzeniem nieefektywnego rozwiązania.

Wykorzystanie przedstawionej w pracy metody oceny wpływów infrastrukturalnych na przepustowość i płynność ruchu tramwaju konwencjonalnego pozwala również na ocenę zmian w zakresie układu linii tramwajowych, synchronizacji rozkładów jazdy, decyzji dyspozytorskich.

## Bibliografia

1. Bauer M.: Analiza funkcjonowania wydzielonych pasów autobusowych i wspólnych przekrojów tramwajowo-autobusowych, VI konferencja naukowo-techniczna „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Wspomaganie decyzji w projektowaniu i zarządzaniu transportem, Poznań 23-25 maja 2007.
2. Bauer M.: Modelowanie czasu wymiany pasażerów na przystankach autobusowych, Transport Miejski i Regionalny, Nr 04, 2008.
3. Bauer M., Szałkowski M.: Identyfikacja zakłóceń funkcjonowania komunikacji autobusowej na przykładzie linii nr 115 w Krakowie, Transport Miejski i Regionalny, Nr 10, 2005.
4. Bąk R.: Identyfikacja procesów ruchu związanych z funkcjonowaniem przystanku autobusowego, Transport Miejski i Regionalny, Nr 02, 2008.
5. Bryniarska Z.: Punktualność pojazdów komunikacji tramwajowej w wybranych miastach, V konferencja naukowo-techniczna „Systemy transportowe – teoria i praktyka”, Katowice, 2008
6. Demidovich B. P., Maron I. A.: Osnovy vychyslitelnoj matematiki, Wydawnictwo »Nauka«, Moskwa 1970.
7. Molecki A.: A punctuality of tram depart from begining stop, Transport Problems, Vol. 3, Issue 3, Gliwice 2008.
8. Molecki A.: Określanie rozkładu czasu przejazdu odcinka swobodnego trasy tramwaju konwencjonalnego, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 61, Gliwice 2007.
9. Molecki A., Sobota A.: Zależność czasu wymiany pasażerów autobusu od liczby pasażerów korzystających z przystanku, Autobusy, Nr 5, 2008.
10. Rocznik statystyczny Polski 2007, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2008.
11. Starowicz W.: Założenia europejskiej Zielonej księgi dla transportu publicznego, TTS – technika transportu szynowego, Nr 5-6, 2007.
12. Starowicz W., Ciastoń A.: Punktualność kursowania pojazdów w ocenie mieszkańców różnych miast Polski, Transport Miejski i Regionalny, Nr 6, 2006.
13. Transport – wyniki działalności w 2007 r., Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2008.
14. Węgiński J.: Metody probabilistyczne w projektowaniu transportu szynowego, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1971.
15. Woch J.: Kształtowanie płynności ruchu w gęstych sieciach transportowych, Wydawnictwo Szumacher, Kielce 1998.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Romuald Szopa

*Praca wykonana w ramach BW-514/RT5/2008*