

Adam MOLECKI

## WYKORZYSTANIE ROZKŁADU LOGARYTMICZNONORMALNEGO DO MODELOWANIA CZASU WYMIANY PASAŻERÓW

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych w autobusach Przedsiębiorstwa Komunikacji Miejskiej w Sosnowcu, a dotyczących zależności czasu wymiany pasażerów od liczby osób korzystających z przystanku. Duża próba empiryczna poddana analizie pozwoliła na kalibrację modelu opartego na rozkładzie logarytmicznonormalnym.

## THE USAGE OF LOGNORMAL DISTRIBUTION TO SIMULATE TIME OF PASSENGER EXCHANGE

**Summary.** The article presents the effects of researches, which have been done in buses of Municipal Transport Enterprise in Sosnowiec (Przedsiębiorstwo Komunikacji Miejskiej w Sosnowcu). They have been related to number of persons, who were using bus-stop, dependence to passengers exchange time. Huge empirical sample, which was analyzed let model to calibration. The model based on log-normal distribution.

### 1. WPROWADZENIE

Czas wymiany pasażerów na przystankach zależy od wielu czynników. Można je podzielić na kilka grup:

- związane z budową pojazdu,
- związane ze stopniem zatłoczenia pojazdu,
- związane z organizacją procesu wsiadania i wysiadania,
- związane z organizacją poboru opłat,
- związane z budową i wyposażeniem przystanku,
- związane z organizacją informacji pasażerskiej,
- związane z realizacją rozkładu jazdy.

Wśród cech związanych z budową pojazdu najważniejsze są: liczba, szerokość i rozłożenie drzwi, liczba stopni przy wyjściu. Przy większych napelnieniach (praktycznie już przy poziomie komfortu jazdy C, czyli podczas zajmowania pojedynczych miejsc stojących, [17]) ujawnia się znaczenie takich cech, jak: zróżnicowanie poziomu podłogi (nachylenia, dodatkowe progi, podesty pod miejscami siedzącymi), rozłożenie miejsc siedzących (swoboda wstawania, poruszania się po pojeździe).

Dodatkowe zróżnicowanie czasu wymiany pasażerów na konkretnym przystanku może wynikać z niedoskonałego rozłożenia kursów w czasie [7] czy szerzej – synchronizacji [15]. Znaczne zróżnicowanie długości interwałów międzykursowych na ciągach komunikacyjnych może spowodować, że część pojazdów będzie przepelnionych, podczas gdy inne niedociążone.

Bardzo istotny jest fakt wprowadzenia zasady wsiadania pierwszymi, a wysiadania pozostałymi drzwiami [11]. W Polsce stosuje się go zasadniczo wyłącznie w wybranych liniach autobusowych. Nie można wykluczyć jednakże takiej obsługi w innych środkach transportu. Znaczenie ma również wprowadzenie indywidualnego otwierania drzwi za pomocą przycisków w przestrzeni pasażerskiej [12].

Wprowadzenie przedsprzedaży biletów komunikacji miejskiej miało na celu ograniczenie zatrudnienia na stanowiskach konduktorów. Spowodowało jednocześnie, że konieczne stało się dopuszczenie sprzedaży biletów przez kierującego pojazdem. Nawet w przypadku jednej osoby wyrażającej zamiar kupna biletu postój na przystanku może się wydłużyć o kilkanaście sekund.

Czas wymiany pasażerów uzależnony jest również od dostosowania poziomu platformy przystankowej do potrzeb osób wsiadających i wysiadających. Szczególnie niekorzystne jest wysiadanie na przystanku bez utwardzonej nawierzchni bądź wydzielonej platformy z jezdni.

Pozornie mały wpływ ma kwestia informacji pasażerskiej. Jednakże tylko wyczerpująca informacja zapewnia płynność i sprawność procesu wymiany pasażerów. Dotyczy to zarówno informowania jadących pojazdem o nazwie zbliżającego się przystanku [13], możliwych przesiadkach, jak i informowania oczekujących na przystanku o obowiązującym rozkładzie jazdy, trasie przejazdu pojazdu, obowiązujących objazdach. Niedoinformowany pasażer, szczególnie nieznający terenu, po którym się porusza, ma znacznie dłuższy czas podejmowania decyzji o wejściu do pojazdu bądź wyjściu z niego. W wielu przypadkach, poza typową informacją przystankową, ważna jest również możliwość zaplanowania całej podróży z wyprzedzeniem (np. przy wykorzystaniu infolinii i internetu [4]).

Jeśli występują opóźnienia względem rozkładu jazdy, czas wymiany skraca się w przypadku trasy obsługiwanej z niewielką częstotliwością (mniej niż 4 kursy na godzinę), gdyż kierujący dyscyplinują siebie i pasażerów. Odmienna sytuacja występuje na trasach obsługiwanych z dużą częstotliwością kursowania (8 razy na godzinę i częściej), gdyż pasażerowie przychodzą na przystanek przypadkowo, nie zwracając uwagi na rozkład jazdy [5]. Wpływ dyscyplinowania jest mniejszy niż zwiększonego obciążenia pojazdu i zwiększonej wymiany pasażerskiej.

Ponadto, czas ten jest różnicowany przez samych podróżnych, ich cechy psychomotoryczne, zdyscyplinowanie i kulturę.

## **2. PRZEGLĄD STOSOWANYCH METOD MODELOWANIA CZASU POSTOJU NA PRZYSTANKACH POŚREDNICH**

Próby modelowania czasu zajętości przystanków przez tramwaje, autobusy i inne środki komunikacji podejmowano wielokrotnie. Prace prowadzone w latach sześćdziesiątych doprowadziły do wykreślenia szeregu charakterystyk dotyczących tramwajów [3]. Były to charakterystyki złożone, odnoszące się do różnych natężeń ruchu tramwajów dla przystanków pojedynczych i podwójnych. Były one oparte na teorii kolejek. Przy założonych natężeniach

ruchu i średnich czasach obsługi przystanku pozwalały szacować, ile tramwajów nie będzie obsługiwało przystanku bezpośrednio po dojeździe do niego – będzie musiało oczekiwać, aż przystanek zostanie zwolniony przez inne tramwaje. Podejście to miało jednakże pewne wady, do których przede wszystkim zaliczało się ignorowanie otoczenia przystanku. Założone teoretyczne rozkłady gęstości zgłoszeń tramwajów nie uwzględniały czynników determinujących w postaci zadanych rozkładów jazdy czy pobliskich instalacji sygnalizacji świetlnej.

Jak wspomniano wcześniej, czas wymiany pasażerów na przystankach jest bardzo silnie uzależniony od budowy pojazdu. Sprawia to, że niecelowe jest ściśle określenie rozkładów prawdopodobieństwa czasów zajęcia przystanku.

Celowe jest natomiast określenie podstawowych charakterystyk na podstawie badań wielkoseryjnych, które można by w miarę potrzeb kalibrować przy użyciu mniejszych populacji – mniej kosztownych analiz z niewielką próbką statystyczną. Prace takie podjęło kilka ośrodków głównie w odniesieniu do komunikacji autobusowej. Bąk proponuje do modelowania czasu użyć rozkładu Gamma – gęstość prawdopodobieństwa przedstawia wzór (1). Zaznacza przy tym, że uważa za właściwszy rozkład logarytmicznonormalny, ale występujące problemy z kalibracją modelu uniemożliwiły mu jego budowę [2].

$$f(t_p) = \frac{t_p^{k-1} \cdot k^k}{t_p \cdot \Gamma(k)} \cdot e^{-\frac{k \cdot t_p}{\bar{t}_p}} \quad (1)$$

gdzie:  $t_p$  – czas wymiany pasażerów [s],

$k$  – parametr zależny od konstrukcji autobusu (przyjmuje wartości 4÷11; zwykle 6),

$\bar{t}_p$  – parametr rozkładu zależny od liczby pasażerów korzystających z przystanku.

Bauer podjął próbę wykorzystania rozkładu normalnego – gęstość prawdopodobieństwa przedstawia wzór (2), przy czym wynik uznaje za możliwy do wykorzystania, choć nie w pełni satysfakcjonujący [1].

$$f(t_p) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t_p - \bar{t}_p)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

gdzie:  $t_p$  – czas wymiany pasażerów [s],

$\bar{t}_p, \sigma$  – parametry rozkładu zależne od liczby pasażerów korzystających z przystanku.

Autor, dysponując zapisami z 3,2 mln obsłużonych przystanków odnoszących się do dwóch typów autobusów (rys. 1), dokonał kalibracji modelu opartego na rozkładzie logarytmicznonormalnym (wzór 3). Zależność parametru  $\bar{t}_p$  rozkładu od wielkości wymiany pasażerów estymowano za pomocą funkcji liniowej (wzór (4), rys. 2), a parametru  $\sigma$  – złożenia funkcji stałej i odwrotnie proporcjonalnej (wzór (5), rys. 3). Ostatecznie rozkład czasu wymiany pasażerów w funkcji wielkości tej wymiany opisano wzorem (6).

$$f(t_p) = \frac{1}{t_p \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln(t_p) - \ln(\bar{t}_p))^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{1}{2 \cdot L_p + 2} + 0,18 \quad (4)$$

$$\bar{t}_p = a \cdot L_p + b \quad (5)$$

$$f(t_p) = \frac{1}{t_p \cdot \left( \frac{1}{2L_p + 2} + 0,18 \right) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln(t_p) - \ln(a \cdot L_p + b))^2}{2 \cdot \left( \frac{1}{2L_p + 2} + 0,18 \right)^2}} \quad (6)$$

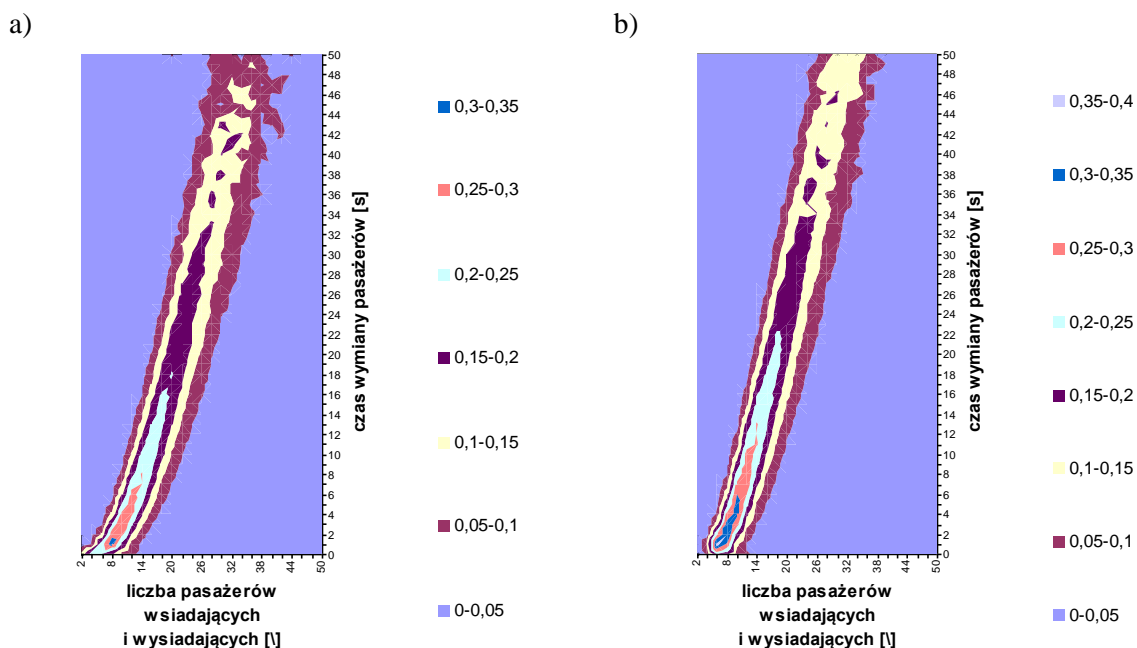
gdzie:  $t_p$  – czas wymiany pasażerów [s],

$\bar{t}_p, \sigma$  – parametry rozkładu zależne od liczby pasażerów korzystających z przystanku,

$L_p$  – liczba pasażerów korzystająca z przystanku,

$a$  – parametr zależny od budowy pojazdu (Jelcz M121M: 0,622; Solaris Urbino 15: 0,532),

$b$  – parametr zależny od budowy pojazdu (Jelcz M121M: 8,07; Solaris Urbino 15: 6,76).



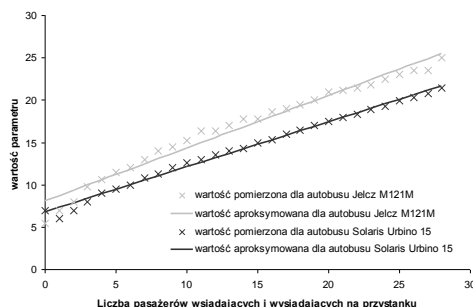
Rys. 1. Wykres gęstości prawdopodobieństwa w rozkładzie empirycznym wystąpienia konkretnego czasu obsługi dla określonej liczby pasażerów wsiadających i wysiadających na przystanku: a) Jelcz M121M, b) Solaris Urbino 15

Fig. 1. Diagram of density function in empirical distribution of passenger exchange time in dependence of number of persons which were getting in or out at the stop: a) Jelcz M121M, b) Solaris Urbino 15

Dodatkowo, w pracy [14] przedstawione zostały zależności wielkości charakterystycznych – kwantyli 0,2 i 0,9 rozkładów czasów wymiany pasażerów przydatnych podczas projektowania urządzeń otaczających przystanki (np. instalacje sygnalizacji świetlnej [9]).

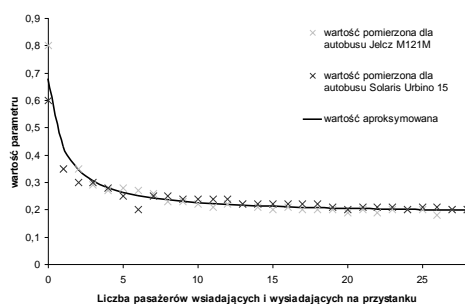
Niezależnie od zmian budowy pojazdu spodziewane różnice odnoszące się do zależności parametru  $\sigma$  od liczby osób wsiadających i wysiadających na przystanku, będą na tyle nieznaczące dla końcowego modelu, że można uznać ją za niezależną od tejże budowy. Znaczące różnice wartości tegoż parametru dotyczą sytuacji, gdy z przystanku korzysta 0÷3 pasażerów. Przy większej wymianie pasażerów parametr ten się stabilizuje na poziomie 0,2. Należy przy tym pamiętać, że w symulacjach ruchu tramwajów, wykorzystywanych do celów określania przepustowości, dokładność wyższa niż jednosekundowa jest niecelowa.

Oznacza to, że kalibracja modelu dla jakiegokolwiek pojazdu komunikacji miejskiej może ograniczać się do wyznaczenia liniowej zależności parametru  $\overline{t_p}$  od liczby pasażerów korzystających z przystanku, co jest badaniem prostym i nie wymaga analiz prób wielkoseryjnych.



Rys. 2. Funkcja opisująca zależność parametru  $\overline{t_p}$  rozkładu logarytmicznonormalnego występowania czasu obsługi dla określonej liczby pasażerów wsiadających i wysiadających na przystanku

Fig. 2.  $\overline{t_p}$  parameter of log-normal distribution of passenger exchange time dependence of number of persons which were getting in or out at the stop



Rys. 3. Funkcja opisująca zależność parametru  $\sigma$  rozkładu logarytmicznonormalnego występowania czasu obsługi dla określonej liczby pasażerów wsiadających i wysiadających na przystanku

Fig. 3.  $\sigma$  parameter of log-normal distribution of passenger exchange time dependence of number of persons which were getting in or out at the stop

### 3. WPLYW ZASADY WSIADANIA PIERWSZYMI DRZWIAMI NA CZAS WYMIANY PASAŻERÓW

W artykule [11] opisano wpływ wprowadzenia zasady wsiadania pierwszymi drzwiami do pojazdu, służącej zwiększeniu skuteczności kontroli biletowej przez wprowadzenie wstępnej kontroli przez kierowcę. Zasada ta jest korzystna (skraca czas wymiany pasażerów), gdy w wymianie pasażerów dominującą rolę mają osoby wysiadające, gdyż osoby oczekujące na możliwość zajęcia miejsca w pojeździe nie utrudniają wychodzenia. Gdy na przystanku wsiadają więcej niż 3 osoby, zasada prowadzi do znaczącego wydłużenia czasu postoju na przystanku. Zasada prowadzi nie tylko do zwiększenia średniego czasu wymiany pasażerów, ale, co istotniejsze, drastycznie zwiększa

się rozrzut w rozkładzie tego czasu. W tym przypadku istnieje wysokie prawdopodobieństwo, że i charakterystyka parametru  $\sigma$  powinna być wyznaczana dla każdego pojazdu i sposobu obsługi osobno. Nie można wykluczyć, że w przypadku tramwajów kontrolę, oprócz motorniczego, prowadziłby jeden lub kilku konduktorów. Zróżnicowana może być również liczba drzwi, które przeznaczone byłyby do wsiadania i wysiadania, podczas gdy badaniu poddano jedynie przypadek udostępnienia pasażerom wsiadającym drzwi pierwszych, a wysiadającym drugich i trzecich. Oznacza to, że, oprócz zasygnalizowania zagrożenia regularności kursowania przez wprowadzenie omawianej zasady, wyniki badania nie mogą być rozszerzone na inne pojazdy.

#### **4. WPŁYW OTOCZENIA PRZYSTANKU I SPECJALNYCH PROCEDUR OBSŁUGI PRZYSTANKÓW**

W otoczeniu przystanku występują różnego rodzaju elementy infrastruktury powodujące wydłużenie czasu wymiany pasażerów. Podczas symulowania czasu postoju nie trzeba ich jednak brać pod uwagę i dostosowywać specjalnie formuł modelujących rozkład czasu wymiany pasażerów. Zasadnicza część wymiany pasażerów odbywa się bowiem w czasie przewidzianym standardowymi formułami. Wydłużony postój ma miejsce niezależnie od tego, czy drzwi są otwarte, czy nie i czy na przystanek doszedł spóźniony pasażer, czy nie. Należy założyć, że na chwilę przed ustaniem przyczyny zmuszającej do postoju kierujący zamknie drzwi i przygotowuje pojazd do odjazdu.

Stąd, po czasie zamodelowanym z przeznaczeniem na wymianę pasażerów należy przejść do procedury kontroli możliwości kontynuacji jazdy. Jeśli występują przyczyny uniemożliwiające jazdę (zamknięty przejazd kolejowy, sygnał zabraniający wjazdu na skrzyżowanie itp.), należy kontrolować wyłącznie ten fakt dokładnie, tak jakby pojazd stał poza przystankiem. Jedyna różnica wynika z faktu, iż dopóki nie opuści przystanku, nie może go obsłużyć inny pojazd.

Specyficzne procedury obsługi przystanków wymuszają również rozszerzenie algorytmów modelowania czasu postoju na przystanku. Przykładem mogą być przystanki podwójne. W pierwszym kroku procedury po zgłoszeniu tramwaju (po zamodelowanym dojeździe tramwaju do przystanku) sprawdza się zajętość stanowisk przystankowych. Jeśli zajęte jest stanowisko drugie, pojazd musi oczekiwać na jego zwolnienie niezależnie od zajętości stanowiska pierwszego. Jeśli zajęte jest tylko stanowisko pierwsze, pojazd może zająć stanowisko drugie i rozpocząć wymianę pasażerów. Jeśli nie jest zajęte żadne stanowisko, przystanek w obsłudze nie różni się od jednostanowiskowego. Procedury takie zostały zastosowane podczas symulowania korzyści z wprowadzenia przystanków podwójnych na Centralnym Węźle Komunikacyjnym w Sosnowcu [10].

Algorytm wykorzystywany w przypadku modelowania zatrzymania na drugim stanowisku przystanku podwójnego jest analogiczny do modelowania postoju na przystanku otoczonym innymi przeszkodami. Po zakończeniu wymiany pasażerów kontroluje się, czy pojazd ze stanowiska pierwszego już odjechał – dopiero to zdarzenie pozwala na opuszczenie drugiego stanowiska przystankowego.

Nietypowym elementem modelowania są powiązane przystanki autobusowo-tramwajowe. Niezależnie od tego, czy autobusy i tramwaje korzystają z jednego pasa ruchu – jeśli korzystają ze wspólnej krawędzi przystankowej i gdy mają wyznaczone miejsce zatrzymania na tej samej wysokości, należy uznać, że niemożliwa jest jednoczesna obsługa przystanku. Należy więc zasymulować pojawianie się obu rodzajów pojazdów na przystanku. Symulacja może mieć charakter punktowy – autobus lub tramwaj może pojawiać tylko na

przystanku nie uczestnicząc (nie utrudniając ruchu) w innych fazach przejazdu. Może również mieć charakter typowy dla symulowania innych tramwajów w przypadku pasów autobusowo-tramwajowych.

Szczególną sytuacją jest konieczność zamodelowania przystanku wyłącznie autobusowego w symulacji ruchu tramwajów. Ma to miejsce, gdy autobusy, obsługując swój przystanek, wjeżdżają na torowisko lub gdy torowisko służy jako autobusowa platforma przystankowa. Jeśli autobus zatrzymał się na przystanku, dojeżdżający tramwaj również musi się zatrzymać analogicznie do obowiązującego zatrzymania samochodów podczas postoju tramwaju na przystanku niewydzielonym z jezdni. Dotyczy to również tramwajów pospiesznych, których przejazd mogą ewentualnie blokować tramwaje zatrzymujące się na każdym przystanku.

W przypadku przystanków na żądanie algorytm należy dodatkowo wzbogacić o procedurę kontroli potrzeby zatrzymania. Różnica czasu przejazdu obok przystanku nieobsłużonego, nawet wobec najkrótszego postoju, jest znacząca, a zazwyczaj udział takich operacji jest duży [6]. Jeśli status przystanku jest zmienny [8], należy kontrolować, czy modelowany kurs ma planowy lub rzeczywisty przejazd przez przystanek w czasie obowiązywania statusu większej dostępności. Jeśli choć jeden z tych warunków jest spełniony, należy przejazd symulować jak dla statusu o większej dostępności (tabl. 1).

Tablica 1

Sposób modelowania przystanku o zmiennym statusie

		Status przystanku w porze planowego przejazdu		
		stały	na żądanie	nieczynny
Status przystanku w porze rzeczywistego przejazdu	stały	stały	stały	stały
	na żądanie	stały	na żądanie	na żądanie
	nieczynny	stały	na żądanie	nieczynny

W niektórych sieciach komunikacyjnych stosuje się tzw. miejsca gwarantowanych przesiadek. Znajdują one zastosowanie i uznanie społeczne w miejscach lub porach, w których kursowanie środków komunikacyjnych jest rzadkie. W takich przypadkach wydłużony postój na przystanku nie spotyka się ze sprzeciwem pasażerów, gdyż ważniejsza jest pewność dotarcia na miejsce przeznaczenia bez względu na liczbę przesiadek. Przykładem zastosowania takiego systemu jest centralny plac w Plauen (Republika Federalna Niemiec), gdzie spotykają się tramwaje wszystkich 5 linii i rozjeżdżają się dopiero po dokonaniu wszystkich przesiadek.

W Górnośląskim Okręgu Przemysłowym przesiadki gwarantowane dotyczyły tramwajowych pociągów nocnych. Dopóki na przystanku nie pojawił się tramwaj, z którego pasażerowie mogli mieć potrzebę przesiadki, tramwaj, który dojechał pierwszy, nie miał prawa odjechać [16].

Wiąże się to również z koniecznością zapisu takich warunków w symulacji ruchowej.

## 5. PODSUMOWANIE

Jednym z najważniejszych elementów symulacji ruchu pojazdów komunikacji miejskiej jest modelowanie czasu wymiany pasażerów na przystanku. Szczególnie istotną rolę pełni ono w przypadku sztywnotorowych środków transportu, czyli takich, które nie

pozwalają na wymijanie i wyprzedzanie się wzajemne pojazdów. Wśród typowych środków komunikacji miejskiej do sztywnotorowych zalicza się tramwaje i trolejbusy.

Przedstawione analizy zajętości przystanków wspomagają ocenę płynności ruchu pojazdów, punktualności kursowania, a więc jednej z podstawowych wielkości charakteryzujących jakość komunikacji miejskiej.

## Bibliografia

1. Bauer M.: Modelowanie czasu wymiany pasażerów na przystankach autobusowych. *Transport Miejski i Regionalny*, Nr 4, Kraków 2008.
2. Bąk R.: Identyfikacja procesów ruchu związanych z funkcjonowaniem przystanku autobusowego. *Transport Miejski i Regionalny*, Nr 2, Kraków 2008.
3. Beck H.: Kriterien zur Kennzeichnung der Betriebsgüte und der praktischen Leistungsfähigkeit von Strassenbahnnetzen. *Fortschritt – Berichte VDI – Zeitschrift*, Nr 5, Düsseldorf 1965.
4. Bojda K., Molecki B.: Internetowa informacja pasażerska. *Transport Miejski i Regionalny*, Nr 6, Kraków 2008.
5. Eilmes H.: Beitrag zur Gestaltung und Bemessung von Fussgängerkehrsanlagen bei Haltestellen des schienengebundenen Nahverkehrs (pr. dokt.). Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List”, Dresden 1975.
6. Molecki A.: Analiza wykorzystania przystanków sieci tramwajowej Zagłębia Dąbrowskiego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport*, Nr 57, Gliwice 2005.
7. Molecki A.: Propozycja wskaźnika obrazującego dostępność komunikacyjną jako miernik jakości obsługi mieszkańców. *Transport Miejski i Regionalny*, Nr 6, Kraków 2008.
8. Molecki A.: Przystanki o zmiennym statusie w komunikacji tramwajowej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport*, Nr 58, Gliwice 2005.
9. Molecki A.: Wpływ czasu wymiany pasażerów na przystankach na płynność ruchu tramwajowego. *Transport Miejski i Regionalny*, Nr 11, Kraków 2005.
10. Molecki A.: Wpływ ograniczeń zewnętrznych na przepustowość przystanku. *TTS – technika transportu szynowego*, Nr 9, Łódź 2007.
11. Molecki A.: Wpływ wprowadzenia zasady wsiadania pierwszymi drzwiami na przepustowość przystanku. „Autobusy”, Nr 7-8, Radom 2008.
12. Molecki A.: Wykorzystanie przycisków dla pasażerów w komunikacji autobusowej. „Autobusy”, Nr 10, Radom 2007.
13. Molecki A., Molecki B.: Nazewnictwo przystanków w miejskim transporcie zbiorowym. *Transport Miejski i Regionalny*, Nr 5, Kraków 2006.
14. Molecki A., Sobota A.: Zależność czasu wymiany pasażerów autobusu od liczby pasażerów korzystających z przystanku. „Autobusy”, Nr 5, Radom 2008.
15. Molecki B.: Synchronizacja rozkładów jazdy w transporcie miejskim. Sekcja Naukowa Klubu Miłośników Transportu Miejskiego, Chorzów Batory 2003.
16. Molecki B., Mazur B.: Organizacja nocnej komunikacji zbiorowej na przykładach miast śląskich. *Transport Miejski i Regionalny*, Nr 10, Kraków 2003.
17. Rudnicki A.: Jakość komunikacji miejskiej. SITK, Kraków 1999.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Romuald Szopa