

ARKADIUSZ DRABICKI

mgr inż., Katedra Systemów
Transportowych, Wydział Inżynierii
Łądowej, Politechnika Krakowska
ul. Warszawska 24,
31-155 Kraków, e-mail:
arkadiusz.drabicki@pk.edu.pl

MODELOWANIE ODDZIAŁYWANIA INFORMACJI W CZASIE RZECZYWISTYM O NAPEŁNIENIU PASAŻERSKIM W SIECIACH MIEJSKIEGO TRANSPORTU ZBIOROWEGO¹

Streszczenie: Zatłoczenie pasażerskie jest istotnym i powracającym problemem w systemach miejskiego transportu zbiorowego. Wśród rozwiązań ograniczających jego negatywne skutki coraz większego potencjału upatruje się w nowatorskich systemach informacji o napelnieniu (zatłoczeniu) pasażerskim, dostarczanej w czasie rzeczywistym (z ang. RTCI – *real-time crowding information*). Dostęp do takiej informacji pozwalałby pasażerom wybierać opcje podróży o wyższym komforcie i unikać nadmiernego zatłoczenia w autobusach, tramwajach czy pociągach. Obecny stan wiedzy nie pozwala jednak w pełni zrozumieć, jakie są potencjalne efekty i skuteczność systemów RTCI. Niniejszy artykuł dotyczy analiz wpływu informacji RTCI na proces decyzyjny pasażera i funkcjonowanie systemu miejskiego transportu zbiorowego. W pierwszej części symulacje na modelu sieci transportu zbiorowego Krakowa ilustrują możliwe skutki (pozytywne, jak i też negatywne) powszechnego dostępu do informacji RTCI. W drugiej części badania ankietowe oraz opracowane modele wyboru dyskretnego ukazują, że informacja RTCI ma potencjalnie istotny wpływ na preferencje podróżowania pasażerów. W ostatniej części, na przykładzie modelu transportowego Warszawy, przedstawiono także potencjał zastosowania systemu RTCI jako instrumentu zarządzania mobilnością do poprawy komfortu podróży. Wyniki tych prac wskazują, że systemy RTCI mogą pozytywnie kształtować jakość podróży transportem zbiorowym w miastach i ograniczać skalę zatłoczenia pasażerskiego. Jednakże, dla osiągnięcia efektywności systemów RTCI niezbędne jest zapewnienie wysokiego stopnia ich dokładności (wiarygodności) w czasie rzeczywistym.

Słowa kluczowe: transport zbiorowy, zatłoczenie pasażerskie, inteligentne systemy transportowe, ITS, informacja w czasie rzeczywistym, RTCI.

Wprowadzenie

Zatłoczenie pasażerskie jest poważnym wyzwaniem dla jakości funkcjonowania współczesnych systemów transportu zbiorowego. Jest ono szczególnie istotne w obszarach miejskich, gdzie mimo „twardych” i kosztownych działań inwestycyjnych nie udaje się skutecznie zapobiec problemom nadmiernego zatłoczenia pojazdów transportu zbiorowego w godzinach szczytu. Zamiast tego, coraz większego potencjału upatruje się w „miękkich” instrumentach zarządzania mobilnością [1], które wykorzystując nowoczesne rozwiązania technologiczne – z zakresu inteligentnych systemów transportowych (ITS) – mogą zwiększyć efektywność wykorzystania dostępnych już zasobów (możliwości przewozowych) sieci. W tym zakresie ciekawym rozwiązaniem staje się możliwość dostarczania informacji o bieżących (bądź prognozowanych) potokach pasażerskich w pojazdach transportu zbiorowego. Celem informacji o napelnieniu (zatłoczeniu) pasażerskim w czasie rzeczywistym – w skrócie RTCI (z ang.

real-time crowding information) – byłoby umożliwienie pasażerom wyboru opcji podróży (tj. trasy, kursu przejazdu) w celu zmniejszenia ryzyka wystąpienia zatłoczenia, przynosząc korzyści w skali indywidualnej (komfort podróży pasażera), jak i w skali globalnej (efektywność wykorzystania sieci).

Od strony praktycznej wdrożenie systemów RTCI jest coraz bardziej wykonalne dzięki mnogości rozwiązań w architekturze ITS, które zbierają dane o potokach pasażerów w sieci – na przykład bramki zliczające pasażerów (APC), systemy biletów elektronicznych (AFC, SCD), systemy wazenia pojazdów i wagonów, monitoring wizyjny, łączność Bluetooth, WiFi [2]. Oprócz bieżących celów operacyjności i monitoringu, dane te można przetworzyć dalej i przekazać pasażerom jako informację RTCI za pośrednictwem aplikacji do planowania podróży, wyświetlaczy przystankowych itd. Systemy RTCI są obecnie wprowadzane w wielu miastach na świecie – na przykład Waszyngton, Seul, Londyn. Skala ich wdrożenia jest zróżnicowana, jednak w większości przypadków są to jeszcze rozwiązania pilotażowe bądź ograniczone do pojedynczych linii (elementów) sieci. W warunkach polskich jako przykład rozwiązania typu RTCI można podać m.in. aplikację Google Transit [3]. Informacja o poziomie zatłoczenia oparta jest na historycznych zgłoszeniach od użytkowników (*user feedback*) i można ją uzyskać tylko dla wybranych połączeń w sieci. Drugim zbliżonym przykładem jest informacja o poziomie rezerwacji pociągów PKP Intercity, wyświetlana użytkownikom podczas zakupu biletów [4]. Poza tymi przykładami, według wiedzy autora, w chwili obecnej w Polsce brak jest bardziej zaawansowanych rozwiązań z zakresu RTCI.

Od strony naukowej wątek informacji RTCI jest stosunkowo nową dziedziną badawczą i stał się on przedmiotem większego zainteresowania w ostatnich latach. Pierwsze modele symulacyjne pozwalają odwzorować wybrane konsekwencje wpływu RTCI na wybór opcji podróżowania przez pasażera [5], [6], [7] i wskazują na potencjalną istotność tych zjawisk. Brak jest jednak pełnej odpowiedzi na pytanie, jakie mogą być konsekwencje takich decyzji pasażera w złożonych sieciach transportowych. Wynika to m.in. z faktu, że większość symulacji RTCI bazuje na modelach przykładowych, uproszczonych sieci (*toy networks*). Jedynie wyniki [4] sugerują, że długofalowo informacja RTCI może skłonić pasażerów do zmiany czasu odjazdu w celu ominięcia godzin szczytu. Oprócz tego algorytmy RTCI nie są wystarczająco poparte wiedzą w zakresie badań reakcji pasażerów na tę informację.

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2023.

Sama liczba takich badań preferencji pasażerskich jest ograniczona, a odnoszą się one głównie do systemów kolejowych i podróży regionalnych (pozamiejskich). Stosunkowo niewielka jest także baza obserwacji empirycznych skutków informacji RTCI. Dotychczas analiza taka była przedmiotem jednej pracy [8], która dotyczyła decyzji pasażerów o wyborze mniej zatłoczonego wagonu tego samego pociągu. W takim ujęciu pomija to zatem szerszy kontekst na przykład zmiany czasu lub trasy przejazdu. Wreszcie, w zakresie metod generacji informacji RTCI [9], zademonstrowano ich wykonalność na podstawie systemów AVL i APC, coraz bardziej powszechnych w architekturze ITS. Wnioski pokazują, że jest to wykonalne na podstawie danych historycznych, a uzupełnienie o dane bieżące (w czasie rzeczywistym) może wyraźnie zwiększyć dokładność takiej informacji dla pasażerów w krótkim horyzoncie czasu (5–10 minut) przed odjazdem.

Reasumując, w literaturze można zdiagnozować wciąż istotną lukę badawczą, która przejawia się niewystarczającym i niepełnym stanem wiedzy w zakresie badań, metod i analiz wpływu systemów RTCI na decyzje pasażera oraz dalsze funkcjonowanie sieci miejskiego transportu zbiorowego.

W ramach badań własnych – omówionych szerzej w publikacjach [6], [10], [11], [12], [13] – podjęto próbę wypełnienia tej luki badawczej, rozwijając narzędzia w postaci modeli symulacyjnych sieci transportowych, uzupełnione o badania ankietowe preferencji pasażerskich. Poniższy artykuł przedstawia podsumowanie owych badań w zakresie metod oraz wyników prac analitycznych. Zakres prac zrealizowano w odniesieniu do 3 zasadniczych pytań (problemów) badawczych:

- Jaki może być efekt globalny wpływu informacji RTCI na wybór trasy przejazdu w skali sieci transportu zbiorowego?
- Jaki jest wpływ informacji RTCI na skłonność pasażerów do wyboru późniejszego, ale mniej zatłoczonego odjazdu z tego samego przystanku?
- Czy dostępność informacji RTCI może przyczynić się do poprawy jakości podróży w sytuacji zakłóceń funkcjonowania sieci?

W ujęciu metodycznym wpływ chwilowy (natychmiastowy) informacji RTCI na proces decyzyjny pasażera można rozważać w 2 płaszczyznach decyzyjnych – w zależności między innymi od sposobu dostarczenia informacji RTCI czy osobistych preferencji podróżowania. Problem ten można zwizualizować za pomocą 2 przykładowych sposobów komunikacji (wyświetlenia) RTCI (rys. 1) i potencjalnej reakcji pasażera podczas podróży:

- Przesunięcie przestrzenne (*spatial shift*). Na podstawie informacji o bieżącym poziomie napełnienia pasażerskiego na dalszych odcinkach sieci transportu zbiorowego (*downstream-based RTCI*) – pasażer może podjąć decyzję o wyborze innej trasy (linii) przejazdu.
- Przesunięcie czasowe (*temporal shift*). Na podstawie informacji o bieżącym poziomie napełnienia pasażerskiego w nadjeżdżających pojazdach transportu zbiorowego (*upstream-based RTCI*) – pasażer może podjąć decyzję o wyborze innego (późniejszego) odjazdu z danego przystanku.



Rys. 1. Wpływ informacji RTCI na potencjalną decyzję w planowaniu podróży – w zależności od treści i sposobu komunikowania RTCI

Źródło: opr. własne

Modelowanie wpływu sieciowego RTCI na zmiany trasy podróży

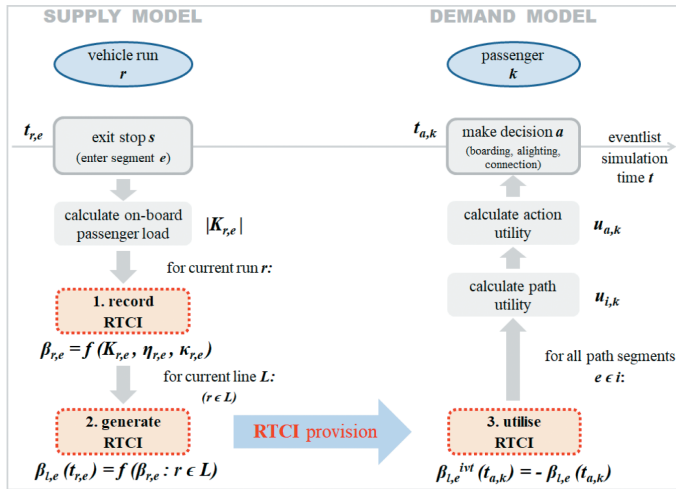
Pierwszym problemem badawczym jest analiza sieciowego wpływu dostępu do informacji RTCI. Poniżej przedstawiono algorytm opisujący wpływ RTCI na przesunięcia przestrzenne w decyzjach pasażerów, a następnie symulację jego konsekwencji na modelu rzeczywistej sieci transportu zbiorowego. Rozszerzone wyniki tych analiz badawczych opisano w publikacjach [6], [10].

Wpływ chwilowy (natychmiastowy) informacji RTCI na przesunięcia przestrzenne w decyzjach pasażera został opracowany w formie algorytmu matematycznego (rys. 2) i zaimplementowany do modelu symulacyjnego. Struktura takiego algorytmu składa się z 3 zasadniczych etapów:

- Poziom zatłoczenia (napełnienia) pojazdu transportu zbiorowego jest rejestrowany przez system ITS za każdym razem, kiedy dany autobus lub tramwaj odjeżdża z przystanku.
- Na podstawie danych ITS generowana jest aktualna wartość informacji RTCI dla danego odcinka międzyprzystankowego, która jest natychmiast udostępniana w sieci (przez smartfony i planery podróży).
- Pasażer podejmujący decyzję o wyborze trasy podróży sprawdza aktualne wartości informacji RTCI na dalszych odcinkach rozważanych opcji podróży. Na tej podstawie pasażer dokonuje wyboru trasy o największej użyteczności, czyli najniższym postrzeganym koszcie podróży – uwzględniając obok czasu przejazdu także i kwestie komfortu w pojeździe.

Wpływ poziomu napełnienia pojazdu (tj. wartości RTCI) na postrzegany przez pasażera czas podróży jest określany poprzez *ekwiwalentny mnożnik czasu przejazdu w pojeździe*. Wartości mnożnika przyjęto na podstawie badań w literaturze krajowej i zagranicznej [14], [15], [16].

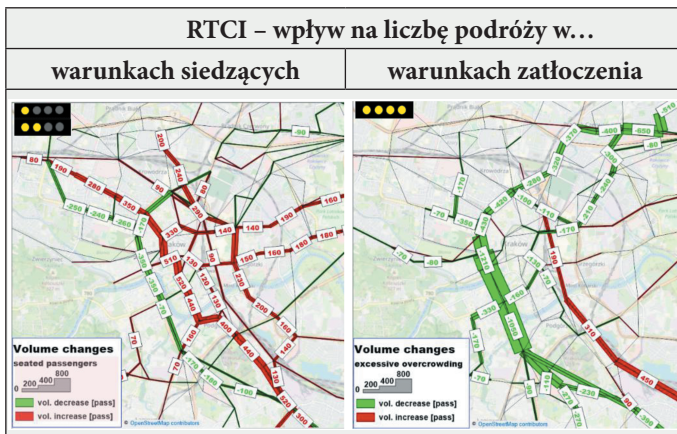
Powyższy algorytm wpływu RTCI został zaimplementowany w symulatorze BusMezzo, to znaczy dynamicznym i mezoskopowym modelu do symulacji ruchu w sieciach transportu zbiorowego [17]. Umożliwia to odwzorowanie komputerowe skutków wyżej wymienionej procedury decyzyjnej i wynikowego rozkładu potoków pasażerskich w sieci transportu zbiorowego. Warto podkreślić, że taki algorytm



Rys. 2. Metodyka opisująca wpływ informacji RTCI na decyzję pasażera o wyborze trasy podróży w symulatorze BusMezzo
 Źródło: opr. własne na podst. [6], [10]

pozwala odwzorować pojawienie się dynamicznych efektów zwrotnych pomiędzy: dostarczoną informacją RTCI i jej wpływem na decyzje pasażerów – w kroku czasowym t , a następnie: wynikowym rozkładzie potoków w sieci transportowej i generacją nowej informacji RTCI – w kolejnym kroku czasowym $t+1$.

Algorytm symulacyjny RTCI był najpierw analizowany na modelach prostych sieci transportowych w celu weryfikacji poprawności jego działania. Następnie przeprowadzono symulacje na modelu rzeczywistej sieci miejskiego transportu zbiorowego dla Krakowa. Ich celem była analiza efektów sieciowych powszechnego dostępu do (natychmiastowej) informacji RTCI, które omówiono poniżej.



Rys. 3. Wyniki symulacji na modelu sieci transportu zbiorowego w Krakowie – zmiany liczby pasażerów w różnych warunkach komfortu podróży, wskutek powszechnego wykorzystania informacji RTCI w decyzjach o wyborze trasy przejazdu
 Źródło: opr. własne na podst. [6]

Wyniki symulacji algorytmu ukazują, jak dostęp do informacji RTCI w czasie rzeczywistym wpływa wyraźnie na zmiany trasy podróży w sieci miejskiego transportu zbiorowego Krakowa (rys. 3). Informacja RTCI zwiększa widoczność rezerw przewozowych systemu dostępnych w danym momencie t , dzięki czemu wzrasta między innymi atrakcyjność alternatywnych (i często mniej popularnych) połączeń o dłuższym czasie podróży czy dojścia pieszego, ale za to

o niższym poziomie zatłoczenia (napelnienia) w pojazdach. W konsekwencji na wielu odcinkach sieci większa liczba pasażerów jest w stanie znaleźć miejsce siedzące podczas podróży, a jednocześnie może uniknąć ryzyka nadmiernego zatłoczenia w pojeździe – i to w godzinie szczytu popołudniowego (rysunek 3). W świetle wyników symulacji dostęp do informacji RTCI pozwala wielu pasażerom na podróż w bardziej komfortowych warunkach, a przy tym zwiększa ogólny poziom wykorzystania zasobów sieciowych.

Tabela 1

Wyniki symulacji na modelu sieci transportu zbiorowego w Krakowie – zmiany parametrów jakości podróży wskutek dostępności RTCI		Zmiana z RTCI
Parametr podróży		
nominalny czas podróży		- 0,8%
postrzegany czas podróży		- 2,3%
w tym:		
czas oczekiwania	suma	- 5,0%
	wymuszony (brak miejsca w pojeździe)	- 30,4%
czas przejazdu	suma	- 2,3%
	w nadmiernym zatłoczeniu w pojeździe	- 27,7%

Źródło: opr. własne na podst. [6]

Owe korzystne zmiany w jakości podróży znajdują także odzwierciedlenie w podsumowaniu tak zwanych uogólnionych kosztów (użyteczności) podróży [14] (tab. 1). W wariancie dostępu do informacji RTCI całkowity postrzegany koszt podróży maleje o niecałe 3%, ale za to znacząco maleją koszty związane z doświadczeniem przez pasażerów skutków nadmiernego zatłoczenia pasażerskiego – to znaczy braku możliwości wejścia do pojazdu czy też przejazdu w nadmiernie zatłoczonym pojeździe. Jak się okazuje, koszty te w skali globalnej spadają o 30%.

Tabela 2

Wyniki symulacji na modelu sieci transportu zbiorowego w Krakowie – dokładność systemu RTCI: porównanie przewidywanego vs. faktycznego poziomu napelnienia w pojeździe (jako [%] przemieszczeń pasażerskich)				
Poziom napelnienia pasażerskiego	przewidywany (wg informacji RTCI)			
	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●
faktyczny (w pojeździe)				
●●●●●	36,4%	2,8%	4,1%	0,3%
●●●●●	6,1%	1,3%	2,4%	0,2%
●●●●●	13,5%	3,6%	14,9%	3,2%
●●●●●	2,6%	0,7%	4,4%	3,5%

Źródło: opr. własne na podst. [6]

Jednakże, oprócz korzystnych wyników w zakresie jakości podróży, ważnym wynikiem analiz jest także istotne ryzyko poziomu niedokładności informacji RTCI (tab. 2). Jak się okazuje, RTCI wykorzystana do podjęcia decyzji o wyborze trasy, tylko w około 56% przypadków jest zbieżna z faktycznym poziomem napelnienia, doświadczonym później przez pasażera. Dodatkowo aż w około 30% przypadków RTCI okazuje się niedoszacowywać poziom napelnienia pojazdu, jaki pasażerowie zauważają już po podjęciu decyzji.

Obrazuje to z kolei potencjalnie negatywne skutki powszechnej (systemowej) reakcji podróżnych na informację RTCI, wygenerowaną i dostarczoną natychmiast (w czasie rzeczywistym) w sieci transportu zbiorowego.

Badania reakcji pasażerskich na RTCI w zakresie oczekiwania na późniejszy odjazd

Drugi problem badawczy dotyczy badań zachowań pasażerskich, jakie mogą wystąpić w obliczu dostępu do informacji RTCI w trakcie podróży. Poniżej omówiono metodykę badania ankietowego oraz wyniki estymacji modeli decyzyjnych. Badania te opisano szerzej w publikacji [11].

Badanie empiryczne zachowań pasażerskich zostało przeprowadzone w formie wywiadów ankietowych wśród użytkowników miejskiego transportu zbiorowego w Krakowie. Z uwagi na brak wdrożenia systemu RTCI w praktyce i możliwości analizy faktycznych zachowań (reakcji) pasażerów, badania te zostały zaprojektowane w formie tak zwanych preferencji deklarowanych (*stated preference survey*). Taka forma badania umożliwia poznanie potencjalnych (tj. deklarowanych) wyborów pasażerów w scenariuszach hipotetycznych, zdefiniowanych przez autorów. Korzyścią z podejścia w formie preferencji deklarowanych jest także możliwość poznania szerszego kontekstu (tła) podejmowanych wyborów – motywacji i celów decyzji oraz wpływu określonych czynników.

Który odjazd Pani/Pan wybierze?

1st dep. ●●●●
>>> DUE

2nd dep. ●●●●
10 mins

[] odjazd 1. – TERAZ [] odjazd 2. – ZA 10 MINUT

Proszę podać dane swojej podróży:

Czas podróży [min]
Takt kursowania [min]
Czy musi Pani/Pan zdążyć na czas?	[TAK] / [NIE]
Cel podróży (<i>dom, praca, nauka, inne</i>)

Rys. 4. Przykład pytania ankietowego dot. hipotetycznego wyboru pomiędzy wcześniejszym vs. późniejszym odjazdem (o mniejszym zatłoczeniu)
Źródło: opr. własne na podst. [11]

Badanie ankietowe zostało przeprowadzone w marcu 2019 roku wśród pasażerów czekających na przystankach autobusowych i tramwajowych w Krakowie, w różnych lokalizacjach i w ciągu całego dnia. Centralną częścią ankiety były scenariusze hipotetycznego dostępu do informacji RTCI dla obecnie realizowanej podróży. Respondenci byli pytani o potencjalną skłonność do wyboru pomiędzy:

- pierwszym (najbliższym) kursem danej linii – tj. bardziej zatłoczonym i odjeżdżającym teraz;
- lub – celowym pominięciem pierwszego kursu i zamiast tego wyborem drugiego kursu danej linii – tj. mniej zatłoczonym, ale odjeżdżającym za 5 lub 10 minut.

Informacja RTCI została zwizualizowana w ankiecie jako informacja w skali opisowej i była także ustnie tłumaczona przez ankietera. Przykład takiego pytania pokazano na rysunku 4.

Następnie wyniki ankietowania posłużyły do estymacji modeli wyboru dyskretnego, opisujących gotowość pasażerów do oczekiwania w zależności od informacji RTCI. Sformułowane zostało to w formie binarnego modelu logitowego, w którym pasażer rozważa wybór spośród 2 alternatyw – tj. pierwszym r lub drugim kursem $r+1$. Prawdopodobieństwo wyboru $P(i)$ jest proporcjonalne do użyteczności (kosztu) podróży danej alternatywy i (1):

$$P(i) = \frac{e^{U_i}}{e^{U_i} + e^{U_j}} \quad (1)$$

Z uwagi na binarny charakter wyboru użyteczność 1. kursu przyjęto jako wartość stałą (referencyjną) $U_r = 0$, a użyteczność 2. kursu U_{r+1} opisano formułą regresji liniowej. Użyteczność U_{r+1} opisuje zatem skłonność do oczekiwania (*WTW* – z ang. *willingness to wait*) na późniejszy odjazd tej samej linii na danym przystanku, przede wszystkim w zależności od użyteczności informacji RTCI β_{RTCI}^s o poziomie zatłoczenia obu kursów w scenariuszu s oraz uciążliwości β_{wt} wymaganego czasu oczekiwania t_{wt} . W formule użyteczności wykorzystano model mieszany logitowy (*mixed logit*), który pozwala uchwycić wpływ zróżnicowanych preferencji respondentów (heterogeniczności próby i tzw. efektów panelowych). Efekty te są uwzględnione poprzez odwzorowanie współczynnika uciążliwości czasu oczekiwania jako zmiennej losowej o rozkładzie normalnym $\beta_{wt}(\mu, \sigma)$ (2):

$$WTW = \beta_{RTCI}^{3-2} \cdot \delta_{RTCI}^{3-2} + \beta_{RTCI}^{4-3} \cdot \delta_{RTCI}^{4-3} + \beta_{RTCI}^{4-2} \cdot \delta_{RTCI}^{4-2} + \beta_{wt}(\mu, \sigma) \cdot t_{wt} \quad (2)$$

Tabela 3

Wyniki badania ankietowego – deklarowany poziom akceptacji oczekiwania na późniejszy odjazd tej samej linii o mniejszym napelnieniu pasażerskim				
Informacja RTCI	Elastyczność czasu podróży?	Akceptacja oczekiwania na 2. odjazd?		
		NIE	TAK 5 [min]	TAK 10 [min]
scenariusz A	NIE	84%	12%	4%
	TAK	59%	23%	18%
scenariusz B	NIE	43%	33%	24%
	TAK	15%	25%	60%

Źródło: opr. własne na podst. [11]

W toku badania ankietowego uzyskano 377 pełnych (ważnych) odpowiedzi. Uzyskane wyniki wskazują na potencjalnie wysoką skłonność pasażerów do oczekiwania na odjazd późniejszy o kilka minut, zwłaszcza jeżeli (hipotetyczny) system RTCI wskazałby możliwość uniknięcia zatłoczenia w pojeździe (tab. 3):

- W scenariuszu A (β_{RTCI}^{3-2}), gdy RTCI wskazuje dla 1. odjazdu *umiarkowany* poziom napelnienia (brak miejsc siedzących, ale swobodne „miejsca” stojące), a dla 2. odjazdu *niski* poziom napelnienia (dostępne miejsca siedzące): około 30% respondentów akceptuje wybór później-

szego odjazdu przy czasie oczekiwania do 5 [minut], a około 12% z nich – do 10 [minut].

- Za to w scenariuszu B (β_{RTCI}^{4-3}), gdy RTCI wskazuje dla 1. odjazdu *wysoki* poziom napelnienia (zatłoczenie w pojeździe, trudności z wsiadaniem), a dla 2. odjazdu *umiarkowany* poziom napelnienia (jw.), wyraźnie wzrasta udział respondentów deklarujących gotowość wyboru późniejszego odjazdu: około 72% przy czasie oczekiwania do 5 [minut], a około 44% przy czasie oczekiwania do 10 [minut].

W trakcie analizy wyników ankietowych zauważono także, że deklarowana gotowość oczekiwania na późniejszy, mniej zatłoczony odjazd jest wyraźnie kształtowana przez elastyczność czasu podróży danego respondenta. Prawdopodobieństwo oczekiwania wyraźnie różni się pomiędzy sytuacjami, gdy konieczne jest dotarcie do celu podróży na czas (np. podróż do pracy czy szkoły) lub gdy nie ma pośpiechu czasowego (np. podróż fakultatywna). Różnice te pokazano w tabeli 4.

Tabela 4

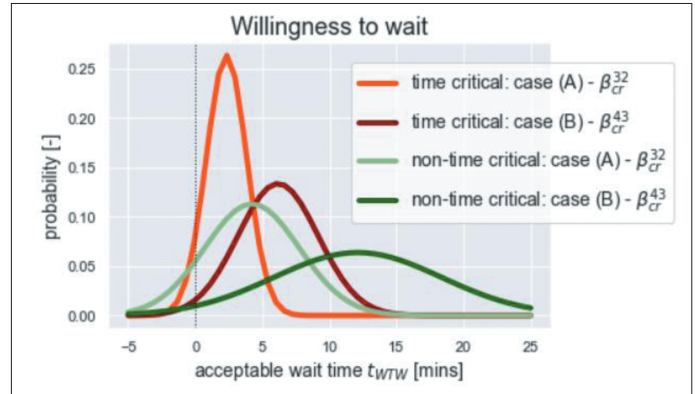
Wyniki modelowania wyboru dyskretnego na podstawie badań ankietowych – współczynniki modelu skłonności do oczekiwania WTW wg równania (2)							
Wyniki estymacji - współczynniki modelu*:	Wszystkie podróże		Elastyczność czasu podróży?				
			NIE		TAK		
	wartość	(std)**	wartość	(std)**	wartość	(std)**	
β_{RTCI}^{3-2}	1,828	0,226	2,073	0,350	1,696	0,340	
β_{RTCI}^{4-3}	5,294	0,333	5,545	0,436	5,105	0,556	
β_{RTCI}^{4-2}	5,510	0,481	5,755	0,663	5,331	0,776	
β_{wt}	średnia	-0,705	0,060	-1,014	0,099	-0,486	0,007
	odch. st.	0,286	0,045	0,308	0,081	0,184	0,043
Parametry estymacji modeli:							
LL początkowy:	-1380,9		-505,4		-841,8		
LL końcowy:	-816,5		-319,3		-463,6		
test LL:	1128,4		372,2		756,4		
pseudo R2:	0,396		0,336		0,427		
wielkość próby n:	377		168		209		

* wszystkie współczynniki na poziomie istotności $p < 0,001$
 ** błąd standardowy estymacji

Źródło: opr. własne na podst. [11]

Wyniki ankiet wykorzystano następnie do estymacji modelu wyboru dyskretnego. W tabeli 4 przedstawiono wynikowe współczynniki użyteczności informacji RTCI oraz użyteczności (kosztu) czasu oczekiwania. Dodatkowo wartości β_{RTCI}^s wskazują, że dostępność informacji RTCI wpływa pozytywnie na skalę zjawiska WTW, a ujemny współczynnik β_{wt} z kolei powoduje spadek użyteczności oczekiwania wraz z każdą minutą. Oprócz modelu ogólnego w tabeli 4 zaprezentowano także modele w zależności od konieczności dotarcia na czas do celu podróży (tj. elastyczności podróży).

Zgodnie z teorią krańcowej stopy substytucji (*marginal rate of substitution*), można porównać wartości (bezwzględne) uzyskanych współczynników $t_{WTW}^s = \beta_{RTCI}^s / |\beta_{wt}|$. Wartość t_{WTW}^s to średni (dodatkowy) czas oczekiwania, jaki respondenci są skłonni zaakceptować, ażeby móc podróżować w mniej zatłoczonym pojeździe (rys. 5). Wartości te kształtują się średnio w przedziale od 2 do 13 [minut] i wzrastają



Rys. 5. Wyniki modelu wyboru dyskretnego – akceptacja czasu oczekiwania w zależności od wartości RTCI (scenariusza A lub B) oraz elastyczności czasu podróży

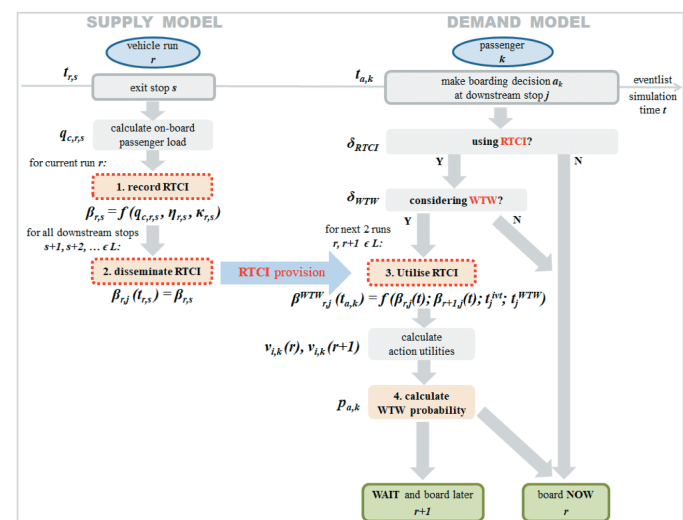
Źródło: opr. własne na podst. [11]

w sytuacjach, gdy informacja RTCI wskazuje wysoki poziom zatłoczenia pierwszego odjazdu oraz gdy pasażer ma elastyczność czasu podróży.

Wyniki powyższych badań wskazują zatem, że dostęp do informacji RTCI może wyraźnie wzmocnić skłonność do celowego wyboru późniejszego, mniej zatłoczonego odjazdu przy akceptowalnym czasie oczekiwania. W trzeciej części pracy przedstawiona zostanie analiza symulacyjna potencjalnych skutków tego zjawiska.

Analizy symulacyjne wpływu RTCI na wybór odjazdu z przystanku

Trzeci (i ostatni) problem badawczy dotyczy potencjału zastosowania RTCI jako instrumentu poprawy jakości podróży podczas zakłóceń sieci miejskiego transportu zbiorowego. Analogicznie do poprzedniej części badań opracowano w tym celu model symulujący wpływ RTCI na przesunięcia czasowe w decyzjach pasażerów. Zastosowanie tego modelu na sieci rzeczywistego korytarza autobusowego pokazuje konsekwencje takiego zjawiska dla funkcjonowania sieci oraz jakości podróży. Wyniki badań w szerszym zakresie prezentują prace [12], [13].



Rys. 6. Metodologia opisująca wpływ informacji RTCI na decyzję pasażera o wyborze czasu (tj. kursu) podróży – wdrożona w symulatorze BusMezzo

Źródło: opr. własne na podst. [13]

Wpływ chwilowy (natychmiastowy) informacji RTCI na przesunięcia czasowe w decyzjach pasażera został opracowany w sposób analogiczny do wcześniej zaprezentowanego algorytmu wpływu RTCI na przesunięcia przestrzenne. Składa się on z 3 zasadniczych etapów (rys. 6):

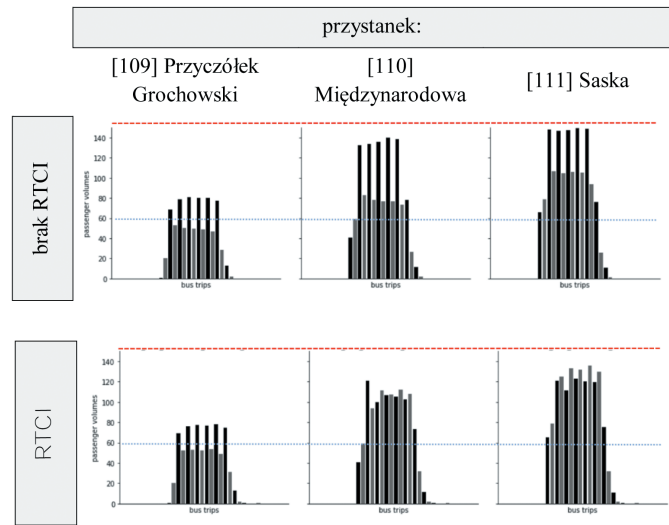
1. Rejestracja przez system ITS poziomu napełnienia w pojeździe w momencie odjazdu z danego przystanku.
2. Generacja (aktualizacja) wartości informacji RTCI dla danego kursu linii autobusowej (tramwajowej) i jej natychmiastowe udostępnienie w korytarzu linii (np. na wyświetlaczach przystankowych).
3. Użycie aktualnej informacji RTCI przez pasażera podejmującego decyzję o wyborze kursu (odjazdu) z danego przystanku s . W momencie przyjazdu kursu autobusowego pasażer sprawdza poziomy zatłoczenia najbliższego odjazdu r oraz późniejszego odjazdu $r+1$, a następnie wybiera odjazd o wyższej użyteczności (tj. niższym postrzeganym koszcie podróży) – uwzględniając, obok czasów przejazdu i oczekiwania, także kwestie komfortu w pojeździe.

Zakłada się, że dla danego pasażera decyzja o celowym pominięciu pojazdu r i wejściu na pokład późniejszego odjazdu $r+1$ – tj. wspomniane wcześniej zjawisko *willingness to wait* (WTW) – może nastąpić nie więcej niż jeden raz. Wpływ poziomu napełnienia pojazdu (tj. wartości RTCI) na postrzegany przez pasażera czas podróży jest określony poprzez *ekwiwalentny mnożnik czasu przejazdu w pojeździe* [14]. Wartości mnożnika wyliczane są na podstawie własnych badań ankietowych, przedstawionych w poprzednim rozdziale.

Tak opracowany algorytm RTCI został zaimplementowany w dynamicznym, mezoskopowym modelu BusMezzo [17]. Poprawność działania algorytmu była weryfikowana podczas symulacji na modelach sieci transportu zbiorowego. W dalszym kroku przeprowadzono analizy symulacyjne na modelu rzeczywistej linii autobusowej, tj. linii nr 523 w Warszawie. Analizy te obrazują, jak dostęp do RTCI wpływa na decyzje podróżnych w ruchliwym korytarzu autobusowym w momencie pojawienia się w nim efektu coraz bardziej narastających zakłóceń ruchu, i jakie ma to konsekwencje dla jakości podróży oraz funkcjonowania sieci.

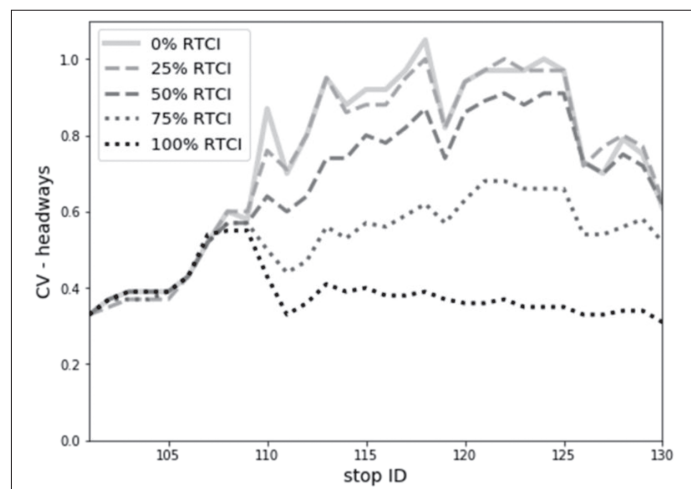
Symulacje przeprowadzono na modelu korytarza autobusowego, w wariancie pojawienia się efektu lawinowo narastającego zakłócenia (deregulacji) ruchu. Efekt ten znany jest w literaturze jako łączenie się autobusów (ang. *bus bunching* [18]) i objawia się w formie sprzężenia zwrotnego pomiędzy: narastającymi odchyleniami czasów odjazdu oraz coraz większymi wahaniami napełnienia pojazdów. Autobus r przyjeżdżający z coraz większym opóźnieniem na przystanek zabiera coraz większą liczbę pasażerów na pokład, podczas gdy kolejny autobus $r+1$ przyjedzie po (coraz) krótszym czasie niż wynosi takt kursowania i będzie (coraz) bardziej pusty – a efekt ten ulega wzmocnieniu na kolejnych przystankach.

Wyniki symulacji wskazują, jak dostępność informacji RTCI powoduje pojawienie się zjawiska WTW (opisanego



Rys. 7. Wyniki symulacji na modelu linii autobusowej nr 523 w Warszawie – zmiany rozkładu potoków pasażerskich w kolejnych odjazdach autobusów (na wybranym odcinku linii) wskutek dostępu do informacji RTCI
Źródło: opr. własne na podst. [13]

w poprzednim rozdziale) i przesunięcia czasowe w potokach pasażerskich wsiadających do kolejnych odjazdów z przystanku. Widać to dobrze na rysunku 7, który przedstawia poziomy napełnienia kolejnych kursów autobusowych na odcinku, gdzie wyraźnie wzrasta liczba pasażerów w korytarzu. Pasażerowie oczekujący na przystanku s , po otrzymaniu informacji RTCI (wygenerowanej i przekazanej przez system ITS z poprzednich przystanków $s-1, s-2...$) o różnicy w poziomie napełnienia pomiędzy kolejnymi odjazdami r oraz $r+1$, podejmują – ze znacznym prawdopodobieństwem – decyzje o oczekiwaniu na wejście do mniej zatłoczonego odjazdu. Skutkiem takich świadomych decyzji jest bardziej równomierne rozłożenie potoku pasażerskiego w kolejnych autobusach. Kontrastuje to wyraźnie z sytuacją braku dostępu do RTCI, gdzie wszyscy pasażerowie wsiadają do pierwszego nadjeżdżającego autobusu, co nasila efekt *bus bunching*. W efekcie poziomy napełnienia kolejnych autobusów stale podlegają znacznym wahaniom, rzędu około 60 do 100%.



Rys. 8. Wyniki symulacji na modelu linii autobusowej nr 523 w Warszawie – wpływ poziomu dostępności RTCI (% udział pasażerów) na współczynnik wariancji taktu kursowania
Źródło: opr. własne na podst. [13]

Wyniki symulacji pokazują, jakie są dalsze konsekwencje tych zjawisk w kontekście regularności kursowania autobusów. Zilustrowane zostało to na wykresie (rys. 8) współczynnika wariancji taktu kursowania (tj. ilorazu odchylenia standardowego do wartości średniej), który jest jedną z głównych miar zjawiska *bus bunching*. Dostęp do RTCI skutkuje nie tylko powstrzymaniem wzrostu współczynnika wariancji, ale nawet prowadzi do obniżenia i stabilizacji jego wartości na pozostałym odcinku autobusowym. Jest to wyraźna poprawa na tle wariantu bazowego (bez RTCI), w którym wariancja taktu kursowania jest coraz większa na kolejnych przystankach.

Zestawienie w tabeli 5 podsumowuje zmiany sieciowe w jakości podróży w analizowanym korytarzu autobusowym. W wariantcie dostępu do RTCI obserwuje się globalny spadek czasu podróży, zarówno w wartościach bezwzględnych (4%), jak i postrzeganych (ważonych – około 6%). Wynika to z redukcji (ważonego) czasu przejazdu, ale co ciekawe – sumaryczny (ważony) czas oczekiwania również nie ulega pogorszeniu. Korzystny wpływ RTCI objawia się zwłaszcza w znacznym ograniczeniu skali doświadczenia najwyższego poziomu zatłoczenia w pojeździe czy braku możliwości wejścia do pojazdu, które maleją aż o 40%.

Tabela 5

Wyniki symulacji na modelu linii autobusowej nr 523 w Warszawie – zmiany parametrów jakości podróży wskutek dostępności RTCI		
Parametr podróży		Zmiana z RTCI
nominalny czas podróży		- 3,8%
postrzegany czas podróży		- 5,6%
w tym:		
czas oczekiwania	suma	- 0,1%
	wymuszony (brak miejsca w pojeździe)	- 40,3%
czas przejazdu	suma	- 7,5%
	w nadmiernym zatłoczeniu w pojeździe	-43,4%

Źródło: opr. własne na podst. [13]

Zmiany te widoczne są także na rysunku 9, który pokazuje, że tak zwany uogólniony koszt podróży [14] maleje dla pasażerów wsiadających na zdecydowanej większości przystanków w korytarzu analizowanej linii autobusowej. Wyjątkiem są 2 przystanki przy ekranie Wisły, to jest na odcinku o krytycznym poziomie napełnienia pasażerskiego, co wynika z pewnego wydłużenia czasu oczekiwania. Niemniej jednak, jak pokazuje tabela 5, pojedyncze decyzje pasażerów – podjęte z pomocą informacji RTCI – prowadzą



Rys. 9. Wyniki symulacji na modelu linii autobusowej nr 523 w Warszawie – wpływ dostępności RTCI na zmiany średniego kosztu uogólnionego podróży (PJT – perceived journey time) w zależności od przystanku początkowego podróży

Źródło: opr. własne na podst. [13]

do poprawy doświadczenia podróży w skali całej analizowanej sieci autobusowej.

Wnioski i podsumowanie

Niniejszy artykuł poświęcony jest analizom wpływu nowatorskich systemów informacji o napełnieniu (zatłoczeniu) pasażerskim (z ang. RTCI – *real-time crowding information*) na decyzje pasażerów oraz funkcjonowanie systemów miejskiego transportu zbiorowego. Systemy RTCI są stosunkowo nowym rozwiązaniem technologicznym z zakresu ITS, a ich potencjał i konsekwencje nie są wystarczająco rozpoznane w obecnej literaturze badawczej.

W pracy dokonano weryfikacji 3 zasadniczych pytań (problemów) badawczych dot. efektów oddziaływania RTCI:

- **Pierwszy** problem badawczy koncentruje się na analizie symulacyjnej skutków dostępności RTCI w skali całej sieci miejskiego transportu zbiorowego. Według symulacji nawet w godzinie szczytu informacja RTCI jest w stanie zwiększyć widoczność bieżących rezerw przewozowych, a w konsekwencji także i wykorzystanie alternatywnych tras podróży. Przyczynia się to do poprawy jakości podróży i zmniejsza prawdopodobieństwo wystąpienia efektów nadmiernego zatłoczenia. Ponadto jednocześnie wzrasta ryzyko niedokładności informacji RTCI i jej niezgodności z faktycznie obserwowanymi warunkami przejazdu. Zaproponowany algorytm zwiększa realizm i wiarygodność stosowanych narzędzi.
- W **drugim** problemie badawczym przeprowadzono badania preferencji pasażerskich, które ukazują, jak dostęp do RTCI może istotnie wpłynąć na wzorce decyzyjne pasażerów w trakcie podróży miejskim transportem zbiorowym. Jak się okazuje, informacja o wysokim poziomie zatłoczenia autobusu (tramwaju) może skłonić znaczną część podróżnych do świadomego poczekania na mniej zatłoczony odjazd, nawet do kilkunastu minut. Skala tego zjawiska wzrasta wyraźnie w sytuacji, gdy informacja RTCI wskazuje na możliwość uniknięcia podróży pojazdem o wysokim (nadmiernym) zatłoczeniu pasażerskim.
- W ramach **trzeciego** problemu badawczego wykorzystano wyniki badań empirycznych (z części drugiej), aby przeanalizować możliwości zastosowania RTCI do ograniczania negatywnych efektów zakłóceń funkcjonowania sieci. Na przykładzie klasycznego zjawiska deregulacji kursowania i przepływów na linii autobusowej (tzw. *bus bunching*) pokazano w ujęciu symulacyjnym, jak zdiagnozowane zmiany w zachowaniach pasażerskich, wywołane dostępnością RTCI, mogą powstrzymać postępującą deregulację systemu i przynieść korzyści w postaci równomierniejszego rozkładu potoków pasażerskich, regularniejszych taktów (odstępów) kursowania pomiędzy pojazdami, pozytywnych zmian jakości podróży – i to bez dodatkowej ingerencji ze strony operatora. Stanowi to nowe i nieznane dotychczas zastosowanie RTCI w praktycznych problemach miejskiego transportu zbiorowego.

Postawione na początku artykułu cele zostały zrealizowane w toku (przedstawionych) badań. Algorytmy symulacyjne i badania empiryczne, zrealizowane w ramach niniejszej pracy, stanowią cenne narzędzia do opisu wpływu RTCI na proces decyzyjny pasażerów, a więc i oceny efektywności ich funkcjonowania. Dalsze zastosowanie do analiz na modelach sieci transportowych – jak pokazują wyniki prac – jest źródłem szeregu ważnych obserwacji dotyczących konsekwencji obecności systemów RTCI.

Z jednej strony, warto wskazać na pozytywny potencjał systemów RTCI, zarówno dla pasażerów, jak i operatorów – m.in. w zakresie poprawy jakości podróży, bardziej efektywnego wykorzystania możliwości przewozowych sieci czy przeciwdziałania zakłóceniom systemowym. Z drugiej strony, informacja RTCI używana przez pasażerów w trybie natychmiastowym (chwilowym) jest także narażona na ryzyko niedokładności, zwłaszcza w sytuacji systemowej (powszechnej) reakcji na taką informację. Wskazuje to na konieczność zapewnienia odpowiedniej wiarygodności i dokładności przyszłych systemów RTCI, tak aby mogły one stać się efektywnymi instrumentami zarządzania mobilnością w miejskim transporcie zbiorowym.

Rozwój dynamicznej informacji pasażerskiej, takich jak informacja RTCI jest obiecującym kierunkiem prac badawczych i wdrożeniowych dążących do poprawy jakości podróży i efektywności funkcjonowania miejskiego transportu zbiorowego.

Literatura

- Nosal K., Starowicz W., *Wybrane zagadnienia zarządzania mobilnością*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2010, nr 3.
- Aleksandrowicz J., Starowicz W., *Automatyczne systemy zliczania pasażerów w miejskim transporcie zbiorowym*. „Transport Miejski i Regionalny”, 2020, nr 6.
- Google LLC: *Google Maps – Transit & Food* [Aplikacja mobilna], 2023.
- PKP Intercity. <https://intercity.pl>, 2023.
- Nuzzolo A., Crisalli U., Comi A., Rosati L., *A mesoscopic transit assignment model including real-time predictive information on crowding*, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 20(4), 2016.
- Drabicki A., Kucharski R., Cats O., Szarata A., *Modelling the effects of real-time crowding information in urban public transport systems*, *Transportmetrica A: Transport Science*, 17(4), 2021.
- Noursalehi P., Koutsopoulos H., Zhao J., *Predictive decision support platform and its application in crowding prediction and passenger information generation*. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 129, 2021.
- Zhang, Y., Jenelius E., Kottenhoff K., *Impact of real-time crowding information: a Stockholm metro pilot study*. *Public Transport*, 9(3), 2017.
- Jenelius E., *Personalized predictive public transport crowding information with automated data sources*. *Transp. Research Part C: Emerging Technologies*, 2020.
- Drabicki A., Kucharski R., Cats O., Fonzone A., *Simulating the effects of real-time crowding information in public transport networks*, *Materiały IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, 2017.
- Drabicki A., Cats O., Kucharski R., Fonzone A., Szarata A., *Should I stay or should I board? Willingness to wait with real-time crowding information in urban public transport*, *Research in Transportation Business and Management*, 2023.
- Drabicki A., Cats O., Kucharski R., *The potential of real-time crowding information in reducing bus bunching under different network saturation levels*, *Materiały IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, 2021.
- Drabicki A., Kucharski R., Cats O., *Mitigating bus bunching with real-time crowding information*, *Transportation*, 2022.
- Rudnicki A., *Jakość komunikacji miejskiej*, SITK RP, 1999.
- Wardman M., Whelan G., *Twenty years of rail crowding valuation studies: evidence and lessons from British experience*, *Transport Reviews*, 31(3), 2011.
- Yap M., Cats O., van Arem, B., *Crowding valuation in urban tram and bus transportation based on smart card data*, *Transportmetrica A: Transport Science*, 16(1), 2020.
- Cats O., *Dynamic modelling of transit operations and passenger decisions*, *Rozprawa doktorska*, KTH Royal Institute of Technology (Sztokholm), 2011.
- Drabicki A., Kucharski R., Szarata A., *Zjawisko bus bunching w transporcie zbiorowym i jego odwzorowanie symulacyjne*, *Materiały X Konferencji Naukowo-Technicznej: Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego*, Poznań, 2017.

Doktoraty

Mgr inż. Arkadiusz Drabicki – na podstawie rozprawy: „Modelowanie oddziaływania informacji w czasie rzeczywistym o napelnieniu pasażerskim w sieciach miejskiego transportu zbiorowego”

Praca doktorska została napisana w języku angielskim (tytuł angielski – *Modelling the impact of real-time crowding information in urban public transport networks*) na Wydziale Inżynierii Lądowej w Politechnice Krakowskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Andrzeja Szaraty. Promotorem pomocniczym był dr hab. inż. Rafał Kucharski z Uniwersytetu Jagiellońskiego. Recenzentami pracy byli: dr hab. inż. Konrad Lewczuk, prof. Politechniki Warszawskiej i dr hab. inż. Renata Żochowska, prof. Politechniki Śląskiej. Obrona odbyła się w dniu 27 września 2023 roku. Rada Naukowa Wydziału Inżynierii Lądowej w Politechnice Krakowskiej zatwierdziła stopień doktora w dniu 11 października 2022 roku.

Celem głównym pracy było opracowanie modelu dla wielokryterialnego wspomaganie decyzji w problemie optymalizacji przydziału taboru do obsługi miejskich linii transportu zbiorowego z uwzględnieniem rzeczywistego popytu na usługi przewozowe, zużycia energii i emisji szkodliwych substancji taboru oraz oczekiwań organizatora miejskiego transportu zbiorowego. W powyższym artykule Autor przedstawił fragmenty rozważań w pracy doktorskiej.

(WS)