

ANDRZEJ MAĆKOWIAK

mgr inż., Biuro Inżynierii Transportu,
ul. Wrocławska 10, 61-838 Poznań,
tel.: +48 61 835 19 73, e-mail:
mackowiak@bit-poznan.com.pl

JACEK THIEM

mgr inż., Biuro Inżynierii Transportu,
ul. Wrocławska 10, 61-838 Poznań,
tel.: +48 61 835 19 73, e-mail:
thiem@bit-poznan.com.pl

Modelowanie systemów Bus Rapid Transit – studium przypadku¹

Streszczenie: Systemy „szybkiego autobusu”, „metrobusu”, czyli systemy Bus Rapid Transit (BRT), są nadal mało znane w Polsce, mimo iż na świecie odnoszą sukcesy. Jest to o tyle niezrozumiałe, że prowadzone analizy (m.in. w Płocku, Poznaniu) dają obiecujące wyniki. Autorzy artykułu przedstawiają specyficzne podejście do modelowania i planowania systemu BRT na podstawie wymienionych przykładów. Próbuje rozwiązać wątpliwości związane z sposobem odwzorowania systemu BRT w modelu popytu i podaży. W artykule starają się wyjaśnić przyczynę wysokich wskaźników analizy ekonomicznej uzyskiwanych przez planowane systemy BRT. Swoje rozważania ilustrują przykładami funkcjonujących systemów BRT na całym świecie.

Słowa kluczowe: transport pasażerski, Bus Rapid Transit (BRT), model ruchu

Wprowadzenie

Mimo iż temat BRT pojawiał się już wielokrotnie na konferencjach naukowych, a pomysły na jego wdrożenie występują w wielu polskich miastach, to nadal można spotkać się z mylnym pojmowaniem tego systemu transportu. Doktor Andrzej Krych w referacie „*BRT jako alternatywa transportu szynowego*” [1] proponuje następującą definicję: *BRT jest w istocie rozwiązaniem systemowym, którego celem jest wypełnienie na rynku transportowym niszy pomiędzy tanim w nakładach i elastycznym operacyjnie, ale drogim w eksploatacji w sieci zatłoczonej autobusem, a drogim w nakładach, za to szybkim i tańszym w eksploatacji transportem szynowym.* Z definicji tej wynika, że BRT jest rozwiązaniem systemowym i należy je traktować jako podsystem transportu zbiorowego, który z uwagi na koszty oraz wskaźniki funkcjonalne należy uszeregować pomiędzy komunikacją autobusową a transportem szynowym.

Oczywiście nie jest to jedyna definicja BRT. Przykładowo wg amerykańskich podręczników [2], [3]: *BRT to elastyczny, szybki środek transportu o wysokich charakterystykach, łączący elementy infrastrukturalne, elementy organizacyjne i zarządzania ruchem w trwałą, zintegrowany system transportu o wysokiej jakości i unikalnym wizerunku.*

Z kolei Federal Transit Administration używa również prostszej definicji [4]: *BRT to szybki środek transportu o jakości transportu szynowego i elastyczności transportu autobusowego.*

Niezależnie od definicji, można wskazać kilka cech charakteryzujących BRT:

- jest podsystemem transportu zbiorowego, różniącym się od często utożsamianej z nim komunikacji autobusowej;
- łączy pozytywne cechy transportu autobusowego i transportu szynowego. Można go uszeregować między tymi podsystemami transportu zbiorowego;

- jest budowany poprzez połączenie szeregu komponentów (rozwiązań), przy czym zakres rozwiązań nie jest obligatoryjny, jest dopasowywany indywidualnie, mając wpływ zarówno na koszty inwestycyjne, jak i na osiągnięte wskaźniki funkcjonalne.

Komponenty systemu BRT i sposób ich modelowania

Zakres i rodzaj zastosowanych komponentów systemu BRT wpływa na podstawowe jego cechy, czyli:

- prędkość komunikacyjną,
- niezawodność,
- wizerunek,
- bezpieczeństwo,
- przepustowość.

Podstawową cechą BRT jest prędkość komunikacyjna. Według Zbigniewa Rusaka [5] prędkość ta mieści się w przedziale 25–48 km/h. Tak duży zakres jest wynikiem stosowania różnych rozwiązań, w szczególności segregacji ruchu autobusowego oraz rozwiązań ITS. Prędkość komunikacyjna jest stosunkowo łatwym do zamodelowania parametrem. W uproszczonych metodach można przyjąć prędkość z podanego powyżej zakresu, natomiast w metodach dokładniejszych należy oszacować wpływ poszczególnych komponentów systemu na prędkość komunikacyjną.

Kolejne trzy cechy – niezawodność, wizerunek i bezpieczeństwo – trudno jest odwzorowywać w modelach ruchu. Mają one głównie wpływ na decyzję o wyborze środka transportu, a więc na model podziału zadań przewozowych. Amerykanie [2] zalecają dla określenia wzrostu liczby pasażerów stosowanie metod opartych na: modelu czterostadiowym, modelu logitowym lub współczynnikach. Uwzględniają wzrost liczby pasażerów wynikający głównie ze skrócenia czasu podróży, ale również od zakresu i rodzaju komponentów.

Odwzorowanie przepustowości w modelach transportu zbiorowego jest w programie Visum – programie, który został użyty do modelowania BRT – stosunkowo nową opcją. Przepustowość jest określana na podstawie przypisania taborowi maksymalnej liczby pasażerów. Tymczasem liczba ta w zależności od zachowań pasażerów może być wyższa w przypadku akceptacji większej niż normatywna gęstości osób lub niższa np. w przypadku blokowania wejść do pojazdu. Zwiększenie przepustowości można z reguły zapewnić działaniami organizacyjnymi np. wprowadzeniem dodatkowych kursów, zmianą taboru czy zwiększeniem częstotliwości kursowania. Dlatego wydaje się, że odwzorowanie przepustowości powinno się ograniczać do wskazania niebezpieczeństwa przepełnienia pojazdów BRT na wybranych kursach

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2016. Wkład autorów w publikację: A. Mackowiak 50%, J. Thiem 50 %.

i odcinkach. To powinno być przesłanką do zaplanowania ewentualnych działań w celu rozwiązania problemu. Zakres przepustowości BRT w pas/h w jednym kierunku, można za Zbigniewem Rusakiem [5] określić na 7300–40 000, jest to więc bardzo duża zdolność przewozowa.

W opracowaniach [2] i [3] komponenty, które składają się na system BRT, pogrupowane są w zależności od podmiotu, którego dotyczą:

1. Jezdnia przeznaczona do prowadzenia pojazdów systemu BRT:

- a. Sposób separacji jezdni: Z założenia ruch pojazdów BRT odbywa się w przestrzeni odseparowanej od ruchu samochodów osobowych. Stopień separacji ma wpływ na czas przejazdu odcinka w modelu ruchu, przy pełnej segregacji można założyć swobodny czas przejazdu.
- b. Sposób oznakowania jezdni: Ma wpływ na wizerunek i bezpieczeństwo i nie jest bezpośrednio odwzorowywany w modelu.
- c. Sposób prowadzenia pojazdu: W niektórych systemach BRT stosuje się rozwiązania wspomagające prowadzenie pojazdu. Wpływa to na bezpieczeństwo i szybkość jazdy oraz pozwala na zmniejszenie przestrzeni (szerokości jezdni) potrzebnej do prowadzenia pojazdów. W modelu można zwiększyć w zależności od rozwiązania prędkość pojazdu.

2. Przystanki w systemie BRT:

- a. Typ przystanku: Można w systemie BRT zastosować typowe przystanki autobusowe, przystanki dedykowane BRT oraz węzły przesiadkowe. W zależności od rozwiązań można zmniejszyć czas dotarcia i przesiadki na przystanku.
- b. Wysokość platformy przystankowej: Przystanki mogą mieć platformę ułatwiającą obsługę pojazdów niskopodłogowych lub zwykłą niską. Z badań amerykańskich [2] wynika, że zastosowanie wysokiej platformy skraca czas wymiany pasażerskiej nawet o 20%, można to odwzorować przez odpowiednie skrócenie czasu rozkładowego na odcinkach obsługiwanych przez takie przystanki.
- c. Długość platformy: Stosuje się przystanki jedno- lub wielostanowiskowe. Przystanki wielostanowiskowe mogą zapewnić większą przepustowość systemu, jednak zwiększają się na nich czasy przesiadki.
- d. Położenie przystanku względem jezdni: Przystanki mogą być położone w zatoce, bezpośrednio przy krańcu (bez zatoki) lub w środku jezdni. Położenie przystanku ma wpływ na czas jazdy (wydłużony w przypadku przystanków w zatoce).
- e. Dostęp do przystanku: Dostęp do przystanku może być ułatwiony dla osób niepełnosprawnych, czy podróżujących w systemie P & R lub B & R. Brak wyodrębnienia grupy osób niepełnosprawnych w modelu uniemożliwia modelowanie ułatwienia dostępu przystanków dla tej grupy. Najnowsze wersje oprogramowania Visum pozwalają na uwzględnienie w obliczeniach systemu P & R ewentualnie B & R, jeśli w modelu ruch rowerowy jest wyodrębniony.

3. Pojazdy BRT:

- a. Typ pojazdu: System BRT mogą obsługiwać typowe autobusy funkcjonujące w miejskiej komunikacji autobusowej, autobusy dedykowane BRT, czyli pojazdy o podwyższonej pojemności z zastosowaniem rozwiązań mających na celu przyspieszenie jazdy i wymiany pasażerskiej lub pojazdy zaprojektowane pod konkretną linię. W zależności od przewidywanego typu pojazdu możemy skrócić czas wymiany (nie więcej niż 20% – patrz 2b) oraz czas jazdy.
- b. Oznakowanie i wygląd pojazdu: Komponent nie jest uwzględniany w modelu ruchu.
- c. Dostosowanie do większej pojemności: Pojazdy BRT mogą mieć przestrzeń zoptymalizowaną dla zwiększenia pojemności i przyspieszenia czasu wymiany. W procesie modelowania możemy podobnie jak w punkcie 3a zastosować skrócenie czasu wymiany pasażerskiej oraz zadać odpowiednią pojemność pojazdu.
- d. Rodzaj zasilania pojazdów: W pojazdach BRT stosuje się te same jednostki napędowe, co w pozostałych autobusach komunikacji miejskiej. Niektóre systemy BRT obsługiwane są również przez trolejbusy. Rodzaj zasilania może mieć wpływ na możliwe do osiągnięcia prędkości i przyspieszenia, rzadko jednak jest to odwzorowywane w modelu ruchu.

4. System opłat:

- a. System kasowania biletów: W systemach BRT stosuje się trzy różne systemy kasowania biletów: tradycyjny w pojeździe, przy pomocy konduktora, poza pojazdem (metro). Zastosowanie systemu kasowania biletów poza pojazdem przyspiesza wymianę pasażerską, więc skraca rozkładowy czas jazdy. Z uwagi na brak badań trudno uwzględnić wpływ tego komponentu w modelu ruchu.
- b. Nośnik biletu: W systemach BRT stosuje się obecnie jeszcze tradycyjne bilety papierowe, ale są one jednak wypierane przez karty magnetyczne. Podobnie jak w 4.a trudno jest odwzorować komponent w modelu ruchu.
- c. Sposób opłacania przejazdu: Sposób opłacania przejazdu ma znaczenie dla szybkości wymiany pasażerskiej w przypadku, gdy pasażer musi wybierać jaki bilet ma kupić i skasować. Systemy opłat stosowane są różne np. opłaty jednorazowe, strefowe, zależne od liczby przystanków, zależne od czasu jazdy. Podobnie jak w 4.a i 4.b trudno jest odwzorować komponent w modelu ruchu.

5. Inteligentne systemy transportowe (ITS):

- a. Priorytety dla pojazdów BRT: W systemach BRT zaleca się stosowanie bezwzględnych priorytetów dla pojazdów BRT w sygnalizacji świetlnej. Priorytety w BRT związane są zarówno z pojazdami, jak i pasażerami, sygnalizacja ułatwia dostęp pasażerów do przystanków. Najlepszym rozwiązaniem jest wyliczenie czasu przejazdu w modelu ruchu, bez uwzględnienia strat na sygnalizacji. Jest to prawidłowe jedynie w przypadku priorytetów bezwzględnych.

- b. Wspomaganie kierowcy: Pojazdy BRT wyposażane są w systemy wspomaganie pracy kierowców. Komponent nie jest odwzorowywany w modelu ruchu.
- c. System zarządzania: System zarządzania BRT może być częścią systemu zarządzania całą komunikacją miejską. Celem takiego systemu jest zbieranie w czasie rzeczywistym informacji o pozycji pojazdów, napełnieniu, awariach itp., analiza tych informacji i, w razie wystąpienia zakłóceń, szybkie wprowadzenie planu naprawczego. Komponent ma wpływ na niezawodność, nie jest odwzorowywany w modelu ruchu.
- d. Informacja pasażerska: W systemach BRT stosuje się informację pasażerską on-line, przekazywaną do pasażera poprzez: wyświetlacze na przystankach, wyświetlacze w pojazdach, Internet, telefony GSM, planery podróży. W modelu ruchu można stosować algorytmy rozkładu potoków pasażerskich oparte na świadomym wyborze kursu przez pasażera, np. algorytm wg rozkładu jazdy lub algorytm wg częstości kursów ze zmniejszonym parametrem oczekiwania. Można również zredukować w algorytmie rozkładu potoków kary za przesiadkę.
- e. Technologie bezpieczeństwa: W pojazdach BRT montowane są systemy powiadamiania alarmowego oraz systemy monitoringu wnętrza pojazdu. Komponentu nie odwzorowuje się w modelu ruchu.
- f. Dodatkowe technologie: Dodatkowe technologie to przykładowo systemy komunikacji kierowcy z dyspozytorami czy system zliczający pasażerów. Komponentu nie odwzorowuje się w modelu ruchu.
6. Planowanie - model ruchu jest narzędziem planowania, wszystkie komponenty dotyczące planowania mogą być sprawdzone lub wyznaczone za jego pomocą. Odzworowanie komponentów jest bezpośrednie i nie stwarza kłopotu.

Przykłady badań modelowych BRT

Płock

W ramach studium transportowego dla Miasta Płock [6] przeprowadzono szereg badań modelowych dotyczących rozwoju układu drogowego oraz systemu transportu zbiorowego. W zakresie transportu zbiorowego analizie poddano 9 wariantów: (6 tramwajowych, 2 BRT, 1 autobusowy). Ze względu na specyfikę zagospodarowania miasta Płock podstawową ideą było sprawne połączenie największej dzielnicy mieszkaniowej: Podolszyce (wschodnia część miasta) z centrum oraz z największym przedsiębiorstwem w mieście, tj. PKN Orlen (zachodnia część miasta). W studium wyznaczono korytarze przeznaczone dla szybkiego ruchu transportu publicznego, w oparciu o które kształtowano sieć: tramwajową, BRT lub autobusową.

W wariantcie „E” zamodelowano dwie linie autobusowe BRT. Linia 1 Stare Gulczewo – Orlen; przebieg tej linii zapewnia obsługę ścisłego centrum; Linia 2 Stare Gulczewo – Medyczna; ulicami Wyszogrodzka, Jachowicza, Kobylińskiego, Dobrzyńska. Dodatkowo przyspieszono pozostałe li-

nie autobusowe przebiegające w korytarzach pokrywających się z BRT. Usunięto lub skrócono linie autobusowe, których marszruta pokrywa się z liniami autobusów BRT.

W wariantcie kierunkowym „F”, przyjęto rozwój systemu transportowego w zakresie połączenia obszarów południowych z centrum miasta. Wariant „E” rozbudowano więc o dodatkową linię BRT na tym kierunku, przechodzącą przez „stary” most na Wiśle.

Założenia dotyczące podstawowych parametrów funkcjonalnych dla wariantów tramwajowych, jak i BRT były zbliżone. Średnie prędkości komunikacyjne uzależnione były od odległości międzyprzystankowych, możliwości separacji od transportu indywidualnego oraz liczby skrzyżowań, dla których analizowano możliwość wprowadzenia priorytetu w zakresie transportu publicznego. W rezultacie wyznaczone średnie prędkości komunikacyjne kształtowały się na poziomie 30 km/h. W godzinach szczytu przyjmowano częstość kursową pojazdów BRT co 5 minut, w pozostałym okresie co 10 minut.

W Studium [6] nie badano wpływu rozwiązań na zmiany podziału modalnego, natomiast wyniki podziału zadań przewozowych między środki transportu zbiorowego zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1

Praca przewozowa – miasto Płock, prognoza 2020						
środek transportu	[pasażerów/dobę]			udział		
	WO	E	F	WO	E	F
autobus	110 849	88 624	82 500	100%	74%	68%
tramwaj						
BRT		31 452	38 550		26%	32%
razem	110 849	120 076	121 050	100%	100%	100%

Źródło [6]

Zgodnie z tabelą dwie linie BRT w wariantcie „E” realizują 26% pracy przewozowej w Płocku, a trzy linie w wariantcie „F” 32%. Badany średni czas podróży w komunikacji zbiorowej w prognozie na 2020 rok skrócił się w stosunku do czasu podróży w wariantcie odniesienia równego 26 min 6 s, o 1 min 5 s w wariantcie E i 1 min 19 s w wariantcie F.

Poznań

Analiza połączenia komunikacyjnego Naramowic oraz północnych osiedli Poznania: Radojewa, Umultowa, Biedruska z centrum miasta obejmowała sześć wariantów, zarówno tramwajowych, jak i BRT. W trzech wariantach wprowadzono linie BRT:

Wariant 4A

Wprowadzono linię autobusową BRT od pętli Rubież do Dworca Poznań Główny. Trasa linii przebiega ulicami: Naramowicka, Szelałowska, Garbary, Królowej Jadwigi, Matyi. Częstość kursowania w szczycie: co 10 minut.

Usunięto linię autobusową o pokrywającym się przebiegu i zmodyfikowano trasy niektórych linii autobusowych. Przyjęto wzrost prędkości dla autobusów kursujących w korytarzu autobusowym: Garbary, Szelałowska, Naramowicka, od skrzyżowania ulic: Garbary-Estkowskiego do skrzyżowania ulic: Naramowicka-Sielawy.

Wariant 5AT

Wariant stanowi kombinację wariantów: tramwajowego z linią tramwajową wzdłuż ulicy Naramowickiej od pętli Wilczak do Naramowic oraz wariantu BRT – 4A.

Wariant 6AT

Wariant stanowi kombinację wariantów: tramwajowego z linią tramwajową w ulicy Murawa do Naramowic oraz wariantu BRT – 4A.

Czas przejazdu odcinka międzyprzystankowego dla tramwajów i autobusów poruszających się po wspólnych pasach tramwajowo-autobusowych obliczono na podstawie badań własnych oraz opracowania [7]. W głównej mierze czas ten jest uzależniony od odległości między przystankami oraz liczby skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Prędkość komunikacyjna dla linii BRT wyniosła 22,4 km/h.

Wszystkie analizy przeprowadzono dla prognoz określonych na rok 2025, w których badano m.in. podział zadań przewozowych między transportem zbiorowym i indywidualnym dla każdego wariantu. W tabeli 2 zestawiono wyniki analiz w zakresie przewozów pasażerskich.

Tabela 2

Wyniki badań modelowych BRT do Naramowic – prognoza 2025							
Wariant	Przełożenie modalne do transportu zbiorowego [osób/dobę]	Parametry przewozowe linii do Naramowic					
		Udział w pracy transportowej ZTM [%]		Udział w przewozach ZTM [%]		Wskaźnik efektywności [paskm/pojkm]	
		BRT	tramwaje	BRT	tramwaje	BRT	tramwaje
4A	2 537	1,81		2,99		41,2	
5AT	2 599	1,78	1,82	2,52	1,80	34,9	22,8
6AT	2 627	1,79	3,65	2,18	4,10	27,5	24,8

Źródło [8]

Największe przełożenie modalne uzyskano dla wariantu tramwajowo-autobusowego 6AT. Wiązało to się jednak z niskimi wskaźnikami efektywności przewozowej.

Badania podsumowano zbiorem parametrów, które można wykorzystać przy sporządzaniu analizy wielokryterialnej. Wybrane kryteria przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Wybrane wartości kryteriów dla poszczególnych wariantów				
Nazwa kryterium	W 0	W 4A	W 5AT	W 6AT
Kryterium zmiany kosztów funkcjonowania transportu [zł/rok]	-	5 145 171	11 815 132	9 490 616
Kryterium czasu podróży – średni czas podróży transportem zbiorowym w całym powiecie.	36 min 25 s	36 min 12 s	36 min 11 s	36 min 11 s
Kryterium bezpośredniości – stosunek liczby podróży do liczby przejazdów w transporcie zbiorowym	0,4354	0,4397	0,4426	0,4434
Kryterium preferencji środka transportu – liczba podróży, w których samochód został zamieniony na transport zbiorowy	-	2 537	2 599	2 627
Nakłady inwestycyjne netto [mln zł]	-	108,15	223,38	234,00
Emisja odkomunikacyjna CO ² w Aglomeracji [t]	2 727,50	2 723,58	2 723,55	2 723,52
Wskaźnik B/C	-	0,2621	0,1107	0,1015

Źródło [8]

Wnioski

Zarówno w przypadku badań modelowych w Płocku, w Poznaniu, jak również nieopisanych w artykule badań BRT w Krakowie, ten środek transportu publicznego charakteryzuje się dużą efektywnością. Zapotrzebowanie na przewozy jest w BRT wysokie, co jest wynikiem osiąganych dobrych parametrów funkcjonalnych. Z kolei koszty, zarówno budowy, jak i eksploatacji są niższe niż na przykład w komunikacji tramwajowej, co przekłada się na wysokie wskaźniki ekonomiczne B/C czy EIRR.

Tak dobre wyniki BRT są efektem optymalizacji rozwiązań możliwej przy kompozytowej budowie systemu. Przy takim podejściu kosztowne rozwiązania można zastosować, tam gdzie są niezbędne na pozostałych odcinkach, stosując rozwiązania tańsze bez szkody dla osiąganych parametrów funkcjonalnych.

Najważniejsze komponenty systemu BRT są możliwe do odwzorowania w modelach ruchu, przez co modele te są dobrym narzędziem do planowania i analizowania tych systemów. Brakuje co prawda badań określających wpływ niektórych z komponentów na wybór w podróżach środka transportu. Jednak dotyczy to głównie komponentów uważanych za mniej istotne.

Warto zauważyć, że odwzorowanie modelowe nie uwzględnia zachowań nieprzepisowych (np. blokowanie pasa autobusowego) czy awaryjnych. Odporność systemu na takie zachowania będzie zależna od standardu i zakresu komponentów.

W studiach transportowych warto analizować możliwości wprowadzenia na badanym obszarze systemu BRT. Systemu stanowczo za mało popularnego w naszym kraju, niesłusznie traktowanego jako ulepszona wersja komunikacji autobusowej.

Literatura

1. Krych A., *BRT jako alternatywa transportu szynowego*, Materiały konferencyjne „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego” – VII konferencja naukowo-techniczna, Poznań Rosnówko 2009.
2. Levinson et al., *Bus Rapid Transit – Implementation Guidelines*, TCRP Report 90, Volume II.
3. Booz Allen Hamilton, Inc., *Characteristics of Bus Rapid Transit for Decision-Making*, FTA-VA-26-7222-2004.1; Sierpień 2004.
4. Kittelson & Associates, Inc., *Bus Rapid Transit Practitioner's Guide*, TCRP Report 118, 2007.
5. Rusak Z., *BRT w systemie transportu publicznego na przykładzie Stambułu*, Materiały konferencyjne „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, IX konferencja naukowo-techniczna, Poznań Rosnówko 2013.
6. *Studium transportowe i bezpieczeństwa transportu w mieście Płock. Prognozy i badania modelowe wariantów rozwoju systemu transportowego*, Biuro Inżynierii Transportu Pracownie Projektowe, Poznań 2008.
7. Bauer M., *Warunki ruchu autobusów po wspólnych wydzielonych torowiskach tramwajowo-autobusowych*, XVI Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Komputerowe Systemy Wspomagania Nauki, Przemysłu i Transportu, Zakopane 2012.
8. *Obsługa komunikacyjna rejonu Naramowic w Poznaniu*, Biuro Inżynierii Transportu Pracownie Projektowe, Poznań 2014.