

Estymacja czasu przejazdu pociągów metra dla potrzeb modeli symulacyjnych, na przykładzie I linii w Warszawie

Marek Bauer

Katedra Systemów Komunikacyjnych, Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, e-mail: mbauer@pk.edu.pl

Streszczenie: W niniejszym artykule zaprezentowano autorski model czasu przejazdu pociągów metra, którego struktura może służyć do szacowania czasu przejazdu dowolnej linii metra na etapie planowania inwestycji. W założeniu – model ma stanowić narzędzie do estymacji wiarygodnych czasów przejazdu pociągów metra w modelach sieci transportowych. Model czasu przejazdu uwzględnia długość i zmienność czasu przejazdu poszczególnych odcinków między stacjami oraz czasu postoju na tych stacjach. W referacie przedstawiono modele cząstkowe średniego czasu przejazdu w zależności od długości odcinków, w ustaleniach sześciu porach dnia roboczego, opracowane na podstawie wyników pomiarów pochodzących z I linii metra w Warszawie. Zaprezentowano także podobne modele służące do oszacowania odchyłeń standardowych czasu przejazdu odcinków linii. Również czas postoju na stacjach zamodelowano w oparciu o wyniki pomiarów, dla wyodrębnionych trzech typów stacji, zróżnicowanych pod względem średnich czasów postoju oraz położenia stacji względem ścisłego centrum miasta. W referacie przedstawiono także praktyczny przykład wykorzystania modelu: ocenę wpływu dogęszczenia stacji na czas przejazdu linii.

Słowa kluczowe: metro, modelowanie, model symulacyjny, czas przejazdu

1. Wprowadzenie

Coraz częściej w polskich miastach (na przykład w Krakowie i we Wrocławiu) toczą się dyskusje na temat zasadności budowy linii metra, a nawet konkretnych propozycji tras. Najczęściej, dyskusje te są spowodowane niewystarczalnością lub wręcz słabością istniejących systemów transportu zbiorowego, która z kolei wynika zazwyczaj z braku determinacji i konsekwencji w uprzywilejowaniu naziemnych środków transportu zbiorowego. W dyskusjach tych pojawiają się mniej lub bardziej merytoryczne argumenty, lecz zawsze obecna jest kwestia wysokich prędkości przejazdu pociągów metra. I chociaż nikt nie kwestionuje, że metro jest jednym z najszybszych i najbardziej atrakcyjnych środków transportu miejskiego, to jednak już na etapie planowania pojawiają się pewne rozbieżności w ocenie czasu i prędkości przejazdu. Tymczasem czas przejazdu ma fundamentalny wpływ dla podziału zadań przewozowych, zwłaszcza w przypadku tak istotnego dla miasta środka transportu zbiorowego, kojarzonego (zazwyczaj słusznie) z największymi potokami pasażerskimi. Nawet niewielkie różnice czasu przejazdu mogą mieć istotny wpływ na zwiększenie lub zmniejszenie potoków pasażerskich, nie tylko na samej linii metra, ale także na innych liniach komunikacji zbiorowej oraz na ciągach komunikacji indywidualnej, w rozległym obszarze analizy.

W niniejszym referacie podjęto próbę budowy ogólnego modelu czasu przejazdu linii metra, który mógłby być wykorzystywany w przypadku planowania tego typu inwestycji w różnych miastach. Głównym celem badań było poznanie mechanizmu zmian czasu

przejazdu pociągów, oraz budowa modelu służącego do estymacji długości i zmienności czasu przejazdu. W zamierzeniu, taki model mógłby być wykorzystywany w wielu celach.

Zastosowaniem najprostszy będzie szybka (ale wiarygodna) ocena wartości prędkości komunikacyjnej dla każdej osobnej propozycji przebiegu linii metra. Znacznie poważniejszym zastosowaniem będzie natomiast wykorzystanie modelu do estymacji czasu przejazdu linii metra w modelach makrosymulacyjnych całych systemów transportowych. Modele te, oparte głównie na procedurach cztero-stadiowych (np. [1]), służą głównie do określenia potencjalnych efektów ruchowych i ekonomicznych wdrożenia różnych wariantów inwestycji transportowych, w tym planowanych linii metra, oraz wszystkich takich inwestycji, na które przyszła linia metra może mieć wpływ. Tylko takie podejście umożliwi wiarygodne i obiektywne określenie skutków poważnych inwestycji transportowych. Wykorzystanie modelu będzie w tym przypadku polegało na określeniu czasu przejazdu każdego odcinka linii metra oraz określenia czasu postoju pociągu na każdej stacji. Jest to bazowy etap modelowania sieci transportowej, im wyższa będzie dokładność modelu, tym lepsze będą wyniki późniejszych analiz, wykonanych z jego pomocą.

2. Model ogólny czasu przejazdu linii metra

2.1. Struktura modelu czasu przejazdu linii metra

Wykorzystując teorię grafów [2], można ustalić, że kolejne stacje tworzą wierzchołki digrafu prostego, a odcinki między tymi stacjami są łukami digrafu. Z punktu widzenia ogólnej struktury, model czasu przejazdu linii metra [3] nie będzie się różnił od modeli czasu przejazdu innych środków transportu, np. tramwajów czy autobusów, opisanych na przykład w pracach [4] oraz [5]. Natomiast pewne różnice występują na etapie modelowania zdarzeń zachodzących na linii metra. W modelach linii autobusowych czy tramwajowych, rejestrowanymi zdarzeniami są momenty przyjazdu i odjazdu z przystanków, momenty rozpoczęcia i zakończenia wymiany pasażerów, oraz momenty zatrzymania w dowolnych punktach sieci, np. na skrzyżowaniach czy przed przejściami dla pieszych.

W modelu linii metra – liczba zdarzeń może być znacznie ograniczona [6]. W pełni bezkolizyjny przebieg linii oraz pełna (lub przynajmniej bardzo zaawansowana) automatyzacja procesu przejazdu pociągów – sprawiają, że znika potrzeba uwzględniania jakichkolwiek zdarzeń pomiędzy stacjami. Oczywiście mogą one występować (głównie ze względów bezpieczeństwa), lecz są to zdarzenia na tyle rzadkie, że w strukturze modelu można je pominąć. Ich skutki ruchowe będą i tak uwzględnione na etapie estymacji czasu przejazdu poszczególnych odcinków linii. Z kolei zautomatyzowany proces jednoczesnego otwierania i zamykania drzwi pociągu metra podważa sens rozdziału czasu postoju na czas wymiany pasażerów oraz procesy towarzyszące. W efekcie, w budowie modelu uwzględniono tylko dwa rodzaje zdarzeń zachodzących na linii:

- moment zatrzymania pociągu metra na stacji;
- moment odjazdu pociągu metra ze stacji.

Można więc uznać, że struktura modelu czasu przejazdu linii metra będzie się składać z grupy modułów: odcinek między stacjami – stacja znajdująca się na końcu odcinka. Uwzględniane będą zatem tylko dwa procesy ruchu zachodzące na linii:

- czas przejazdu odcinka między stacjami – liczony od momentu odjazdu pociągu z jednej stacji do momentu zatrzymania na stacji kolejnej;
- czas postoju pociągu na stacji – liczony od momentu zatrzymania pociągu na stacji do momentu odjazdu ze stacji.

Ze względu na spodziewane, stosunkowo krótkie czasy trwania kolejnych procesów uznano, że ich długość będzie określana w sekundach. W analizie pominięto także czasy postoju na pierwszej (v_0) i ostatniej (v_p) stacji – nie mające bezpośredniego wpływu na czas przejazdu i czas podróży pasażerów. Pominięto również kwestię wzajemnego powiązania kursów w terminalach końcowych – będzie to temat analiz prowadzonych w przyszłości.

2.2. Postać matematyczna modelu czasu przejazdu linii metra

Postać matematyczna proponowanego modelu ściśle koresponduje z przyjętą ogólną jego strukturą. W ujęciu ogólnym, czas przemieszczania się pociągów linii metra stanowi sumę czasów przejazdu odcinków między stacjami oraz czasów postoju na stacjach (1):

$$T = \sum_{m=1}^p t_{r,m} + \sum_{m=1}^{p-1} t_{s,m} \quad (1)$$

gdzie: T – czas przejazdu całej linii metra [s];

$t_{r,m}$ – czas przejazdu pojedynczego odcinka między stacjami (v_{m-1} , v_m) [s];

$t_{s,m}$ – czas postoju na stacji m [s].

W ujęciu deterministycznym, które dzisiaj jest wykorzystywane w większości rozwiązywanych problemów praktycznych, średni czas przejazdu linii można zapisać jako sumę wartości średnich czasów przejazdu i postoju (2):

$$\bar{T} = \sum_{m=1}^p \bar{t}_{r,m} + \sum_{m=1}^{p-1} \bar{t}_{s,m} \quad (2)$$

Natomiast, w analizach bardziej szczegółowych, w których oprócz skrócenia średniego czasu przejazdu (podróży), pożądanym efektem jest także zmniejszenie rozrzutu czasu przejazdu linii. Zasadne jest więc dodatkowe uwzględnienie składników losowych czasu przejazdu odcinków między stacjami oraz czasów postoju na poszczególnych stacjach. Wówczas zasadne jest rozbudowanie wzoru (1) o składniki losowe, do postaci (3):

$$\tilde{T} = \sum_{m=1}^p (\bar{t}_{r,m} + \hat{t}_{r,m}) + \sum_{m=1}^{p-1} (\bar{t}_{s,m} + \hat{t}_{s,m}) \quad (3)$$

Uwzględnienie dobrze dopasowanych składników losowych, zazwyczaj w niewielkim stopniu wpływa na długość czasu przejazdu całej linii. Jednak możliwość oszacowania rozrzutu czasu przejazdu poprawia jakość modelu oraz zwiększa zakres jego zastosowań.

3. Estymacja parametrów modelu czasu przejazdu linii metra

Estymacji czasu przejazdu odcinków między stacjami oraz czasu postoju na stacjach dokonano w oparciu o wyniki automatycznych pomiarów ruchu na I linii warszawskiego metra [7]. Linia ma długość 21,648 [km], pociągi zatrzymują się na 21 stacjach. Odległości między stacjami wynoszą od 0,577 do 1,534 [km], średni odstęp to 1,082 [km].

W obliczeniach wykorzystano wyniki pomiarów udostępnione przez Zarząd Transportu Miejskiego w Warszawie. Są to wyniki z dwóch przeciętnych dni roboczych (19.11.2013 r. oraz 16.01.2014 r., w których nie zaobserwowano żadnych poważnych zakłóceń ruchu. Pod uwagę wzięto 581 (kierunek: Kabaty – Młociny) oraz 591 (kierunek: Młociny – Kabaty) przejazdów, które odbyły się w okresie od godz. 4:00 do godz. 24:00. Mimo, iż wykorzystano wyniki tylko z dwóch dni, uznano, że są one reprezentatywne dla przeciętnego dnia roboczego pracy warszawskiego metra.

W modelowaniu czasu przejazdu, niezwykle ważne jest odwzorowanie warunków ruchu panujących w określonej porze dnia. Nawet w przypadku linii metra występuje zróżnicowanie czasu przejazdu linii, co wykazano w publikacji [8]. Zaproponowano więc podział dnia roboczego na sześć przedziałów czasu, zróżnicowanych głównie pod względem częstotliwości kursowania pociągów I linii warszawskiego metra:

- okres wczesno-poranny – odjazdy pociągów ze stacji w godz.: 04:00 – 05:59, przybliżony interwał rozkładowy na linii: 4-7 [min];
- okres poranny – odjazdy w godz.: 06:00 – 08:59, interwał: 3 [min];
- okres południowy – odjazdy w godz.: 09:00 – 14:59, interwał: 4 [min];
- okres popołudniowy – odjazdy w godz.: 15:00 – 18:59, interwał: 3 [min];
- okres wczesno-wieczorny – odjazdy w godz.: 19:00 – 20:59, interwał: 4-7 [min];
- okres wieczorny – odjazdy w godz.: 21:00 – 23:59, interwał: 9-10 [min].

Zazwyczaj, modele sieci transportowych są budowane dla godziny szczytu popołudniowego, w którym odbywa się najwięcej podróży. Średni czas przejazdu I linii metra w okresie szczytu popołudniowego wynosi 37,5 [min] (różnica pomiędzy średnimi czasami przejazdu w obu kierunkach to tylko 3 [s]). Oznacza to, że pociągi metra przejeżdżają trasę linii z prędkością komunikacyjną 34,7. Udział czasu jazdy do czasu przejazdu linii wynosi 67,5% (kierunek: Kabaty – Młociny) oraz 68,3% (kierunek przeciwny).

Coraz częściej jednak, buduje się modele także dla okresów poza-szczytowych, w których system transportowy także powinien funkcjonować sprawnie. Najważniejsze, aby model czasu przejazdu linii metra był dopasowany czasowo do modeli czasu przejazdu pozostałych środków transportu, tak aby efekty w postaci przepływów międzygałęziowych były realistyczne. Dlatego w budowie modeli cząstkowych czasu przejazdu odcinka między stacjami oraz czasu postoju na stacji wykorzystano powyższy podział dnia roboczego.

3.1. Estymacja czasu przejazdu odcinka między stacjami

Na czas przejazdu odcinka między stacjami wpływa zdecydowanie mniej czynników, niż ma to miejsce w przypadku naziemnych systemów transportu zbiorowego. Ponieważ odcinki linii metra są w pełni wydzielone, najpoważniejszym czynnikiem wpływającym na długość czasu przejazdu jest długość odcinka [9]. Nieporównywalnie mniejsze znaczenie mają inne czynniki geometryczne, takie jak obecność łuków poziomych oraz pochyłeń podłużnych. Ewentualne zakłócenia czasu przejazdu wynikają zazwyczaj z konieczności przeciwdziałania sytuacjom nietypowym. Do takich należą wydłużone postoje pociągów poprzedzających na stacjach, które są przyczyną zwalniania lub nawet zatrzymań kolejnych pociągów między stacjami. Różnice w czasach przejazdu mogą też wynikać ze stosowanych na bieżąco taktyk sterowania, zwłaszcza w przypadku wysokich częstotliwości kursowania [10] oraz [11]. Nie bez znaczenia jest też stan techniczny torowiska i systemu zasilającego, a także rodzaj zastosowanej nawierzchni [12].

W pierwszej kolejności skupiono się na estymacji średniego czasu przejazdu odcinka między stacjami. Postanowiono sprawdzić jaki wpływ na czas przejazdu ma długość odcinka, a dopiero w przypadku nie uzyskania satysfakcjonującego modelu – wziąć pod uwagę także inne czynniki. W tym celu skorzystano z metod regresji liniowej i nieliniowej.

W przypadku czterech z sześciu rozpatrywanych okresów dnia roboczego, najlepsze dopasowanie modelu średniego czasu przejazdu do średnich czasów przejazdu uzyskanych na podstawie wyników pomiarów wykonanych na I linii warszawskiego metra – uzyskano przy zastosowaniu modelu podwójnie kwadratowego (4):

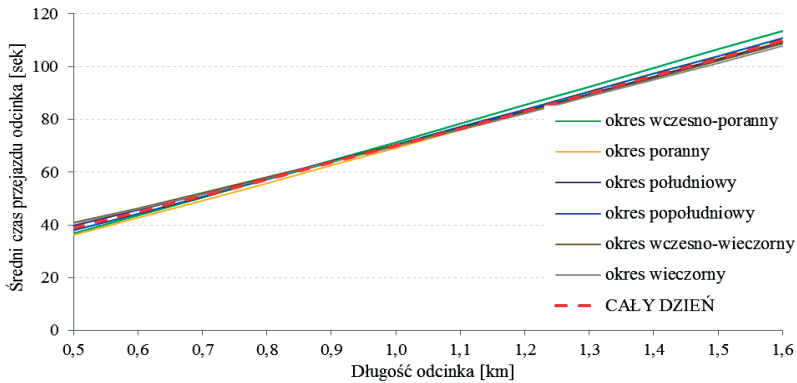
$$\bar{t}_r = \sqrt{(\beta_0 + \beta_L \cdot L^2)} \quad (4)$$

gdzie: \bar{t}_r – średni czas przejazdu odcinka między stacjami [s];

L – długość odcinka między stacjami [km];

β_0, β_L – współczynniki regresji prostej [-].

W pozostałych dwóch przypadkach lepsze dopasowanie zapewniły inne modele, które jednak okazały się tylko nieznacznie lepsze (1-2% wyższe wartości współczynnika determinacji). Ostatecznie zdecydowano, że we wszystkich przedziałach czasu, zostanie wykorzystany model podwójnie kwadratowy. Efekty dopasowania modelu do wyników pomiarów przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Modele zależności czasu przejazdu linii metra od długości odcinka między stacjami dla przyjętych jednolitych okresów dnia roboczego (opracowanie własne)

Porównując modele dla poszczególnych okresów dnia roboczego, można zauważyć bardzo niewielkie różnice w uzyskiwanych średnich czasach przejazdu. Przykładowo, dla odcinka o długości 0,7 [km], maksymalna różnica wynosi zaledwie 3 [s] – w okresie porannym czas przejazdu to 49 [s], podczas gdy w okresach: południowym, wczesno-wieczornym i wieczornym są to 52 [s]. Na odcinku o długości 1,5 [km], średnie czasy przejazdu różnią się o 6 [s] – przyjmują wartości od 101 [s] (okres wieczorny) do 107 [s] (okres wczesno-poranny). Tak niewielka zmienność średnich czasów przejazdu skłoniła do poszukiwania jednej, uniwersalnej formuły, dla całego dnia roboczego. Ma ona postać (5):

$$\bar{t}_r = \sqrt{(363 + 4564 \cdot L^2)} \quad (5)$$

Zależność ta charakteryzuje się bardzo wysoką wartością współczynnika determinacji, wynoszącą aż 98%. Oznacza to, że długość odcinka między stacjami może być uznawana jako jedyny istotny czynnik oddziałujący na średni czas przejazdu tego odcinka, niezależnie od pory dnia roboczego. Oznacza to również, że częstotliwość kursowania pociągów nawet na poziomie 20 [poc./h] nie ma wpływu na średni czas przejazdu odcinka.

Model średniego czasu przejazdu odcinka może być z powodzeniem wykorzystywany w budowie oraz aktualizacji modelu transportowego Warszawy, a po przyjęciu dodatkowych założeń – także w modelach transportowych innych polskich miast.

W modelach mikro-symulacyjnych istnieje możliwość uwzględnienia losowości czasu przejazdu. Wówczas konieczne jest wygenerowanie składników losowych czasu przejazdu poszczególnych odcinków linii. Mogą być one symulowane za pomocą generatora liczb pseudolosowych z rozkładu Normalnego o zerowej wartości średniej i odchyleniu standardowym określonym na podstawie wyników pomiarów (w [s]):

$$\hat{t}_r = N[0; \sigma_r] \quad (6)$$

Wielkość odchylenia standardowego czasu przejazdu odcinka może być wyznaczana jako funkcja długości odcinka. Najlepsze dopasowanie modeli do wyników pomiarów, to:

$$\sigma_r = e^{(\gamma_0 + \gamma_L \cdot L^2)} \quad (7)$$

gdzie: σ_r – odchylenie standardowe czasu przejazdu odcinka między stacjami [s];

L – długość odcinka między stacjami [km];

γ_0, γ_L – współczynniki regresji [-].

Początkowo, zbudowano cząstkowe modele dla wszystkich określonych sześciu jednolitych okresów dnia roboczego. Jednak uzyskane na ich podstawie odchylenia standardowe czasu przejazdu różnią się między sobą w bardzo niewielkim stopniu. W przypadku odcinków o długościach do 1,2 [km] – jest to maksymalnie 1 [s] różnicy, natomiast w przypadku odcinka o długości 1,6 [km] – zaledwie 4 [s]. Dlatego, zdecydowano się na jedną formułę, opisującą zależność odchylenia standardowego czasu przejazdu odcinka od jego długości, reprezentatywną dla całego dnia roboczego (8):

$$\sigma_r = e^{(0,310 + 0,712 \cdot L^2)} \quad (8)$$

Powyższy model nie charakteryzuje się już tak wysoką wartością współczynnika determinacji jak miało to miejsce w przypadku modelu dla wartości średniej – R^2 osiągnęło zaledwie 48%. Jednak z uwagi na fakt, że na omawianej I linii warszawskiej odchylenia standardowe są o rząd wielkości niższe od wartości średnich – model można uznać za satysfakcjonujący i rekomendować do wykorzystania w analizach mikro-symulacyjnych.

3.2. Estymacja czasu postoju pociągu metra na stacji

Czas postoju pociągu metra na stacji ma bardziej zindywidualizowany charakter. Zależy głównie od wielkości potoków pasażerów wysiadających i wsiadających oraz liczby pasażerów znajdujących się w pociągu podjeżdżającym na stację. W przypadku inwestycji nowych, potoki te są dopiero wyznaczane na etapie rozkładu podróży w sieci. Konieczne jest ustalenie choćby wstępnych czasów postoju, które później mogą być weryfikowane procedurą iteracyjną. Ponieważ podczas prowadzenia analiz nie dysponowano wiarygodnymi wielkościami potoków pasażerskich z I linii warszawskiego metra, podjęto próbę zróżnicowania stacji pod względem średniego czasu postoju [8]. Co ciekawe, zaobserwowano związek między długością czasu postoju pociągu na stacji, a lokalizacją tej stacji względem ścisłego centrum miasta. Na tej podstawie określono 3 typy stacji:

- Typ A – stacje zlokalizowane w ścisłym centrum miasta (w przypadku I linii warszawskiej: Ratusz Arsenal, Świętokrzyska, Centrum, Politechnika);
- Typ B – stacje zlokalizowane w otulinie obszaru śródmiejskiego (I linia: Plac Wilsona, Dworzec Gdański, Pole Mokotowskie, Raclawicka, Wierzbno, Wilanowska);
- Typ C – stacje zlokalizowane na pozostałych obszarach miasta (pozostałe stacje).

W tabeli 1 zamieszczono zestawienie wartości średnich oraz odchyłeń standardowych czasów postoju na stacjach typu A, B i C.

Czasy postoju znajdują zastosowanie w modelach makro-symulacyjnych. Natomiast odchylenia standardowe posłużą estymacji składników losowych dla potrzeb bardziej szczegółowych analiz, w skali mikro. Wówczas, składniki losowe czasu postoju (w [s]) mogą być wyznaczane z rozkładu Normalnego o zerowej wartości średniej (9):

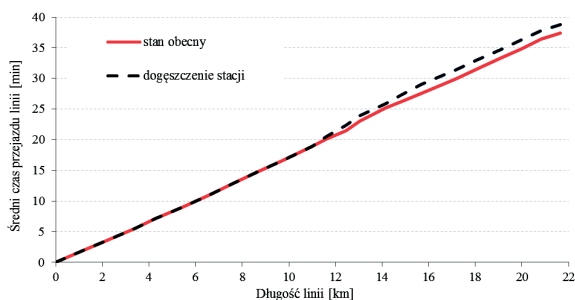
$$\hat{t}_s = N[0; \sigma_s] \quad (9)$$

Tabela 1. Zestawienie wartości średnich i odchyłeń standardowych czasu postoju w różnych okresach dnia.

Typ stacji	Okres wczesno-poranny		Okres poranny		Okres południowy		Okres popołudniowy		Okres wczesno-wieczorny		Okres wieczorny		Cały dzień	
	\bar{t}_s	s_t	\bar{t}_s	s_t	\bar{t}_s	s_t	\bar{t}_s	s_t	\bar{t}_s	s_t	\bar{t}_s	s_t	\bar{t}_s	s_t
A	36	4	47	12	39	6	50	11	38	6	34	4	43	7
B	31	4	38	5	34	3	39	6	33	4	31	3	36	4
C	28	1	32	2	31	2	32	3	30	3	29	2	31	2
wszystkie	31	4	37	8	34	4	38	9	33	5	30	3	35	6

4. Przykład wykorzystania modelu – wpływ dogęszczenia stacji na czas oraz prędkość przejazdu linii metra

Wykorzystanie modelu czasu przejazdu linii metra (jednak tylko w postaci deterministycznej) przedstawiono na przykładzie analizy możliwości dogęszczenia stacji I linii warszawskiego metra. W pierwszej kolejności oceniono zgodność modelu z wynikami pomiarów, a następnie sprawdzono, jakie potencjalne skutki może nieść ze sobą wprowadzenie dwóch dodatkowych stacji: Plac Konstytucji (Typ A, między stacjami: Politechnika i Centrum) oraz Muranów (Typ B, między stacjami: Ratusz Arsenal i Dworzec Gdański). Założono również, że w wyniku dogęszczenia stacja Ratusz Arsenal zmieni typ z A na B. Wyniki przeprowadzonych obliczeń zobrazowano na rysunku 2.



Rys. 2. Porównanie czasu przejazdu linii metra, na kierunku: Kabaty - Młociny (opracowanie własne)

Ewentualne włączenie dwóch dodatkowych stacji spowoduje wydłużenie średniego czasu przejazdu o 1,4 [min], co będzie skutkowało spadkiem średniej prędkości komunikacyjnej z wartości 34,8 [km/h] do poziomu 33,5 [km/h]. Warto nadmienić, że wydłużenie czasu przejazdu linii wynika niemal wyłącznie z dodatkowych czasów postoju.

5. Wnioski końcowe

W referacie omówiono model wyznaczania czasu przejazdu linii metra, którego struktura może być wykorzystywana w modelowaniu dowolnej linii. Model stanowi narzędzie wspomagające modelowanie symulacyjne systemów transportowych w skali makro i mikro. Natomiast wyniki estymacji parametrów modelu mają charakter lokalny i odwzorowują aktualne warunki pracy I linii metra w Warszawie. Średnie czasy przejazdu odcinków między stacjami oraz składniki losowe czasów przejazdu można precyzyjnie wyznaczać na podstawie długości odcinków. Ustalono również, że największy wpływ na dzienną zmienność czasu przejazdu linii metra mają zatrzymania na stacjach. Średnie czasy postoju oraz ich składniki losowe wyznaczono dla trzech podstawowych typów stacji. Analiza czasu postoju będzie kontynuowana z uwzględnieniem wielkości potoków pasażerskich.

Literatura

- 1 Szarata A. Modelowanie symulacyjne potoków pasażerskich jako kluczowe uwarunkowanie planów budowy metra. Materiały konferencyjne: Budownictwo podziemne i bezpieczeństwo w komunikacji drogowej i infrastrukturze miejskiej. AGH, Kraków (2014), s. 135-144.
- 2 Wilson R.J.: Wprowadzenie do teorii grafów. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa (2002).
- 3 Vuchic V.R.: Urban Transit Systems and Technology. John Wiley & Sons, 2007.
- 4 Bauer M.: Simulation Model of a Bus Line in Changing Traffic Conditions; The Fifth International Conference on Advances in System Simulation SIMUL 2013, Venice, s. 29-35.
- 5 Birr K., Jamroz K., Kustra W. Analiza czynników wpływających na prędkość pojazdów transportu zbiorowego na przykładzie Gdańska. Problemy współczesnych systemów logistycznych i transportowych. Prace naukowe - Transport - z. 97. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej (2013), s. 19-29.
- 6 Fenga X., Mao B., Fenga X., Fenga J.: Study on the maximum operation speeds of metro trains for energy saving as well as transport efficiency improvement, Energy, The International Journal, Volume 36, Issue 11, November 2011, pp. 6577–6582.
- 7 <http://www.metro.waw.pl>.
- 8 Bauer M. Analiza zmienności prędkości przejazdu linii metra. Czasopismo Logistyka 2/2014.
- 9 Derrible S., Kennedy Ch.: Network Analysis of World Subway Systems Using Updated Graph Theory. Transportation Research Record, Volume 2112 / 2009, Transit 2009, Vol. 3, pp. 17-25.
- 10 Yang X., Li X., Gao Z., Wang H.: A Cooperative Scheduling Model for Timetable Optimization in Subway Systems, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, Vol. 14.
- 11 Yalçinkaya O., Bayhan G. M.: Modelling and optimization of average travel time for a metro line by simulation and response surface methodology. European Journal of Operational Research, Vol. 196, Issue 1, 2009, pp. 225–233.
- 12 Stypuła K., Kozioł K., Szczepański M., Pęski S., Miros G.: Rozwiązania nawierzchni torowych I linii metra w Warszawie. Inżynieria i Budownictwo, 2009, Tom R. 65, nr 8, s. 429-433.

Underground travel time estimation for macro simulation models, on the example of the first line in Warsaw

Marek Bauer

Department of Transport Systems, Institute of Road and Railway Engineering, Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology, e-mail: mbauer@pk.edu.pl

Abstract: In this paper, the author's model of underground travel time prediction was presented. The structure of the model can be used to estimate the travel time of any underground line in the planning phase. The model takes into account the length and the variability of running time between stations and stopping time at these stations. Partial models of average running time depending on the length of the sections – for six periods of the working day, developed on the basis of measurements on the first underground line in Warsaw were presented. Similar models for the estimation of the standard deviation of running time were also presented. Stopping times for three types of stations, varying in terms of the average stopping time and location of the station in relation to the city center were estimated. Paper presents also a practical example of the use of the model: evaluation of the impact of additional stations on the travel time on the underground line in Warsaw.

Keywords: underground, modelling, simulation model, travel time, running time