

Piotr KISIELEWSKI

Politechnika Krakowska, Zakład Systemów Logistycznych,
31-864 Kraków, Al. Jana Pawła II nr 37
E-mail: pkisielewski@pk.edu.pl

Przemysław TALAREK

Job Investment, Vught, Holandia
E-mail: przemyslaw.talarek@gmail.com

Badania symulacyjne wybranego węzła komunikacyjnego dużego miasta

1 Wstęp

Prawidłowo funkcjonujący transport miejski, składający się z transportu zbiorowego oraz indywidualnego, jest warunkiem koniecznym funkcjonowania miast w sposób prawidłowy. Zatłoczenie na drogach dotkliwie wpływa na naziemny transport zbiorowy, utrudniając jego ruch, co w rezultacie prowadzi do spadku jakości funkcjonowania komunikacji zbiorowej oraz liczby osób z niej korzystających [5].

Ze względów przestrzennych, jak i ekonomicznych przebudowa systemów transportowych miast w dużej mierze jest ograniczona, dlatego proponowanym rozwiązaniem dla wzrostu jakości funkcjonowania komunikacji zbiorowej jest zmiana jej organizacji ruchu [4]. Zmiana ta może odbyć się przez zwiększenie taboru i wprowadzenie nowych połączeń komunikacyjnych, co prowadzi do zmniejszenia czasu oczekiwania pasażerów na pojazd, jednak wiąże się z nakładami finansowymi. Mniej kosztowne jest ograniczanie czasu oczekiwania pasażera przy zachowaniu obecnego taboru. Można to osiągnąć poprzez optymalizację kursów rozkładu jazdy przy użyciu synchronizacji przesiadkowej lub interwałowej [2,3,4]. Zadaniem synchronizacji przesiadkowej jest minimalizacja czasu oczekiwania pasażerów w punktach przesiadkowych poprzez ustalanie czasów odjazdu pojazdów z przystanku początkowego. Synchronizacja interwałowa ma za zadanie wyrównać odstępy w czasie pomiędzy pojazdami linii kursujących na wspólnym odcinku trasy oraz ograniczyć możliwość przyjazdu kilku pojazdów na ten sam przystanek w tym samym czasie [1,4,6].

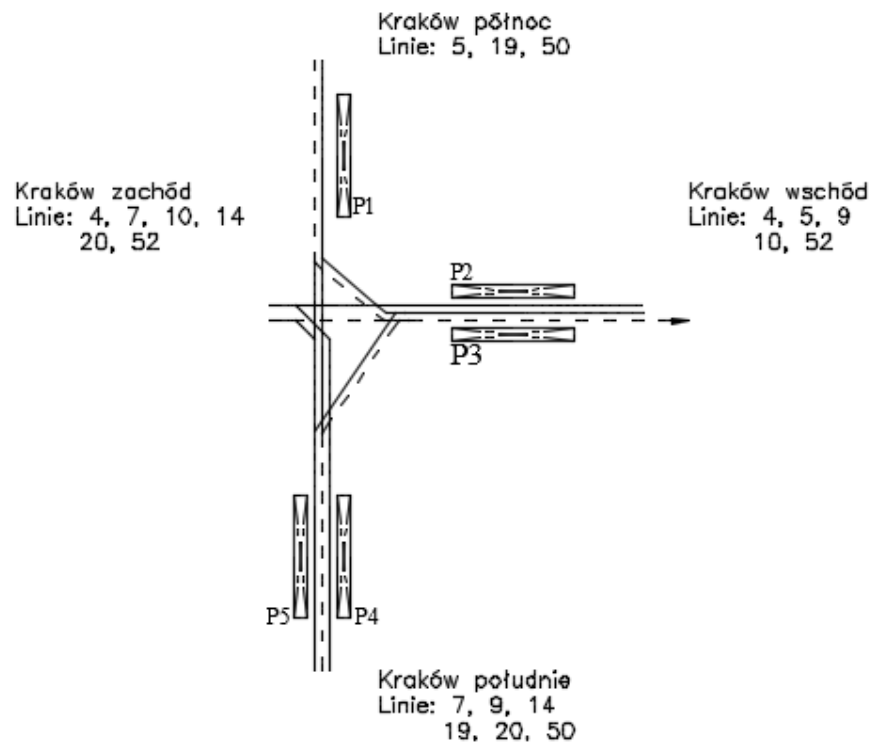
Celem przeprowadzonych badań jest ograniczenie łącznego czasu oczekiwania pasażerów na najwcześniejszy pojazd w kierunku Nowej Huty od chwili przybycia pasażerów na przystanek Rondo Mogiłskie w Krakowie, przy zastosowaniu synchronizacji interwałowej planowych kursów tramwajowych linii 4, 5, 9, 10 i 52 dla popołudniowego szczytu komunikacyjnego przy użyciu algorytmu napisanego w języku programowania Python wersja 3.6.0, z użyciem środowiska programistycznego pycharm-community wersja 2016.3.2.

Węzeł komunikacyjny Rondo Mogiłskie jako obiekt badań został wybrany ze względu na jego lokalizację oraz ilość obszarów miasta, do których jest w stanie dostać się pasażer z tego przystanku. Natomiast kierunek Nowej Huty został wybrany

na podstawie najdłuższego wspólnego odcinka dla linii tramwajowych, które kursują przez ten węzeł.

2 Schemat badanego obiektu

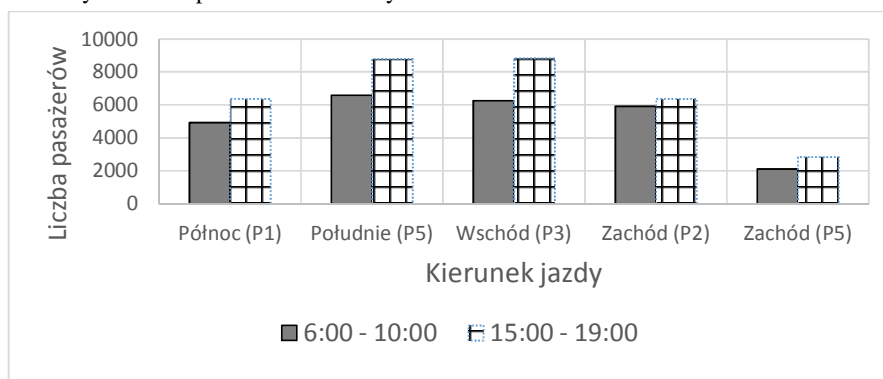
Rondo Mogilskie, jeden z najważniejszych węzłów komunikacyjnych w Krakowie, zlokalizowane jest w centralnej części miasta u zbiegu ulic Mogilskiej, al. Powstania Warszawskiego, Lubicz, Aleksandra Lubomirskiego oraz al. płk. Władysława Beliny-Prażmowskiego. Obiekt jest skrzyżowaniem dwupoziomowym. Transport indywidualny i autobusowy dzienny odbywa się po wiaduktach, a transport autobusowy nocny i tramwajowy przeprowadzony jest przez plac dolny. Schemat obiektu dla komunikacji tramwajowej został przedstawiony na rysunku 1. Przystanek, na którym oczekują pasażerowie, został oznaczony jako „P3”, a trasy wybranych linii zostały wyróżnione za pomocą przerywanej linii.



Rys. 1. Schemat węzła komunikacyjnego Rondo Mogilskie dla komunikacji tramwajowej
Fig. 1. Scheme of transit node Rondo Mogilskie for tram network

Obecnie Rondo Mogilskie jest przystankiem węzłowym dla 25 linii autobusowych i tramwajowych, łączących wszystkie dzielnice Krakowa z wyjątkiem Swoszowic. Maksymalna liczba wykonywanych kursów w ciągu dnia roboczego na podstawie rozkładów jazdy MPK Kraków z listopada 2016 wynosi 2356 (linie tramwajowe - 1268,

linii autobusowe - 1088). W oparciu o obserwację przystanku węzłowego Rondo Mogiłskie wielkość potoków pasażerskich w wybranym kierunku i przedziale czasowym została przedstawiona na rysunku 2.



Rys. 2. Wielkość potoków pasażerskich na Rondzie Mogiłskim

Fig. 2. Size of passenger flows at Rondo Mogiłskie

3 Model matematyczny i badania symulacyjne obiektu

Celem niniejszych badań jest zaproponowanie zmiany rozkładu jazdy linii tramwajowych nr 4, 5, 9, 10 i 52 tak, aby łączny czas oczekiwania pasażerów na pojazd od chwili przybycia pasażera na przystanek był jak najkrótszy, jednocześnie utrzymując koszty operatora transportu zbiorowego na obecnym poziomie.

W celu przeprowadzenia badań niezbędne jest sformułowanie modelu matematycznego, który pozwoli na ocenę proponowanych zmian w funkcjonowaniu węzła komunikacyjnego. Wielkością opisującą funkcjonowanie przystanku komunikacyjnego jest łączny czas oczekiwania wszystkich pasażerów na pojazd określony wzorem (1). W pracy ograniczono się do badań popołudniowego szczytu komunikacyjnego, tj. czasu między godziną 15:00 a 19:00.

$$\lambda^l = \sum_{n=1}^{l_{wk}+1} \lambda_n^l \quad [\text{pm}] \quad (1)$$

gdzie:

λ_l – łączny czas oczekiwania pasażerów na najwcześniejszy kurs od chwili ich przybycia na przystanek przed wprowadzeniem zmian w funkcjonowaniu węzła w pasażerominutach, [pm],

l_{wk} – liczba wszystkich kursów odbywających się w stronę Nowej Huty między godziną 15:00 a 19:00,

n – numer kursu,

λ_n^l – czas oczekiwania pasażerów na najwcześniejszy kurs od chwili ich przybycia na przystanek przed wprowadzeniem zmian w funkcjonowaniu węzła [pm].

Funkcją celu podlegającą minimalizacji jest łączny czas oczekiwania pasażerów na najwcześniejszy kurs od chwili ich przybycia na przystanek po wprowadzeniu zmian w funkcjonowaniu węzła Rondo Mogiłskie. Funkcja ta została opisana wzorem (2).

$$\lambda^{II} = \sum_{n=1}^{l_{wk}+1} \lambda_n^{II} \quad [\text{pm}] \quad (2)$$

gdzie:

λ_n^{II} – czas oczekiwania pasażerów na najwcześniejszy kurs od chwili ich przybycia na przystanek po wprowadzeniu zmian w funkcjonowaniu węzła [pm].

Ograniczenia, jakie obowiązują podczas poszukiwania minimum funkcji celu, to:

- 1) liczba wszystkich kursów realizowanych w stronę Nowej Huty nie może zostać zmieniona, $l_{wk}=\text{const}$,
- 2) w tym samym czasie nie mogą zostać zaplanowane odjazdy kilku pojazdów,
- 3) pojazdy tylko jednej linii mogą jeździć ze zmiennym modułem częstotliwości,
- 4) kurs pierwszego pojazdu powinien być zaplanowany na godzinę 15:00, a kurs ostatniego na godzinę 19:00.

Do opisu czasu odjazdu każdego pojazdu z przystanku węzłowego na potrzeby wykonania stosownych obliczeń symulacyjnych przyjęto stosowanie liczb całkowitych w odniesieniu do czasu trwania obserwacji. Dla przykładu: j -ty kurs i -tej linii odbył się o godzinie 15:10 i była to 11 minuta obserwacji, więc został zapisany jako $k_{ij}=11$ [min].

Kryterium oceny zmienionego rozkładu jazdy jest stosunek łącznego czasu oczekiwania pasażerów przed i po wprowadzeniu zmian, opisany wzorem (3). Wartość tego kryterium mówi, o ile procent zostało poprawione funkcjonowanie wybranego węzła komunikacyjnego przy utrzymaniu kosztów na tym samym poziomie.

$$\Lambda = 100 \left(1 - \frac{\lambda^{II}}{\lambda^I} \right) \quad [\%] \quad (3)$$

gdzie: Λ – kryterium oceny zmienionego rozkładu jazdy [%].

4 Wykaz definicji

Poniżej podano wykaz definicji podstawowych pojęć wykorzystanych w badaniach.

Łączny czas obserwacji T [min] – suma minut, między rozpoczęciem, a zakończeniem obserwacji węzła komunikacyjnego.

Linia – połączenie komunikacyjne na określonej trasie między przystankami wskazanymi w rozkładzie jazdy, po której odbywają się regularne przewozy osób [4].

Kurs k_{ij} [min] – czas odjazdu j -tego pojazdu i -tej linii z przystanku.

Kurs u_n [min] – czas odjazdu n -tego pojazdu z przystanku na podstawie kursów k_{ij} uporządkowanych od kursu najwcześniejszego do najpóźniejszego.

Moduł częstotliwości m_i [min] – odstęp w czasie między kolejnymi kursami tej samej linii.

Odstępstwo od modułu częstotliwości Δm_i [min] – wartość, o jaką może być modyfikowany moduł częstotliwości i -tej linii m_i w celu minimalizacji funkcji celu.

Takt β_n [min] - dla $n=1$ – odstęp w czasie między rozpoczęciem obserwacji a odjazdem pierwszego pojazdu z przystanku w trakcie obserwacji;
 dla $1 < n \leq l_{wk}$ – odstęp w czasie między kursem u_n a kursem u_{n-1} ;
 dla $n=l_{wk}+1$ – odstęp w czasie między zakończeniem obserwacji a odjazdem ostatniego pojazdu z przystanku w trakcie obserwacji. Takt β_n został opisany wzorem (4).

$$\beta_n = \begin{cases} u_{n-1} & \text{dla } n = 1 \\ u_n - u_{n-1} & \text{dla } 1 < n \leq l_{wk} \\ T - u_{n-1} & \text{dla } n = l_{wk} + 1 \end{cases} \quad (4)$$

Intensywność napływu pasażerów α [lp/min] – średnia lub oczekiwana liczba pasażerów przybywająca na przystanek przypadająca na jednostkę czasu, wyrażana w liczbie pasażerów na minutę. W celu przedstawienia intensywności napływu pasażerów w sposób liczbowy niezbędne jest przyjęcie modelu opisującego przybywanie pasażerów na przystanek. W związku z tym przyjęto, że intensywność napływu pasażerów jest znana i przyjmuje ona dwa warianty [6]:

- stały w czasie, oznaczony jako α ,
- zmienny w czasie, oznaczony jako $\alpha(t)$.

Czas oczekiwania pasażerów na najwcześniejszy kurs od chwili ich przybycia na przystanek λ_n [pm] – wartość określająca, ile czasu będą oczekiwać pasażerowie na najwcześniejszy kurs od chwili ich przybycia na przystanek, wyrażana w pasażerominutach [pm]. Wielkość λ_n oblicza się, sumując iloczyny liczby pasażerów i minut, jakie zostały do najwcześniejszego kursu od chwili ich przybycia na przystanek. Dla stałej intensywności napływu pasażerów korzystamy ze wzoru (5), natomiast dla zmiennej intensywności w czasie korzystamy ze wzoru (6), sformułowanego podobnie jak w pracy [6].

$$\lambda_n = \sum_{q=1}^{\beta_n} (\alpha_p q) \quad [\text{pm}] \quad (5)$$

gdzie:

α_p – liczba pasażerów oczekująca q minut [lp],

q – czas oczekiwania pasażera na najwcześniejszy kurs od chwili przybycia [min].

$$\lambda_n = \begin{cases} \int_1^{u_n} (u_n - t) \alpha(t) dt, & \text{dla } n = 1 \\ \int_{u_{n-1}}^{u_n} (u_n - t) \alpha(t) dt, & \text{dla } 1 < n \leq l_{wk} \\ \int_{u_{l_{wk}}}^T (T - t) \alpha(t) dt, & \text{dla } n = l_{wk} + 1 \end{cases} \quad (6)$$

gdzie:

u_{n-1} – czas odjazdu poprzedniego ($n-1$) pojazdu z obserwowanego przystanku [min],

$u_{l_{wk}}$ – czas odjazdu ostatniego pojazdu z przystanku w trakcie obserwacji [min],

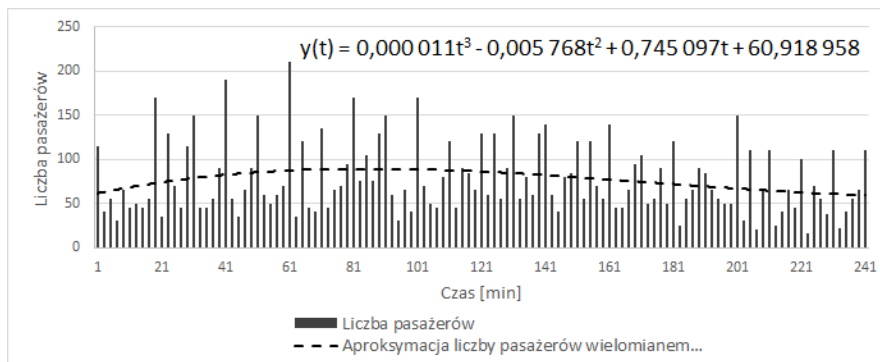
$u_n - t$ – czas oczekiwania pasażera na najbliższy kurs od chwili przybycia na przystanek [min].

Łączny czas oczekiwania pasażerów podczas obserwacji λ [pm] – wartość określająca, ile czasu łącznie będą oczekiwać wszyscy pasażerowie na najwcześniejszy kurs od chwili ich przybycia na przystanek, wyrażana w pasażerominutach [pm]. Wielkość tę oblicza się sumując wszystkie wartości λ_n według wzoru (7)

$$\lambda = \sum_{n=1}^{l_{wk}+1} \lambda_n \text{ [pm]} \quad (7)$$

5 Intensywność napływu pasażerów

W listopadzie 2016 roku dokonano obserwacji kursowania pojazdów tramwajowych odjeżdżających z wybranego węzła komunikacyjnego w kierunku Nowej Huty. Dzięki obserwacjom pozyskano dane o potokach pasażerskich w węźle komunikacyjnym Rondo Mogiłskie w okresie popołudniowego szczytu komunikacyjnego. Na ich podstawie sporządzono wykres oraz dokonano aproksymacji liczby pasażerów w czasie za pomocą wielomianu trzeciego stopnia w programie Microsoft Excel. W ten sposób otrzymano wzór (8) aproksymujący liczbę pasażerów podróżujących w stronę Nowej Huty. Do wyznaczenia intensywności napływu pasażerów zmiennej w czasie opisanej wzorem (9) posłużono się funkcją pochodnej z funkcji określonej wzorem (8).



Rys. 3. Potoki pasażerskie w stronę Nowej Huty między godziną 15:00 a 19:00

Fig. 3. Passenger flows towards Nowa Huta between 3 pm and 7 pm

$$y(t) = 0,000011t^3 - 0,005768t^2 + 0,745097t + 60,918958 \text{ [lp]} \quad (8)$$

$$\alpha(t) = \frac{d}{dt}y(t) = 0,0000333t^2 - 0,011536t + 0,745097 \text{ [lp/min]} \quad (9)$$

Przyjmując do obliczeń stałą intensywność napływu pasażerów, uproszczono model matematyczny w celu przedstawienia teoretycznej różnicy w funkcji celu przed i po wprowadzeniu zmian w funkcjonowaniu wybranych linii tramwajowych. Przyjęto wartość stałej intensywności napływu pasażerów do obliczeń $\alpha = 1$ [lp/min]. Jeżeli intensywność napływu pasażerów zostałaby x-krotnie zwiększona, wtedy wyniki dla czasu oczekiwania pasażerów wzrosłyby x-krotnie.

Przyjmując zmienną intensywność napływu pasażerów w czasie, wynik symulacji jest w dużej mierze zależny od liczby pasażerów zarejestrowanych w czasie dokonywania pomiarów potoków pasażerskich. Błąd pomiaru w trakcie liczenia pasażerów powoduje zmianę wzoru (8), co dalej istotnie rzutuje również na funkcję intensywności napływu pasażerów $\alpha(t)$.

6 Algorytm obliczeniowy

Minimum funkcji celu opisanej wzorem (2) otrzymujemy na podstawie algorytmu iteracyjnego, którego zadaniem jest:

- 1) przyjęcie wartości początkowych,
- 2) obliczenie łącznego czasu oczekiwania pasażerów dla stałej i zmiennej intensywności ich napływu,
- 3) przypisanie nowego czasu odjazdu pierwszego pojazdu każdej linii, przyjmując, że czas odjazdu jest liczbą naturalną z zakresu $\langle 1, m_i \pm \Delta m_i \rangle$ i nie może się powtarzać,
- 4) obliczenie łącznego czasu oczekiwania pasażerów dla stałej i zmiennej intensywności ich napływu dla nowych danych,
- 5) wykonanie kroku 3) – 4) do momentu wykorzystania założonej liczby iteracji (120 000) lub braku poprawy wartości minimalnej łącznego czasu oczekiwania pasażerów przez założoną liczbę iteracji,
- 6) obliczenie wartości funkcji poprawy rozkładu jazdy dla stałej i zmiennej intensywności napływu pasażerów.

Po otrzymaniu wyników dotyczących zmienionych czasów jazdy dla stałej i zmiennej intensywności napływu pasażerów należy wybrać jeden z wariantów i dla niego przedstawić nowy rozkład jazdy.

7 Dyskusja wyników symulacji

Otrzymane wyniki dotyczące łącznego czasu oczekiwania pasażerów na pojazd oraz wielkości możliwej poprawy zostały umieszczone w tabeli 1.

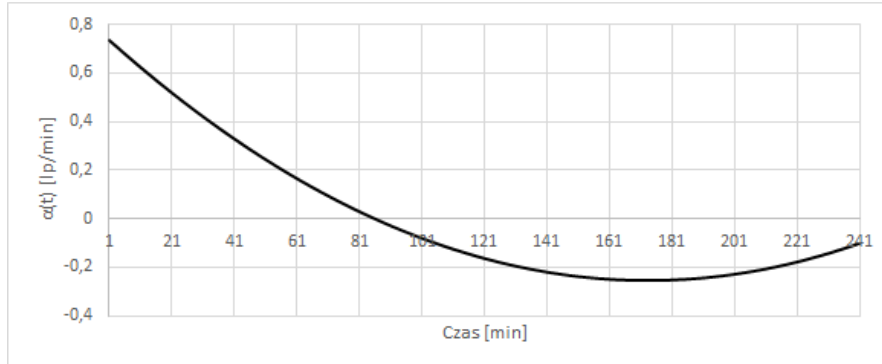
Tab. 1. Tabela wyników

Tab. 1. Results table

| | | |
|---------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Przed wprowadzeniem zmian | $\alpha = \text{const}$ | $\lambda^I = 384$ [pm] |
| | $\alpha = \alpha(t)$ | $\lambda^I = -1.003$ [pm] |
| Po wprowadzeniu zmian | $\alpha = \text{const}$ | $\lambda^{II} = 360$ [pm] |
| | $\alpha = \alpha(t)$ | $\lambda^{II} = -4.278$ [pm] |
| Wielkość poprawy | $\alpha = \text{const}$ | $\Lambda = 6.25$ [%] |
| | $\alpha = \alpha(t)$ | $\Lambda = -426.8$ [%] |

W przypadku przyjęcia stałej intensywności napływu pasażerów łączny czas ich oczekiwania został zmniejszony o 6.25% przy zachowaniu liczby wszystkich kursów realizowanych w stronę Nowej Huty.

Dla intensywności napływu pasażerów zmiennej w czasie otrzymane wyniki odbiegają od wartości oczekiwanych. Zarówno przed, jak i po wprowadzeniu zmian w czasie odjazdu każdego pojazdu łączny czas oczekiwania pasażerów na pojazd przyjął wartość ujemną. Przyczyną takich wyników była przyjęta funkcja dla zmiennej intensywności napływu pasażerów opisana wzorem (9). Po podstawieniu do tego wzoru wartości z zakresu $[1, T]$ otrzymano wykres intensywności napływu pasażerów, który został przedstawiony na rysunku 4.



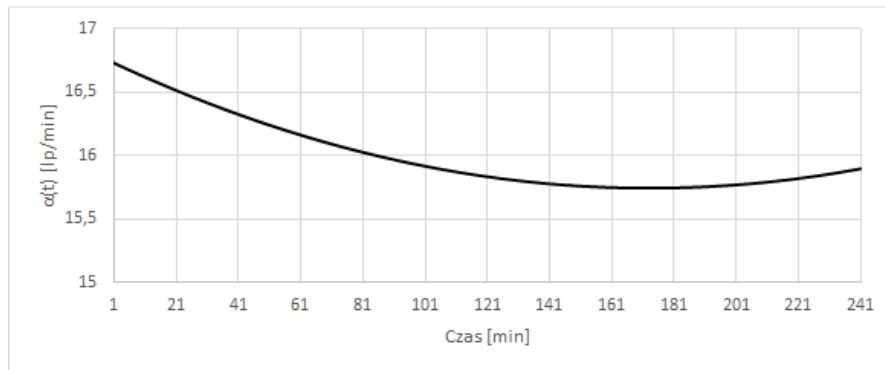
Rys. 4. Zmienna w czasie intensywność napływu pasażerów przyjęta do obliczeń

Fig. 4. Variable over time intensity of arriving passengers chosen for the calculations

Jak widać na rysunku 4, intensywność napływu pasażerów przyjmuje wartości dodatnie jedynie w niewielkim zakresie, do około 90 minuty obserwacji.

W ramach pracy dokonano korekty funkcji opisującej intensywność napływu pasażerów zmiennej w czasie o najmniejszą liczbę zarejestrowanych pasażerów podróżujących w wybranym kierunku, tu równą 16 [lp], otrzymując wzór zmodyfikowany w postaci (10). Założenie tej modyfikacji mówi, że liczba pasażerów czekających na tramwaj jest równa najmniejszej liczbie zarejestrowanych pasażerów podczas obserwacji, powiększona o wyznaczoną intensywność napływu pasażerów w przedziale czasu. Do tak zmienionej funkcji intensywności $\alpha(t)$ podstawiono wartości z zakresu $[1, T]$ i sporządzono wykres funkcji przedstawiony na rysunku 5.

$$\alpha(t) = \frac{d}{dt}y(t) = 0,0000333t^2 - 0,011536t + 0,745097 + 16 \left[\frac{\text{lp}}{\text{min}} \right] \quad (9)$$



Rys. 5. Zmienna w czasie intensywność napływu pasażerów na podstawie wzoru 10

Fig. 5. Variable over time intensity of arriving passengers based on equation 10

W przypadku intensywności napływu pasażerów opisanej wzorem (10) żadna jej wartość w przedziale czasu $[1, T]$ nie jest ujemna. Dla tak wyznaczonej intensywności napływu pasażerów obliczono łączny czas oczekiwania pasażerów, a następnie porównano otrzymane wyniki z wartościami umieszczonymi w tabeli 1. Porównane wyniki przedstawia tabela 2.

Tab. 2. Porównanie wyników dla zmiennej w czasie intensywności napływu pasażerów

Tab. 2. Results comparison for variable over time intensity of arriving passengers

| | | |
|-------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Przed modyfikacją $\alpha(t)$ | $\lambda^I = -1.003$ [pm] | $\Lambda = -426.8$ [%] |
| | $\lambda^{II} = -4.278$ [pm] | |
| Po modyfikacji $\alpha(t)$ | $\lambda^I = 4222.997$ [pm] | $\Lambda = 9.06$ [%] |
| | $\lambda^{II} = 3839.386$ [pm] | |

Wyniki przedstawione w tabeli 2 świadczą o wpływie, jaki ma liczba zarejestrowanych pasażerów podczas obserwacji, na podstawie której wyznaczono wzór na zmienną w czasie intensywność napływu pasażerów. Biorąc to pod uwagę, nowy rozkład jazdy dla linii 4, 5, 9, 10 i 52 jadących w stronę Nowej Huty został zaproponowany na podstawie wyników otrzymanych dla stałej intensywności napływu pasażerów. Z racji cykliczności proponowanego rozkładu jazdy w artykule przedstawiono część rozkładu dla jednej godziny w tabeli 3.

Tab. 3. Fragment godzinny proponowanego rozkładu jazdy

Tab. 3. The hourly part of proposed timetable

| Linia | Godzina odjazdu z Ronda Mogilskiego (15:00 - 16:00) | | | | | |
|-------|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| 4 | 15:08:00 | 15:18:00 | 15:28:00 | 15:38:00 | 15:48:00 | 15:58:00 |
| 5 | 15:02:00 | 15:22:00 | 15:42:00 | 16:02:00 | 16:22:00 | 16:42:00 |
| 9 | 15:06:00 | 15:16:00 | 15:26:00 | 15:36:00 | 15:46:00 | 15:56:00 |
| 10 | 15:12:00 | 15:32:00 | 15:52:00 | 16:12:00 | 16:32:00 | 16:52:00 |
| 52 | 15:00:00 | 15:04:00 | 15:10:00 | 15:14:00 | 15:20:00 | 15:24:00 |
| | 15:30:00 | 15:34:00 | 15:40:00 | 15:44:00 | 15:50:00 | 15:54:00 |
| | 16:00:00 | 16:04:00 | 16:10:00 | 16:14:00 | 16:20:00 | 16:24:00 |

8 Wnioski

W badaniach symulacyjnych czasu oczekiwania pasażerów na pojazd od chwili ich przybycia na przystanek wykazano, że przyjęcie różnej intensywności napływu pasażerów istotnie wpływa na otrzymane wyniki. Problem jest prostszy, jeśli wyniki obserwacji dopuszczają przyjęcie stałej intensywności napływu pasażerów. Wartość ta powinna z możliwie najmniejszym błędem odzwierciedlać średnią napływu pasażerów w czasie. Dla intensywności napływu pasażerów zmiennej w czasie konieczne jest opisanie jej za pomocą funkcji. W pracy została ona opisana za pomocą pochodnej funkcji uzyskanej na podstawie aproksymacji wielomianem trzeciego stopnia liczby podróżujących pasażerów, skorygowanej następnie według wartości minimalnej liczby zarejestrowanych oczekujących pasażerów.

W wyniku badań symulacyjnych możliwe było zaproponowanie nowej wersji zmienionego rozkładu jazdy. Nowy proponowany rozkład jazdy pozwala na ograniczenie łącznego czasu oczekiwania pasażerów na pojazd o 6.25% oraz ograniczenie maksymalnego czasu oczekiwania na tramwaj z trzech do dwóch minut.

Prezentowane badania symulacyjne i wykorzystanie nowoczesnych programów komputerowych do planowania transportu miejskiego [2,3,4] są przykładem możliwości istotnej poprawy funkcjonowania komunikacji miejskiej w wyniku optymalnego planowania transportu, bez kosztownych inwestycji w liczebność taboru.

Literatura

1. Adamski A.: *Inteligentne systemy transportowe: sterowanie, nadzór i zarządzanie*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2003
2. Kisielewski P.: Wspomaganie logistyki transportu miejskiego z wykorzystaniem techniki informatycznej, *Prace Naukowe Transport z.115*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2017
3. Kisielewski P.: Model zarządzania logistycznego w komunikacji miejskiej, *Studia i Materiały. Miscellanea Economicae* Rok 20, nr 1/2016
4. Kisielewski P.: Nowoczesna platforma projektowa i integracyjna systemów IT w transporcie zbiorowym; *Transport miejski i regionalny* 05/2016

5. Sambor A.: *Możliwości poprawy jakości komunikacji miejskiej metodami inżynierii ruchu*, dostęp z dnia 25.11.2016, <http://katedr.republika.pl/hmozl.htm>
6. Sroka R.: *Problem synchronizacji interwałowej w miejskiej komunikacji publicznej*, rozprawa doktorska, Wrocław 2005
7. Ustawa z dnia 6 września 2001 r. o Transporcie Drogowym, Dz. U. 2001, nr 125, poz. 1371

Streszczenie

Obiektem badań był wybrany węzeł komunikacyjny dużego miasta. Cel pracy stanowiło opracowanie propozycji zmiany rozkładu jazdy kursów tramwajowych celem minimalizacji czasu oczekiwania pasażerów. W pracy przeprowadzono pomiary potoków pasażerskich dla aktualnego rozkładu jazdy tramwajów. Na podstawie obserwacji dokonano aproksymacji intensywności napływu pasażerów w czasie. W pracy sformułowano model matematyczny obiektu, funkcję celu optymalizacji i ograniczenia. Opracowano oryginalny algorytm symulacyjny, w którym kryterium oceny zmienionego rozkładu jazdy był stosunek łącznego czasu oczekiwania pasażerów przed i po wprowadzeniu zmian kursów rozkładowych pociągów tramwajowych. W podsumowaniu pracy sformułowano wnioski z badań.

Słowa kluczowe: komunikacja miejska, rozkład jazdy, optymalizacja, czas oczekiwania pasażerów

Simulation research of the chosen urban transit node in a large city

Summary

This paper describes the process of carrying out simulation researches of the communication node in big city in order to achieve explicit target. Chosen urban transit node has formed the object of investigation. The elaboration of proposal of the change of tramway trip time table has been the aim of the work targeting minimization of the passenger waiting time. In the work the measurement of the passenger streams has been carried out for the actual tramway time table. Based on these observations the approximation of passenger flows in time has been completed. In the paper mathematical model of the object, optimization objective function and constrains have been formulated. The original simulation algorithm in which the ratio of total passenger waiting time before and after introduction of tramway trip time table change has been the evaluation criterion. The concluding remarks from the research has been formulated at the end.

Keywords: city transit, time table, optimization, passenger waiting time

