



POLITECHNIKA KRAKOWSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
KATEDRA SYSTEMÓW TRANSPORTOWYCH
I LOGISTYCZNYCH

ERRATO DO ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**Synchronizacja rozkładów jazdy w systemie transportu publicznego
z wykorzystaniem algorytmów genetycznych**

Autor: **mgr inż. Daniel Kapica**
Promotor: **dr hab. inż. Vitalii Naumov, prof. PK**

Kraków, 2026

Niniejsza errata została sporządzona w odpowiedzi na uwagi recenzentów rozprawy doktorskiej, w szczególności na wniosek o wprowadzenie erraty przed obroną, sformułowany w recenzji prof. dr hab. inż. Marianny Jacyny, oraz na uwagi merytoryczne i redakcyjne zawarte w recenzjach dr hab. inż. Renaty Żochowskiej, prof. PŚ i dr. hab. inż. Norberta Chamier-Gliszczyńskiego, prof. PK. Errata obejmuje uzupełnienie rozprawy o tytuły rozdziałów, doprecyzowanie i ujednolicenie zapisu modelu matematycznego w rozdziale II (w tym opisu danych, wielkości poszukiwanych, układu ograniczeń oraz zapisu funkcji kryterium), a także korekty redakcyjne i edytorskie.

Poprawki zestawiono w układzie pozycyjnym. Dla każdej pozycji wskazano lokalizację (rozdział, stronę i/lub numer wzoru) oraz, tam gdzie to zasadne, brzmienie dotychczasowe („Było”) i brzmienie po korekcie („Jest”). Numeracja wzorów odpowiada numeracji przyjętej w rozprawie.

1. Uzupełnienie tytułów rozdziałów

Rozprawę uzupełnia się o tytuły rozdziałów głównych, oznaczonych w dotychczasowej wersji wyłącznie numerami (Rozdział I, Rozdział II, Rozdział III, Rozdział IV). Przyjmuje się następujące brzmienie tytułów:

Rozdział	Tytuł
Rozdział I	Analiza stanu istniejącego w obszarze synchronizacji rozkładów jazdy w publicznym transporcie zbiorowym
Rozdział II	Model symulacyjny funkcjonowania systemu publicznego transportu zbiorowego oraz podejście do rozwiązania problemu synchronizacji rozkładów jazdy
Rozdział III	Model sieci publicznego transportu zbiorowego jako podstawa do badań eksperymentalnych
Rozdział IV	Uzasadnienie wartości parametrów algorytmu genetycznego gwarantujących najlepsze wyniki synchronizacji rozkładów jazdy

2. Ujednolicenie celu pracy

W celu zachowania spójności w opisie celu pracy poprawia się czwarty akapit streszczenia w następujący sposób:

Lokalizacja/ Strona	Było	Jest
Streszczenie, strona 3.	Rozdział czwarty rozpoczyna przełożenie terminologii algorytmów genetycznych na zagadnienia transportowe. Następnie opisano przeprowadzony eksperyment oraz szczegółowo przedstawiono jego plan i wykonywane czynności mające na celu znalezienie możliwie optymalnych parametrów algorytmu genetycznego wykorzystanego do synchronizacji rozkładów jazdy w publicznym transporcie zbiorowym.	Rozdział czwarty rozpoczyna przełożenie terminologii algorytmów genetycznych na zagadnienia transportowe. Następnie opisano przeprowadzony eksperyment oraz szczegółowo przedstawiono jego plan i wykonywane czynności mające na celu znalezienie i uzasadnienie wartości parametrów algorytmu genetycznego (rozmiaru populacji, liczby generacji oraz prawdopodobieństwa mutacji) gwarantujących najlepsze wyniki synchronizacji rozkładów jazdy w systemie publicznego transportu zbiorowego.
Cel i zadania, strona 9.	Celem pracy jest znalezienie uzasadnienie wartości parametrów algorytmu genetycznego synchronizującego rozkłady jazdy.	Celem pracy jest znalezienie i uzasadnienie wartości parametrów algorytmu genetycznego synchronizującego rozkłady jazdy.
Cel i zadania, strona 10.	zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentu obliczeniowego w celu zbadania wpływu stosowanych parametrów algorytmu genetycznego na efektywność procedury synchronizacji rozkładów jazdy	zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentu obliczeniowego w celu znalezienia i uzasadnienia wartości parametrów algorytmu genetycznego synchronizującego rozkłady jazdy.
Rozdział IV, strona 84.	Celem niniejszej pracy jest znalezienie możliwie optymalnych parametrów algorytmu genetycznego rozwiązującego problem synchronizacji rozkładów jazdy.	Celem niniejszej pracy jest znalezienie i uzasadnienie wartości parametrów algorytmu genetycznego synchronizującego rozkłady jazdy.

Podsumowanie, strona 127.	Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwoliły zrealizować główny cel pracy, jakim było opracowanie i przetestowanie metody synchronizacji rozkładów jazdy w systemie publicznego transportu zbiorowego z wykorzystaniem algorytmu genetycznego.	Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwoliły zrealizować główny cel pracy, jakim było znalezienie i uzasadnienie wartości parametrów algorytmu genetycznego synchronizującego rozkłady jazdy
------------------------------	--	--

3. Doprecyzowanie zapisu modelu matematycznego (rozdział II)

W rozdziale II doprecyzowuje się zapis modelu matematycznego poprzez:

3.1 Poprawa tytułu rozdziału 2.1

Lokalizacja/ Strona	Było	Jest
Tytuł rozdziału 2.1, strona 55	Model sieci publicznego transportu zbiorowego.	Model systemu publicznego transportu zbiorowego
Rozdział 2.1, strona 66.	Na najwyższym poziomie sieć publicznego transportu zbiorowego Ω można przedstawić jako zbiór zawierający zbiór Λ zawierający w sobie linie publicznego transportu zbiorowego oraz zbiór D zawierający w sobie pasażerów korzystających z publicznego transportu zbiorowego w celu zaspokojenia swoich potrzeb transportowych.	Na najwyższym poziomie system publicznego transportu zbiorowego Ω można przedstawić jako zbiór zawierający zbiór Λ zawierający w sobie linie publicznego transportu zbiorowego oraz zbiór D zawierający w sobie pasażerów korzystających z publicznego transportu zbiorowego w celu zaspokojenia swoich potrzeb transportowych.

3.2 Poprawa wzorów

We wzorze szóstym loryguje się błędny opis elementu $N_{L(i)}$: jest to liczba, a nie numer odcinków międzyprzystankowych i -tej linii. Ujednolica się oznaczenie zbioru przystanków. Zastosowanie zapisu zbiorowego dla elementu opisanego trójką uporządkowaną (początek, koniec, waga) doprecyzowuje się przez wskazanie, że kolejność elementów odpowiada strukturze odcinka.

Lokalizacja/ Strona	Było	Jest
Rozdział 2.1, strona 55, wzór 6.	$l_{ij} = \{n_{ij}, m_{ij}, w_{ij}\}, \quad l_{ij} \in L_i, \quad j = 1 \dots N_{L(i)} \quad (6)$ <p>gdzie: $N_{L(i)}$ to numer odcinka międzyprzystankowego i-tej linii; $n_{ij}, m_{ij} \in \mathbf{N}$.</p>	$l_{ij} = \{n_{ij}, m_{ij}, w_{ij}\}, \quad l_{ij} \in L_i, \quad j = 1 \dots N_{L(i)} \quad (6)$ <p>gdzie: $N_{L(i)}$ jest liczbą odcinków międzyprzystankowych i-tej linii, $N_{L(i)} = \mathbf{L}_i$; n_{ij} oraz m_{ij} są początkowym i końcowym przystankiem j-tego odcinka, $n_{ij}, m_{ij} \in \mathbf{N}_{P(i)}$, gdzie $\mathbf{N}_{P(i)}$ jest zbiorem wszystkich przystanków i-tej linii.</p>
Rozdział 2.1, strona 56, wzór 10.	$\pi_i = \{\eta_i, \mu_i, \mathbf{P}_i, \tau_i\}, \quad \pi_i \in \mathbf{D}, \quad i = 1 \dots N_D, \quad (10)$ <p>gdzie:</p>	$\pi_i = \{\eta_i, \mu_i, \mathbf{P}_i, \tau_i\}, \quad \pi_i \in \mathbf{D}, \quad i = 1 \dots N_D, \quad (10)$ <p>gdzie:</p>

<p>π_i to i-ty pasażer, η_i oraz μ_i to przystanki, na których i-ty pasażer rozpoczyna i kończy podróż, $\eta_i \in \mathbf{N}$, $\mu_i \in \mathbf{N}$; \mathbf{P}_i jest zbiorem przystanków, na których i-ty pasażer przesiada się między liniami w czasie podróży; τ_i jest czasem, w którym i-ty pasażer pojawia się na przystanku η_i w celu wykonania podróży [min]; N_D jest liczbą wszystkich pasażerów korzystających z systemu publicznego transportu zbiorowego [pas].</p>	<p>π_i to i-ty pasażer, η_i oraz μ_i to przystanki, na których i-ty pasażer rozpoczyna i kończy podróż, $\eta_i \in \mathbf{N}_P$, $\mu_i \in \mathbf{N}_P$; \mathbf{N}_P jest zbiorem wszystkich przystanków w sieci; \mathbf{P}_i jest zbiorem przystanków, na których i-ty pasażer przesiada się między liniami w czasie podróży; τ_i jest czasem, w którym i-ty pasażer pojawia się na przystanku η_i w celu wykonania podróży [min.]; N_D jest liczbą wszystkich pasażerów korzystających z systemu publicznego transportu zbiorowego [pas], $N_D = \mathbf{D}$.</p>
--	---

3.3 Opis realizacji zmiennej losowej (wzór 13)

Uzupełnia się opis modelu matematycznego o dodatkowe wzory opisujące realizację zmiennej losowej ξ_j używanej we wzorze numer 13 w taki sposób, że na końcu podrozdziału 2.1 dodaje się wzory 13a i 13b wraz z opisami:

Właściwy odstęp czasu ξ_j między kolejnymi pasażerami ma rozkład wykładniczy warunkowany realizacją h_j :

$$\xi_j | (H_j = h_j) \sim E(1/h_j), \quad j = 1 \dots |\mathbf{N}_P| \quad (13a)$$

gdzie $E(b)$ jest zmienną losową o rozkładzie wykładniczym z parametrem skali b .

Średni odstęp czasu H_j na j -tym przystanku jest losowany jednorazowo z rozkładu jednostajnego:

$$H_j \sim R(1, 5), \quad j = 1 \dots |\mathbf{N}_P| \quad (13b)$$

gdzie $R(a, b)$ jest zmienną o rozkładzie jednostajnym z parametrem położenia a oraz parametrem skali b .

4. Uzupełnienie o pełne sformułowanie zadania optymalizacyjnego

Sformułowanie problemu w rozdziale II, w dotychczasowej wersji ograniczone do funkcji celu (wzór 15), uzupełnia się o pełny zapis zadania optymalizacyjnego, obejmujący dane wejściowe, wielkości poszukiwane (zmiennie decyzyjne), funkcję celu oraz układ ograniczeń. Rozdział 2.3 przyjmuje brzmienie jak poniżej:

2.3 Sformułowanie problemu synchronizacji rozkładu jazdy

Rozważa się problem synchronizacji rozkładów jazdy w istniejącym systemie publicznego transportu zbiorowego $\Omega = \{\Lambda, \mathbf{D}\}$, w którym dane są: układ linii oraz popyt na podróże. Poszukiwany jest wektor przesunięć rozpoczęcia obsługi linii Ψ , dla którego łączny czas oczekiwania pasażerów na przystankach osiąga minimum.

2.3.1 Zapis formalny

Dane wejściowe: $\Omega = \{\Lambda, \mathbf{D}\}$, tj. układ linii Λ oraz popyt na podróże \mathbf{D} ; interwały kursowania Δt_i ; liczba i pojemność pojazdów obsługujących linie.

Wielkości poszukiwane (zmiennie decyzyjne): wektor przesunięć:

$$\Psi^* = \langle \Psi_1^*, \Psi_2^*, \dots, \Psi_{N_\Lambda}^* \rangle \quad (14)$$

Funkcja celu (kryterium):

$$T_W(\Psi) = \sum_{i=1 \dots ND} t_{wi} \rightarrow \min \quad (15)$$

gdzie t_{wi} to czas oczekiwania i -tego pasażera [min].

Układ ograniczeń:

1. Przesunięcia czasowe rozpoczęcia kursowania linii są liczbami całkowitymi nieujemnymi z zakresu wyznaczonego przez interwał kursowania:

$$\Psi_i \in \mathbb{Z} \cap [0, \Delta t_i), \quad i = 1 \dots N_\Lambda \quad (15a)$$

2. Kolejne pozycje rozkładu jazdy j -tego pojazdu i -tej linii muszą tworzyć ściśle rosnący ciąg czasowy (warunek już obecny we wzorze (8) rozprawy):

$$t_{ijk} < t_{ij(k+1)}, \quad i = 1 \dots N_\Lambda, \quad j = 1 \dots N_{V(i)}, \quad k = 1 \dots N_{S(ij)} - 1. \quad (15b)$$

3. Kolejne kursy i -tej linii odbywają się w stałych odstępach czasu równych interwałowi kursowania:

$$t_{i(j+1)k} - t_{ijk} = \Delta t_i, \quad i = 1 \dots N_\Lambda, \quad j = 1 \dots N_{V(i)}, \quad k = 1 \dots N_{S(ij)} - 1. \quad (15c)$$

4. Każdy i -ty pasażer rozpoczyna i kończy podróż na różnych przystankach:

$$\eta_i \neq \mu_i, \quad i = 1 \dots N_D. \quad (15d)$$

5. Pozostałe zmiany

Miejsce	Było	Jest
Struktura pracy, strona 11.	Opisano problem synchronizacji rozkładów jazdy, który jest analizowany z perspektywy różnych podejść do problemu synchronizacji i kryteriów efektywności.	Opisano problem synchronizacji rozkładów jazdy, który jest analizowany z perspektywy różnych podejść i kryteriów efektywności.
Rozdział I, strona 15.	Wydajna siatka publicznego transportu zbiorowego powinna być zaplanowana w taki sposób, aby w możliwie największym stopniu pokryć istniejący popyt na podróże w planowanym rejonie w ramach możliwości finansowych jego organizatora (Vuchic, 2005).	Wydajna sieć publicznego transportu zbiorowego powinna być zaplanowana w taki sposób, aby w możliwie największym stopniu pokryć istniejący popyt na podróże w planowanym rejonie w ramach możliwości finansowych jego organizatora (Vuchic, 2005).

Rozdział I, strona 28.	<p>Wśród miar efektywności można znaleźć:</p> <ul style="list-style-type: none"> • minimalizację czasu oczekiwania pasażerów na przesiadkę, • minimalizację całkowitego czasu podróży pasażerów, • maksymalizację łącznej liczby przyjazdów na wybrany przystanek w tym samym czasie, • minimalną liczbę pojazdów potrzebną do obsłużenia sieci, • minimalizację całkowitego czasu spędzonego w pojeździe przez pasażera, • maksymalizację liczby możliwych przesiadek, • minimalizację liczby podróży, dla których nie udało się zapewnić przesiadki w dogodnym czasie, • maksymalizację satysfakcji pasażerów, • minimalizację ponoszonych kosztów, • minimalizację zmian w obecnym rozkładzie jazdy. 	<p>Wśród miar efektywności można znaleźć działania mające na celu:</p> <ul style="list-style-type: none"> • minimalizację czasu oczekiwania pasażerów na przesiadkę, • minimalizację całkowitego czasu podróży pasażerów, • maksymalizację łącznej liczby przyjazdów na wybrany przystanek w tym samym czasie, • zminimalizowanie liczby pojazdów potrzebną do obsłużenia sieci, • minimalizację całkowitego czasu spędzonego w pojeździe przez pasażera, • maksymalizację liczby możliwych przesiadek, • minimalizację liczby podróży, dla których nie udało się zapewnić przesiadki w dogodnym czasie, • maksymalizację satysfakcji pasażerów, • minimalizację ponoszonych kosztów, • minimalizację zmian w obecnym rozkładzie jazdy.
Rozdział I strony, 31., 32. i 33.	Rysunki 10, 11 i 12 bez powołania na źródło.	Pod każdym rysunkiem dodaje się: Źródło: Kapica, Melnikova, Naumov., 2025.
Bibliografia, strona 132.	Eranki, A., 2004. A Model to Create Bus Timetables to Attain Maximum Synchronization Considering Waiting Times at Transfer Stops. brak miejsca:USF Tampa Graduate Theses and Dissertations.	Eranki, A., 2004. A Model to Create Bus Timetables to Attain Maximum Synchronization Considering Waiting Times at Transfer Stops, USF Tampa Graduate Theses and Dissertations.
Bibliografia, strona 133.	GUS, 2025. Bank Danych Lokalnych, brak miejsca: brak nazwiska	GUS, 2025. Bank Danych Lokalnych
Bibliografia, strona 133.	Jansen, L. N., Pedersen, M. B. i Nielsen, O. A., 2002. Minimizing Passenger Transfer Times in Public Transport Timetables. brak miejsca, brak nazwiska, pp. 229-239.	Jansen, L. N., Pedersen, M. B. i Nielsen, O. A., 2002. Minimizing Passenger Transfer Times in Public Transport Timetables, pp. 229-239.
Bibliografia, strona 134.	Kang, L. i inni, 2015. A case study on the coordination of last trains for the Beijing subway network. Transportation Research Part B: Methodological, Tom 72, pp. 112-127.	Kang, L., Wu, J., Sun, H., Zhu, X., Gao, Z., 2015a. A case study on the coordination of last trains for the Beijing subway network. Transportation Research Part B: Methodological, Tom 72, pp. 112-127
Bibliografia, strona 134.	Kang, L. i inni, 2015. A practical model for last train rescheduling with train delay in urban railway transit networks. Omega, Tom 50, pp. 29-42.	Kang, L., Wu, J., Sun, H., Zhu, X., Bo, W., 2015b. A practical model for last train rescheduling with train delay in urban railway transit networks. Omega, Tom 50, pp. 29-42.
Bibliografia, strona 135.	Kumar, R., Memoria, M. i Chandel, A., 2020. Performance Analysis of proposed Mutation Operator of Genetic Algorithm under Scheduling Problem. Londyn, brak nazwiska, pp. 193-197.	Kumar, R., Memoria, M. i Chandel, A., 2020. Performance Analysis of proposed Mutation Operator of Genetic Algorithm under Scheduling Problem. Londyn, pp. 193-197.
Bibliografia, strona 137.	Schröder, M. i Solchenbach, I., 2006. Optimization of Transfer Quality in Regional Public Transit, brak miejsca: Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik.	Schröder, M. i Solchenbach, I., 2006. Optimization of Transfer Quality in Regional Public Transit, Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik.

Bibliografia, strona 137.	Shang, H. i Liu, Y., 2019. An Extended Vehicle Scheduling Model Considering Interests of both Passengers and Bus Operators. Guangzhou, brak nazwiska, pp. 1995-2000.	Shang, H. i Liu, Y., 2019. An Extended Vehicle Scheduling Model Considering Interests of both Passengers and Bus Operators. Guangzhou, pp. 1995-2000.
Bibliografia, strona 138.	Shrivastava, P. i Dhingra, S., 2002. Development of Coordinated Schedules using Genetic Algorithms. Journal of Transportation Engineering, 128(1), pp. 89-96.	Shrivastava, P. i Dhingra, S., 2002a. Development of Coordinated Schedules using Genetic Algorithms. Journal of Transportation Engineering, 128(1), pp. 89-96.
Bibliografia, strona 138.	Shrivastava, P., Dhingra, S. i Gundaliya, P., 2002. Application Of Genetic Algorithm For Scheduling And Schedule Coordination Problems. Journal of Advanced Transportation, Issue 36, pp. 26-41.	Shrivastava, P., Dhingra, S. i Gundaliya, P., 2002b. Application Of Genetic Algorithm For Scheduling And Schedule Coordination Problems. Journal of Advanced Transportation, Issue 36, pp. 26-41.
Bibliografia, strona 138.	Tzieropoulos, P., Daniel, E. i Buri, J.-D., 2010. Regular-interval timetables: Theoretical foundations and policy implications. brak miejsca, brak nazwiska	Tzieropoulos, P., Daniel, E. i Buri, J.-D., 2010. Regular-interval timetables: Theoretical foundations and policy implications.