



**Politechnika
Śląska**

**DYSCYPLINA NAUKOWA
INŻYNIERIA LĄDOWA,
GEODEZJA I TRANSPORT**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Adrian Barchański

**Metoda synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym
w aspekcie czasu podróży pasażera
w publicznym transporcie zbiorowym**

Method of timetable synchronization in a transfer node
in terms of public transport travel time

Promotor

dr hab. inż. Renata Żochowska, prof. P.Ś.

Promotor pomocniczy

dr inż. Marcin Kłos

Gliwice 2025

Streszczenie

Współcześnie na obszarach miejskich występują niekorzystne tendencje powodujące problemy transportowe, w tym związane z suburbanizacją. Konieczne jest podejmowanie działań mających na celu poprawę jakości życia w obszarach funkcjonalnych ośrodków miejskich, m.in. poprzez poprawę warunków ruchu i zmniejszenie uzależnienia od samochodu osobowego. Może to zostać osiągnięte poprzez poprawę jakości transportu zbiorowego i zwiększanie integracji systemu transportowego. Jednym z kluczowych postulatów wpływających na zachowania komunikacyjne jest czas podróży, rozpatrywany z uwzględnieniem składowych, z których najgorzej postrzegany jest czas oczekiwania. Kluczowym zagadnieniem w tym zakresie są węzły przesiadkowe, które stanowią podstawę kształtowania i planowania rozwoju transportu zbiorowego. Od atrakcyjności węzłów przesiadkowych zależy postrzeganie i sprawność funkcjonowania całego transportu zbiorowego. Jednym z elementów poprawy jakości transportu zbiorowego w tym zakresie jest synchronizacja rozkładów jazdy, definiowana jako kształtowanie rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym, który zapewni pasażerom dogodną zmianę środka transportu. W pracy synchronizacja rozkładów jazdy rozpatrywana jest jako dobór planowanych momentów odjazdów z węzła przesiadkowego autobusów komunikacji miejskiej w kursach dla linii komunikacyjnych względem planowanych momentów przyjazdów pociągów. Jako cel synchronizacji przyjęto skrócenie średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu, uwzględniające potrzebę poprawy niezawodności.

W dotychczasowej literaturze nie analizowano wpływu odchyłek od rozkładu jazdy występujących w węźle przesiadkowym podczas synchronizacji rozkładów na czas oczekiwania pasażerów przesiadających się z pociągu na autobus komunikacji miejskiej w skali doby. Brakuje badań porównawczych względem rozwiązań, w których nie uwzględniono informacji o odchyłkach. Wskazany problem został podjęty w rozprawie, stanowiąc podstawę sformułowanej w pracy hipotezy badawczej. Dla potrzeb osiągnięcia celów pracy opracowano autorską metodę synchronizacji rozkładów jazdy, pozwalającą zbadać wpływ uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy na czas oczekiwania pasażerów. Metodę charakteryzuje następujący zestaw cech dotychczas nierozważany wspólnie w literaturze:

- modyfikacje dotyczą dostosowania rozkładu jazdy w autobusowej komunikacji miejskiej do potrzeb pasażerów przy braku stosowania buforowania czasu zatrzymania,
- linie komunikacyjne w kierunkach jazdy cechują wspólne fragmenty tras, różne interwały w okresach oraz płynna zmiana częstotliwości pomiędzy okresami co pozwala uwzględnić zmiany w organizacji i funkcjonowaniu transportu zbiorowego w skali doby,
- rzeczywiste układy tras linii komunikacyjnych odwzorowywane są w postaci segmentów wyróżnianych na podstawie wspólnych fragmentów tras,

- synchronizacja zorientowana jest na obsługę podróży w relacjach opisanych zmienną intensywnością zgłoszeń pasażerów w ciągu dnia, rozpatrywane są wszystkie kursy zapewniające połączenie węzła z segmentami,
- synchronizacja realizowana jest z uwzględnieniem regularnych odchyłek od rozkładu jazdy i zróżnicowania czasu przebycia dróg przejścia,
- w opracowanym algorytmie zastosowano modelowanie symulacyjne i przeszukiwanie z tabu,
- budowany jest rozkład jazdy w węźle, który zapewnia najkrótszy średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu.

W dysertacji opracowano model formalny metody, sformułowano zadanie optymalizacyjne, opracowano algorytm metody, którą zastosowano do wybranych węzłów przesiadkowych zlokalizowanych w Górnośląsko Zagłębiowskiej Metropolii (GZM). Przedstawiono wyniki badania przebiegu realizacji algorytmu obliczeniowego. Wyznaczone, zsynchronizowane rozkłady jazdy dla rozpatrywanych przypadków testowych porównane zostały ze zbiorem rozwiązań dopuszczalnych oraz rozkładami jazdy obowiązującymi w badanych węzłach przesiadkowych.

W toku prac nad dysertacją potwierdzono hipotezę badawczą, wykazując korzystny wpływ uwzględniania odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji rozkładów jazdy na zmniejszenie wartości średniej czasu oczekiwania. Pozostałymi osiągnięciami rozprawy doktorskiej są: przeprowadzenie oceny wpływu atrybutów charakteryzujących węzeł przesiadkowy na zróżnicowanie skrócenia czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu, wynikające z zastosowania proponowanej metody, charakterystyka odchyłek od rozkładu jazdy występujących w wybranych węzłach przesiadkowych na obszarze GZM oraz opracowanie narzędzia wspomagającego synchronizację rozkładów jazdy zgodnie z proponowaną metodą.

Proponowaną metodę można zastosować do istniejących jak i projektowanych pojedynczych węzłów przesiadkowych, w których konieczne jest dostosowanie planowanych momentów odjazdów środków transportu dla wybranych lub wszystkich linii komunikacyjnych do momentów zgłoszeń pasażerów na stanowiskach przystankowych zwłaszcza w węzłach, w których występują odchyłki od rozkładu jazdy i zróżnicowany czas przebycia dróg przejścia. Proponowana metoda synchronizacji zapewnia dostosowanie rozkładu jazdy do potrzeb pasażerów i pozwoli zwiększyć atrakcyjność publicznego transportu zbiorowego (PTZ) poprzez poprawę jakości, przez co bezpośrednio wpisuje się w kierunki badań podejmowane aktualnie w literaturze światowej.

Abstract

Today, in urban areas, there are unfavorable trends causing transport problems, including related to suburbanization. It is essential to undertake measures aimed at improving the quality of life in the functional areas of urban centers, particularly by enhancing traffic conditions and reducing dependence on private cars. This objective can be achieved by improving the quality of public transport and increasing the integration of the transport system. One of the key demands influencing travel behaviour is travel time, considered with regard to components, of which waiting time is the worst. A central issue in this area is the transport interchanges, which can form the basis for the planning and development of public transport networks. The perception and operational efficiency of the entire public transport system depends on the attractiveness of transport interchanges. One of the elements of improving the quality of public transport in this respect is the timetable synchronization, defined as the shaping of the timetable in a transport interchange to ensure smooth and timely transfers between different modes of transport. In this study, timetable synchronization is examined as the alignment of planned bus departure times in urban public transport with the scheduled arrival times of trains at a transport interchange. The aim is to minimize the mean waiting time for passengers transferring between modes of transport, thereby also enhancing service reliability.

Previous studies have not examined the impact of incorporating unpunctuality in arrival and departure of public transport vehicles at transport interchange during the timetable synchronization on the waiting times of passengers transferring from trains to urban buses in the interchange throughout the day, in relation to solutions synchronized with omitting data on unpunctuality in public transport. This research addresses this gap and forms the basis for the hypothesis formulated in this dissertation. In order to achieve the study's objectives, a novel method of timetable synchronization has been developed, allowing an examine the impact of consideration of unpunctuality of arrivals and departures of public transport vehicles at transport interchange on passengers' waiting times. This method is characterized by the following set of features that have not been jointly considered in the literature:

- the modifications focus on adjusting urban bus schedules to meet passenger needs without implementing buffer time.
- the directions of the different public transport lines share fragments of the routes while having varying service intervals during different periods of the day, allowing for flexible frequency adjustments in response to changes in the organization and functioning of public transport.
- real-world public transport network is represented as segments identified based on shared fragments of the routes of the public transport lines.
- The synchronization is oriented to service travel demand patterns defined by variable passenger arrivals throughout the day, incorporating all services that connect the transport interchange to the segments.
- synchronization is conducted taking into account regular unpunctuality in public transport and variations in pedestrian transfer walking times.

- the developed algorithm utilises simulation-based modelling and tabu search optimisation to enhance synchronization,
- the resulting timetable ensures the shortest mean waiting time for passengers transferring between transport modes at the transport interchange.

In the dissertation a formal model of the method was developed, an optimization task was formulated, an algorithm of the method was developed which was applied to selected transport interchanges located in the Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolis (GZM). The study also includes an analysis of the computational algorithm. The synchronised timetables obtained for the test cases were subjected to comparative analysis, including with regard to the set of allowed solutions and working timetables in the examined transport interchanges.

The research confirms the formulated hypothesis, demonstrating the beneficial impact of incorporating unpunctuality in public transport during the synchronization in reducing the mean passenger waiting time. The other achievements of the dissertation are the evaluation of the influence of attributes characterizing the transport interchange on the difference in waiting time reductions, caused by the use of the proposed method, a characterisation of unpunctuality occurring in selected transport interchanges in the GZM area, and the development of a tool supporting timetable synchronization carried out according to the proposed method.

The proposed method can be applied to both existing and planned single transport interchange where the alignment of scheduled departures for selected or all urban bus lines with passenger arrivals at bus stops is required, especially in those transport interchanges where unpunctuality in public transport and varied pedestrian transfer walking times are common. The developed synchronization method ensures that the timetable is tailored to the needs of passengers and will increase the attractiveness of the public transport by improving the service quality. Consequently, this research aligns directly with current global trends in transport studies and contributes to the ongoing discourse on optimising public transport efficiency.

Spis treści

Streszczenie	2
Abstract	4
Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń	8
1. Wprowadzenie	11
1.1. Charakterystyka wybranych pojęć stosowanych w pracy.....	11
1.2. Obszary badawcze związane z tematem pracy	21
1.3. Cel, teza i zakres pracy.....	26
2. Stan zagadnienia w zakresie synchronizacji rozkładów jazdy w węzłach przesiadkowych.....	32
2.1. Rola węzłów przesiadkowych w realizacji podróży w publicznym transporcie zbiorowym	32
2.2. Dobór narzędzi dla synchronizacji rozkładów jazdy	42
2.3. Przegląd metod synchronizacji rozkładów jazdy	49
2.4. Wnioski z przeprowadzonego przeglądu literatury.....	66
3. Model węzła przesiadkowego i jego otoczenia.....	71
3.1. Struktura modelu.....	71
3.2. Elementy modelu związane z realizacją przewozów pasażerskich w obszarze oddziaływania węzła	77
3.3. Zapotrzebowanie na przewozy pasażerskie w obszarze oddziaływania węzła.....	79
3.4. Model zależności czasowych	83
3.5. Czynniki o charakterze stochastycznym w ruchu środków transportu i pasażerów ..	94
3.6. Rozłożenie czasowe macierzy potoków pasażerów w węźle przesiadkowym	97
4. Zadanie optymalizacyjne synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym	99
4.1. Założenia do budowy zadania optymalizacyjnego	99
4.2. Dane wejściowe i zmienna decyzyjna.....	100
4.3. Odwzorowanie ograniczeń nałożonych na zadanie optymalizacyjne	104
4.4. Funkcja kryterium	110
4.5. Jednokryterialne zadanie optymalizacyjne synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym	112
5. Metoda synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym	118
5.1. Założenia i ogólny schemat metody.....	118
5.2. Przygotowanie danych wejściowych	123
5.3. Etap 1 – działania prowadzące do wyznaczenia zbioru rozwiązań dopuszczalnych	125
5.4. Etap 2 – Odwzorowanie wpływu czynników o charakterze stochastycznym.....	127

5.5.	Etap 3 – przeszukiwanie zupełne dla poszczególnych modyfikowanych kierunków jazdy	129
5.6.	Etap 4 – poprawianie bieżącego rozwiązania poprzez przeszukiwanie lokalne	132
5.7.	Etap 5 – ocena wpływu zastosowania metody synchronizacji rozkładów jazdy na czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu	138
5.8.	Opis narzędzia wspomagającego realizację obliczeń	148
6.	Walidacja opracowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy	156
6.1.	Charakterystyka węzłów przesiadkowych w zakresie realizacji podróży ze zmianą środka transportu	156
6.2.	Analiza obsługi węzłów przesiadkowych przez linie komunikacyjne	167
6.3.	Analiza zastosowania opracowanej procedury przeszukiwania lokalnego	176
6.4.	Analiza rozkładów jazdy wyznaczonych z zastosowaniem proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy	185
6.5.	Badania wpływu uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy w synchronizacji na średni czas oczekiwania pasażerów	192
7.	Ocena wyników pracy	198
7.1.	Ocena realizacji celu pracy	198
7.2.	Weryfikacja tezy i rekomendacje końcowe	204
7.3.	Kierunki dalszych badań	207
Literatura		211
Spis rysunków		234
Spis tabel		237
Załącznik 1	Arkusze danych wejściowych i wyników dla programów w ramach narzędzia wspomagającego realizację obliczeń – przykład dla węzła Modelowego badanego w rozprawie	238
Załącznik 2	Zestawienie parametrów rozkładów prawdopodobieństwa opisujących odchyłki od rozkładu jazdy dla linii komunikacyjnych w badanych węzłach przesiadkowych	249
Załącznik 3	Zestawienie parametrów przyjętych w rozprawie dla potrzeb charakterystyki przemieszczania się pasażerów drogami przejścia w węzle przesiadkowym	265

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

$\mathcal{A}$ – zbiór numerów kursów dla wszystkich linii autobusowych w komunikacji miejskiej obsługujących węzeł przesiadkowy wyznaczony według proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy

$\mathcal{AD}_v$ – zbiór numerów kursów dla wszystkich linii autobusowych w komunikacji miejskiej obsługujących węzeł przesiadkowy dla v -tego przypadku testowego stanowiący daną wejściową

$\mathcal{Ag1}_{seg,o}$ – zbiór numerów kursów dla wszystkich linii autobusowych w komunikacji miejskiej zapewniających połączenie węzła przesiadkowego z segmentem seg w o -tym okresie i wyznaczony według proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy

$CS(v)$ – atrybut v -tego przypadku testowego dotyczący „Czynników o charakterze stochastycznym”

$FC(\mathbf{war})$ – funkcja kryterium wyrażająca średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej w okresie funkcjonowania węzła przesiadkowego w skali doby szacowany na podstawie rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym opisanego wektorem zmiennych decyzyjnych $\mathbf{war}_v$

$\Phi_{\kappa,seg}$ – zbiór numerów pasażerów, którzy dostali się do węzła przesiadkowego κ -tym połączeniem kolejowym i realizują podróż w kierunku segmentu docelowego seg ,

$h(j\alpha, o)$ – stały interwał międzykursowy dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy o -tym okresie

$hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$ – odstęp czasu między odjazdem z węzła przesiadkowego dwóch kolejnych autobusów w kursach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy $j\alpha$, z których pierwszy autobus odjeżdża w okresie o , a drugi autobus odjeżdża w następnym okresie, tj. okresie o' i zależna od rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym opisanego wektorem zmiennych decyzyjnych $\mathbf{war}$

$J\mathcal{A}$ – zbiór numerów linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w autobusowej komunikacji miejskiej obsługujących węzeł przesiadkowy

$j\alpha$ – element zbioru $J\mathcal{A}$, numer linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w autobusowej komunikacji miejskiej i obsługującej węzeł przesiadkowy

$\widehat{J\mathcal{A}}$ – zbiór numerów linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy w autobusowej komunikacji miejskiej i obsługujących węzeł przesiadkowy, których rozkład jazdy będzie poddawany analizie w procesie synchronizacji rozkładów jazdy

$\mathcal{K}$ – zbiór numerów połączeń dla wszystkich relacji w transporcie kolejowym obsługujących węzeł przesiadkowy

κ – element zbioru $\mathcal{K}$, numer połączenia wśród wszystkich połączeń dla obsługujących węzeł przesiadkowy linii komunikacyjnych w transporcie kolejowym w relacjach

$\mu tm(\mathbf{rj}_v)$ – średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu charakteryzujący rozkład jazdy w węźle determinowany przez $\mathbf{rj}_v$ -te rozwiązanie

$\mathbf{O}$ – zbiór okresów, na które dzielony jest okres funkcjonowania węzła przesiadkowego w skali doby

$\mathbf{P}$ – zbiór numerów dróg przejścia dostępnych w węźle przesiadkowym

$\mathcal{P}opo(j\alpha, o)$ – rozkład prawdopodobieństwa odchyłek od planowanego momentu odjazdu z obsługiwanego stanowiska przystankowego w węźle przesiadkowym autobusów komunikacji miejskiej w kursach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy $j\alpha$ w o -tym okresie

$\mathcal{P}opp(j\kappa, o)$ – rozkład prawdopodobieństwa odchyłek od planowanego momentu przyjazdu pociągów w połączeniach dla $j\kappa$ -tej relacji w transporcie kolejowym w o -tym okresie na tor przy peronie w węźle przesiadkowym

$\mathcal{P}tp(p, o)$ – rozkład prawdopodobieństwa czasu przebycia p -tej drogi przejścia przez pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym w o -tym okresie

$\mathbf{\Pi}$ – zbiór numerów pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z pociągów na autobusy komunikacji miejskiej

$\mathbf{Q}$ – zbiór numerów przyjętych w pracy atrybutów opisujących parametry synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym

$\mathbf{rCSV}$ – zbiór porównywanych par (v, v') numerów przypadków testowych, różniących się przypisanym stanem w atrybucie „Czynniki stochastyczne”

$\mathbf{REL}$ – zbiór numerów relacji podróży ze zmianą środka transportu w węźle przesiadkowym, opisanych parami segmentów (seg, seg') : $seg \in \mathbf{SEGZ}, seg' \in \mathbf{SEGD}$

$\mathbf{rj}_v$ – rozwiązanie identyfikujące rozkład jazdy w węźle przesiadkowym dla v -tego przypadku testowego

$\rho \mu tm(\mathbf{rj}_v, \mathbf{rj}_{v'})$ – względna różnica między średnim czasem oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym opisanymi miarą $\mu tm(\mathbf{rj}_v)$ charakteryzującym rozkłady jazdy w węźle $\mathbf{rj}_v, \mathbf{rj}_{v'}$ dla pary przypadków testowych (v, v')

$\mathbf{SEG}$ – zbiór numerów segmentów w obszarze oddziaływania węzła przesiadkowego

$\mathbf{SEGD}$ – zbiór numerów segmentów docelowych

$\mathbf{SEGg1}\alpha_{j\alpha}$ – zbiór numerów segmentów docelowych, dla których linia komunikacyjna w kierunku jazdy $j\alpha$ -ty zapewnia połączenie z węzłem przesiadkowym

$\mathbf{SEGZ}$ – zbiór numerów segmentów źródłowych

$td\mathcal{A}(\alpha, zs)$ – zmienna określająca odchyłkę od planowanego momentu odjazdu autobusu komunikacji miejskiej ze stanowiska przystankowego w węźle przesiadkowym w α -tym kursie i odwzorowanej w zs -tej pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu

$td\mathcal{K}(\kappa, zs)$ – zmienna określająca odchyłkę od planowanego momentu przyjazdu pociągu na tor przy peronie w węźle przesiadkowym w κ -tym połączeniu i odwzorowanej w zs -tej pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu

$tm(\pi, zs)$ – zmienna określająca czas oczekiwania π -tego pasażera podczas zmiany środka transportu w zs -tej pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu

$tp(\pi, zs)$ – zmienna określająca czas przejścia przez π -tego pasażera w węźle przesiadkowym odwzorowany w zs -tej pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu

θ – zbiór numerów kolejnych jednostek czasu stanowiących podstawę opisu procesu zmiany środka transportu przez pasażerów w okresie funkcjonowania węzła w skali doby

$\theta X(j\alpha, o)$ – funkcja określająca planowany moment odjazdu pierwszego autobusu komunikacji miejskiej kursie dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy $j\alpha$ w o -tym okresie.

$\theta X(j\alpha, \mathbf{war})$ – wektor determinujący planowane momenty odjazdów z węzła przesiadkowego wszystkich autobusów w kursach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy $j\alpha$ dla rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym determinowanego przez wektor zmiennych decyzyjnych $\mathbf{war}$

$\theta Y\mathcal{A}(\alpha, \mathbf{war})$ – funkcja określająca planowany moment odjazdu ze stanowiska przystankowego w węźle przesiadkowym autobusu komunikacji miejskiej w α -tym kursie, dla rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym determinowanego przez wektor zmiennych decyzyjnych $\mathbf{war}$

V – zbiór numerów przypadków testowych opisujących parametry synchronizacji rozkładów jazdy

v – element zbioru V numer przypadku testowego opisujący parametry synchronizacji rozkładów jazdy

$\mathbf{WAR}$ – zbiór elementów jednoznacznie identyfikujących dopuszczalne rozkłady jazdy w węźle przesiadkowym

$\mathbf{war}$ – zmienna decyzyjna, element zbioru $\mathbf{WAR}$, wektor identyfikujący dopuszczalny rozkład jazdy w węźle przesiadkowym, zawierając numery rozkładów jazdy dla linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy

$\mathbf{WAR}_{j\alpha}$ – zbiór elementów jednoznacznie identyfikujących dopuszczalne rozkłady jazdy dla linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy $j\alpha$

ZS – zbiór numerów pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu dla potoku pasażerów w ujęciu stochastycznym

zs – numer pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu dla potoku pasażerów w ujęciu stochastycznym

1. Wprowadzenie

1.1. Charakterystyka wybranych pojęć stosowanych w pracy

Niniejsza dysertacja dotyczy problematyki publicznego transportu zbiorowego, który stanowi jeden z kluczowych środków przeciwdziałania niekorzystnym, współczesnym tendencjom występującym na obszarach miejskich, w tym suburbanizacji i wynikających z niej problemów transportowych [1, 6, 20, 62, 205]. Konieczne jest podejmowanie działań mających na celu poprawę jakości życia w obszarach funkcjonalnych ośrodków miejskich, m.in. poprzez poprawę warunków ruchu i zmniejszenie uzależnienia od samochodu osobowego. Może to zostać osiągnięte poprzez poprawę jakości transportu zbiorowego i zwiększanie integracji systemu transportowego [120, 153, 165, 191, 209]. Współcześnie kluczową rolę w zapewnieniu atrakcyjnego transportu zbiorowego pełnią węzły przesiadkowe, od obsługi których rozpoczyna się planowanie przewozów. Od atrakcyjności węzłów przesiadkowych zależy postrzeganie i sprawność funkcjonowania całego transportu zbiorowego [20, 114, 116, 227, 235].

Podróże transportem zbiorowym, zwłaszcza ze zmianą środka transportu, wiążą się z czasem oczekiwania, który jest najgorzej postrzeganą składową czasu podróży. Skrócenie czasu oczekiwania, dzięki podjętym działaniom planistycznym i organizacyjnym skutkuje najefektywniejszym zmniejszeniem uciążliwości podczas podróży [21, 23, 55, 107, 144]. Ponadto czas oczekiwania dłuższy niż wynika to z rozkładu jazdy, a powodowany przez występujące zakłócenia w systemie transportowym jest szczególnie niekorzystnie postrzegany przez pasażerów, ponieważ powoduje daleko idące, negatywne skutki [52, 55, 107, 191]. Występowanie odchyłek od rozkładu jazdy powoduje zwiększenie dyspersji czasu trwania podróży i poszczególnych jego składowych. Skutkuje to zwiększeniem niepewności czy dotarcie do miejsca docelowego podróży nastąpi punktualnie [144, 243, 55]. Poza poczuciem dyskomfortu i dodatkowego stresu u podróżnych, zależnie od motywacji, istotności, obligatoryjności i terminowości podróży, niska niezawodność realizacji podróży zgodnie z planem, wiąże się zwykle z zakładaniem czasu trwania podróży dłuższego niż wynika to z rozkładu jazdy [19, 38, 185, 226]. Uciążliwości postrzegane przez pasażerów podczas podróży powodują zmniejszanie satysfakcji i odpływ z transportu zbiorowego użytkowników posiadających alternatywne możliwości zaspokojenia potrzeb przewozowych [28, 52, 135, 181, 189]. Jest to szczególnie istotne w podróżach ze zmianą środka transportu, w których pasażerowie kilkakrotnie doznają skutków zmienności czasu trwania poszczególnych składowych czasu podróży [18, 119, 185, 202, 214]. W warunkach występowania odchyłek od rozkładu jazdy im krótszy jest planowany czas przesiadania, tym mniejsza jest niezawodność podróży oraz mniejsze prawdopodobieństwo dotarcia do celu w zakładanym czasie [54, 55, 119, 214]. W takiej sytuacji codzienne podróże mogą wiązać się z poczuciem dyskomfortu, zwiększeniem odczuwania stresu przez pasażerów przyjeżdżających do węzła przesiadkowego oraz koniecznością oczekiwania na kolejny pojazd zapewniający połączenie w danej relacji podróży [135, 154, 206, 207, 251]. Im dłuższy planowany czas przesiadania,

uwzględniający dyspersję odchylek od rozkładu jazdy, tym większa niezawodność, lecz również dłuższy czas oczekiwania podczas zmiany środka transportu w codziennych podróżach przy niewielkich odchyłkach od rozkładu jazdy [19, 144, 192, 250]. W dysertacji podjęto problematykę analizy związków między planowanym czasem przesiadania a czasem oczekiwania podczas zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym. Rozpatrywana jest w tym zakresie synchronizacja rozkładów jazdy, obejmująca dobór planowanych momentów realizacji kursów w celu skrócenia średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z pociągu na autobus.

Tematem rozprawy jest uwzględnienie wpływu odchylek od rozkładu jazdy w synchronizacji rozkładów jazdy w węzłach przesiadkowych integrujących transport kolejowy z komunikacją miejską, z których każdy z podsystemów transportu zbiorowego realizuje własne zadania transportowe. Podjęte w pracy zagadnienie to aktualny problem badawczy, który wpisuje się we współczesne trendy i kierunki prac prezentowane w literaturze światowej oraz stanowi wkład we wdrażanie koncepcji zrównoważonej mobilności zorientowanej na równorzędne uwzględnienie celów ekonomicznych, społecznych i środowiskowych w kształtowaniu systemu transportowego [6, 63, 120, 176, 209].

W przypadku synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym kluczowe pojęcia odnoszą się do charakterystyki procesu zmiany środka transportu przez pasażerów. Omówienie poniższych pojęć pozwala na jednoznaczne przedstawienie problematyki rozpatrywanej w dysertacji oraz wskazanie kierunku badań, na podstawie którego opracowano zakres pracy. Podjęty problem badawczy dotyczy **publicznego transportu zbiorowego** (PTZ) rozumianego w rozprawie zgodnie z Ustawą o publicznym transporcie zbiorowym [225] jako: „powszechnie dostępny, regularny przewóz osób, wykonywany w określonych odstępach czasu i po określonej linii komunikacyjnej, liniach komunikacyjnych lub sieci komunikacyjnej”. Rozważana w dysertacji sieć komunikacyjna rozumiana zgodnie z Ustawą o publicznym transporcie zbiorowym [225] jest wyznaczana [118] na podstawie linii komunikacyjnych w transporcie kolejowym i komunikacji miejskiej obsługujących węzeł przesiadkowy.

Kluczowym elementem systemu transportowego analizowanym w rozprawie jest **węzeł przesiadkowy**, zdefiniowany w Ustawie o publicznym transporcie zbiorowym jako „miejsce umożliwiające dogodną zmianę środka transportu, wyposażone w niezbędną dla obsługi podróżnych infrastrukturę, w szczególności: miejsca postojowe, przystanki komunikacyjne, punkty sprzedaży biletów, systemy informacyjne umożliwiające zapoznanie się zwłaszcza z rozkładem jazdy, linią komunikacyjną lub siecią komunikacyjną” [225]. W rozprawie zawężono dane pojęcie przyjmując, że **węzeł przesiadkowy** rozumiany jest jako miejsce integrujące dwa podsystemy transportu:

1. transport kolejowy,
2. autobusową komunikację miejską

realizujące niezależne, odrębne zadania związane z przewozem osób i umożliwiające dogodną zmianę środka transportu. W dysertacji rozpatrywane są węzły przesiadkowe związane

z kolejowym punktem eksploatacyjnym zapewniającym obsługę pasażerów (przystanek kolejowy lub stacja kolejowa) [96].

Rozpatrywanymi w rozprawie elementami **infrastruktury** węzła przesiadkowego są perony i stanowiska przystankowe obsługiwane przez linie komunikacyjne o przypisanym rozkładzie jazdy. Jednoznacznie określony w przestrzeni ciąg pieszy łączący peron ze stanowiskiem przystankowym w węźle przesiadkowym, umożliwiający przejście podczas zmiany środka transportu zdefiniowano jako **droga przejścia**. Liczba i długości dróg przejścia są determinowane przez liczbę i lokalizację peronów i stanowisk przystankowych w węźle przesiadkowym. W pracy rozpatrywane są tylko przejścia między peronami, na których pasażerowie wysiadają z pociągów a stanowiskami przystankowymi, na których wsiadają do autobusów komunikacji miejskiej.

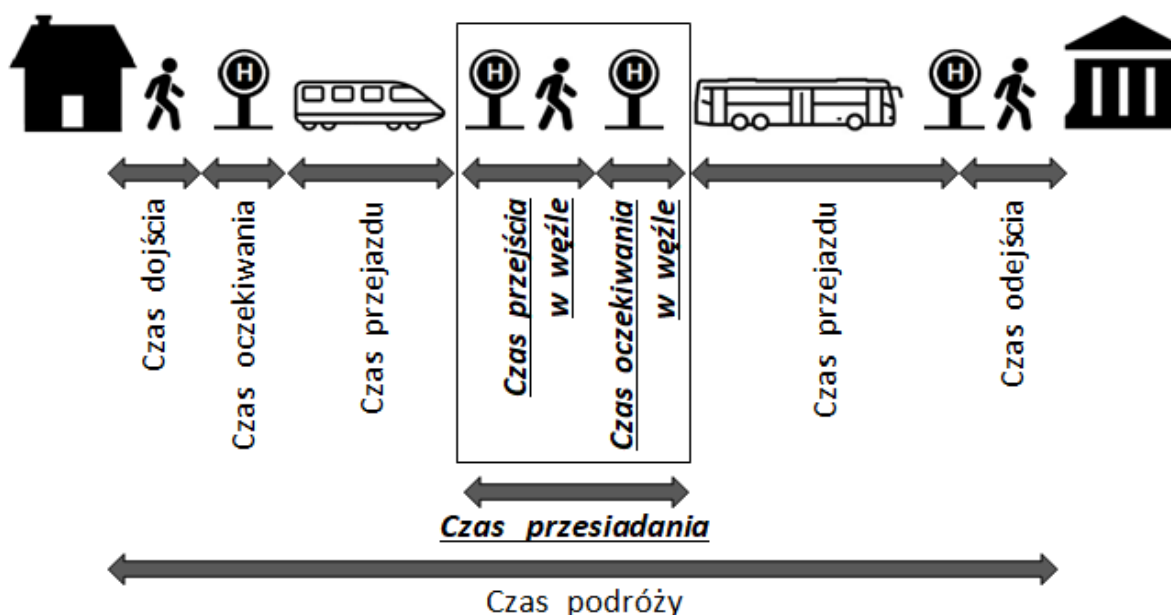
W węźle przesiadkowym realizowanych jest wiele procesów, z których najistotniejszy dla potrzeb pracy, to **proces zmiany środka transportu**. Dany proces rozpatrywany jest w rozprawie w dwóch ujęciach:

- 1) dla pojedynczego pasażera – obejmuje wyjście pasażera z pociągu na peron w węźle przesiadkowym, przebycie drogi przejścia między peronem a stanowiskiem przystankowym oraz oczekiwanie na odjazd autobusu ze stanowiska przystankowego, którym pasażer opuszcza węzeł przesiadkowy,
- 2) dla potoku pasażerów – obejmuje w sposób łączny procesy zmiany środka transportu z pociągów na autobusy komunikacji miejskiej w węźle przesiadkowym realizowane przez wszystkich pasażerów.

Przyjęte podejście zastosowano w dysertacji w celu odwzorowania i analizy zróżnicowania momentów przyjazdów pociągów, odjazdów autobusów i czasów trwania poszczególnych etapów podróży. Przebieg i ocena realizacji procesu dla potoku pasażerów charakteryzowane są poprzez czas oczekiwania podczas zmiany środka transportu oszacowany dla wszystkich pasażerów.

Dzięki właściwej organizacji publicznego transportu zbiorowego możliwe jest skuteczne rozwiązanie wielu współczesnych problemów transportowych [62, 100, 236]. Warunkiem atrakcyjności PTZ jest zapewnienie jakości dostosowanej do potrzeb użytkowników. Podjęty w pracy problem badawczy wiąże się z zagadnieniem sprawnej realizacji podróży, której rozumiany za [107] uogólniony koszt¹ jest akceptowalny dla pasażerów. Koszt uogólniony zależy od **czasu podróży** [24, 74, 107, 120, 214] rozumianego w pracy jako czas upływający między realizacją dwóch kolejnych aktywności poza transportowych, zlokalizowanych w różnych miejscach, tzn. czas, w którym osoba jest użytkownikiem systemu transportowego. Składowe czasu podróży na przykładzie PTZ przedstawiono na rysunku 1.1., przy czym elementy związane z procesem zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym zostały dodatkowo wyróżnione.

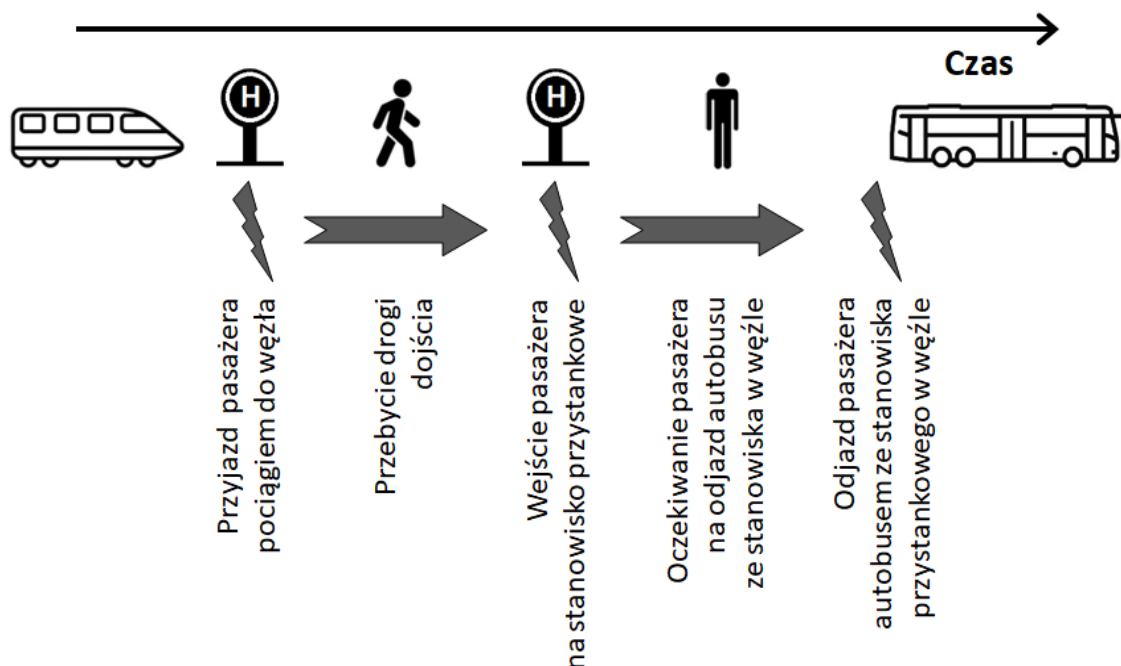
¹ Uogólniony koszt podróży – (ang. *generalized cost of travel*) to syntetyczna miara łącząca wszystkie istotne elementy wpływające na decyzję pasażera o wyborze środka transportu – zarówno koszty pieniężne (np. bilet), jak i pozapieniężne (czas podróży, czas oczekiwania, przesiadki, niewygoda, stres, itp.) [107].



Rys. 1.1. Składowe czasu podróży ze zmianą środka transportu w węźle przesiadkowym
Źródło: opracowanie własne

Czas podróży stanowi sumę czasu przemieszczania się pieszo, czasu przejazdu oraz oczekiwania. Łączny czas przejścia obejmuje czas niezbędny użytkownikowi transportu zbiorowego na dojście z miejsca rozpoczęcia podróży do stanowiska przystankowego, przejście podczas każdej zmiany środka transportu oraz dojścia ze stanowiska przystankowego do miejsca docelowego. Czas jazdy to czas spędzony w pojazdach przemieszczających się pomiędzy miejscami początku i końca podróży. Czas oczekiwania występuje przed odjazdem ze stanowiska przystankowego, przed pierwszym przejazdem w podróży, a w przypadku podróży ze zmianami środka transportu również przed kolejnymi przejazdami. Suma czasu oczekiwania i czasu przejścia w węźle przesiadkowym nazywana jest **czasem przesiadania**. W pracy nie były rozpatrywane czasy wsiadania i wysiadania pasażerów podczas zmiany środka transportu. Jeśli potoki pasażerów przemieszczają się w poszczególnych relacjach na pewnych etapach podróży wspólnie, to znaczy, że wykorzystują te same środki transportu i drogi przejścia. Dlatego w rozprawie potoki pasażerów rozpatrywano odrębnie w poszczególnych etapach podróży oraz w podziale na relacje podróży, tj. w realizacji przejść, przejazdów w poszczególnych kursach i podczas oczekiwania na przejazdy, opisanych wielkością potoków dla każdej relacji.

Na rysunku 1.2. przedstawiono schematycznie sposób opisu procesu zmiany środka transportu przez pasażera w węźle przesiadkowym przyjęty dla potrzeb pracy.



Rys. 1.2. Rozpatrywane w dysertacji etapy procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym z transportu kolejowego na komunikację miejską

Źródło: opracowanie własne

W procesie zmiany środka transportu odwzorowano trzy zdarzenia:

- momentu przyjazdu pociągu na tor przy peronie w węźle,
- momentu wejścia pasażera na stanowisko przystankowe,
- momentu odjazdu środka transportu, którym pasażer kontynuuje podróż.

Rozpatrywane w pracy i przedstawione w sposób schematyczny na rysunku 1.2. zdarzenia stanowią podstawę wyróżnienia dwóch etapów podróży:

- 1) przebycia drogi przejścia w węźle przesiadkowym,
- 2) oczekiwania pasażera w węźle przesiadkowym a następnie w pojeździe na odjazd ze stanowiska przystankowego autobusem komunikacji miejskiej w kursie zapewniającym połączenie z miejscem docelowym podróży,

przy czym w pracy nie wyszczególniono etapu wsiadania i wysiadania podczas zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym. W okresie funkcjonowania węzła pasażerowie przyjeżdżają kolejnymi pociągami ze zróżnicowaną intensywnością, zależną od zmieniającej się wielkości zgłaszanego zapotrzebowania na realizację przewozów w poszczególnych relacjach.

Synchronizacja rozkładów jazdy może wpływać na czas oczekiwania pasażerów podczas zmiany środka transportu, nie powodując zmian pozostałych składowych czasu podróży [77, 93]. Dlatego w pracy czas podróży pasażerów zmieniających środek transportu z pociągów na autobusy komunikacji miejskiej był rozpatrywany w kontekście zmian czasu oczekiwania wynikających z synchronizacji rozkładów jazdy.

Wśród przedstawionych na rysunku 1.1. składowych czasu podróży kluczową rolę w zakresie synchronizacji rozkładów jazdy pełni **czas oczekiwania**, obejmujący czas między zakończeniem przejścia i rozpoczęciem przejazdu [185]. **Czas oczekiwania podczas zmiany środka transportu** to różnica między momentem odjazdu pasażera autobusem ze stanowiska przystankowego w węźle przesiadkowym a momentem wejścia pasażera na to stanowisko przystankowe po zrealizowaniu wcześniejszego przejazdu, przy czym oba przejazdy są realizowane w ramach jednej podróży.

Proces zmiany środka transportu dla potoku pasażerów jest procesem losowym i rozpatrywany jest w pracy w **ujęciu stochastycznym**, w którym czas oczekiwania pasażerów zależy nie tylko od rozkładu jazdy linii komunikacyjnych w poszczególnych kierunkach, zapewniających połączenie w określonych relacjach podróży, ale także od oddziaływania czynników o charakterze stochastycznym. Czas oczekiwania oszacowano z określonym prawdopodobieństwem ze względu na występowanie w węźle przesiadkowym:

- odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów,
- zróżnicowania czasu przebycia drogi przejścia przez różnych pasażerów,
- odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej.

Poza scharakteryzowaną strukturą wewnętrzną węzeł przesiadkowy funkcjonuje na określonym obszarze i realizuje zadania związane z obsługą podróży. Obszar, w którym możliwa jest realizacja podróży do i z węzła przesiadkowego pociągiem lub autobusem komunikacji miejskiej bez zmiany środka transportu zdefiniowano jako **obszar oddziaływania węzła przesiadkowego**. Dany obszar wyznaczany jest na podstawie tras linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy. Granice obszaru oddziaływania węzła przesiadkowego determinowane są przez krańcowe stanowiska przystankowe lub perony na trasach linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy.

Ponadto dla potrzeb badań przyjęto, że węzeł przesiadkowy funkcjonuje w skali doby tylko w przedziale czasu, w którym rozpatrywane są podróże ze zmianą środka transportu. Przedział ten określony został jako **okres funkcjonowania węzła przesiadkowego**² i w dysertacji wyznaczany jest na podstawie rozkładu jazdy dziennych linii komunikacyjnych. Nocne linie komunikacyjne nie zostały uwzględnione w pracy ze względu na:

- duży interwał między realizacją kolejnych kursów, dla którego w praktyce nie rozpatruje się synchronizacji rozkładów jazdy [193] i powodujący długi czas oczekiwania,
- wyraźnie odmienne trasy, znacznie dłuższe od tras linii dziennych, zapewniające w dużej mierze połączenia bezpośrednie w skali obsługiwanego obszaru,

² Pojęcie okresu funkcjonowania w skali doby było stosowane do opisu zadania na jednym z etapów opracowywania rozkładu jazdy pojedynczych linii komunikacyjnych m.in. przez prof. Wyszomirskiego [243]

- niewielką liczbę pasażerów podróżujących po obsługiwanym obszarze w typowych godzinach funkcjonowania linii nocnych, tym bardziej przy uwzględnieniu udziału podróży ze zmianą środka transportu w ogóle, w systemie komunikacji miejskiej,
- nakładanie się późnym wieczorem i bardzo wczesnym rankiem godzin funkcjonowania linii komunikacyjnych dziennych i nocnych w ciągu doby, powodujących zmniejszenie liczby pasażerów podróżujących pojazdami w kursach/połączeniach nocnych linii komunikacyjnych.

Dla potrzeb badań okres funkcjonowania węzła przesiadkowego został podzielony na pięć **okresów** [24, 110, 111, 148, 166]:

- okres wczesno poranny,
- szczyt poranny,
- okres między szczytowy,
- szczyt popołudniowy,
- okres wieczorny.

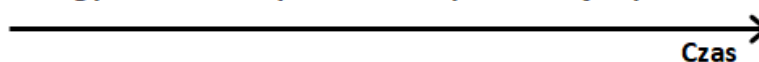
Wprowadzenie podziału pozwala odwzorować zmiany w ciągu doby liczby podróży realizowanych w poszczególnych relacjach i wynikające z tego różnice warunków ruchu w sieci transportowej pomiędzy okresami szczytu komunikacyjnego i okresami pozaszczytowymi. Skutkami wahań liczby podróży w dobie jest zróżnicowanie odchylek od rozkładu jazdy dla poszczególnych linii komunikacyjnych w **kierunkach jazdy i relacji w transporcie kolejowym**.

Ze względu na zróżnicowane oddziaływanie czynników na funkcjonowanie linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy i relacjach w transporcie kolejowym pojęcia kierunku jazdy i relacji w transporcie kolejowym lepiej niż definicja linii komunikacyjnej pozwoliły odwzorować ruch pojazdów w kursach i połączeniach kolejowych dla potrzeb opisu procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym. W związku z tym pojęcia „linie komunikacyjne w kierunkach jazdy” oraz „relacje w transporcie kolejowym” przyjęto w pracy do opisu realizacji podróży w poszczególnych relacjach.

W autobusowej komunikacji miejskiej kierunki jazdy linii komunikacyjnej określane są na podstawie stanowisk przystankowych, na których rozpoczynane są kursy handlowe. Przyjętym w pracy odpowiednikiem pojęcia kierunku jazdy linii komunikacyjnej jest w transporcie kolejowym pojęcie relacji. **Relacja w transporcie kolejowym** identyfikowana jest na podstawie stacji początkowej i końcowej, gdzie rozpoczynają się i kończą realizacje połączeń. Na rysunku 1.3. odwzorowano wybrane etapy podróży związane z realizacją procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym wraz z zestawieniem pojęć zastosowanych w rozprawie.

Elementy systemu i jego otoczenia	 Transport kolejowy	 Węzeł przesiadkowy	 Autobusowa komunikacja miejska
Realizacja podróży	 Pociąg	 Pieszy	 Autobus
Planowanie podróży	 Linia komunikacyjna	 Ciąg pieszy	 Linia komunikacyjna
Zmiana środka transportu	Połączenie kolejowe	Czas przejścia	Kurs
Sposób realizacji synchronizacji w pracy	 Relacja w transporcie kolejowym	 Droga przejścia	 Linia komunikacyjna w kierunku jazdy

Przebieg procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym



Rys. 1.3. Pojęcia z zakresu planowania podróży przyjęte w pracy do opisu procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym

Źródło: opracowanie własne

W pracy przyjęto, że każdy pasażer przyjeżdża do węzła przesiadkowego pociągiem i po wyjściu na peron przemieszcza się drogą przejścia do stanowiska przystankowego, z którego odjeżdżają autobusy komunikacji miejskiej w kierunku miejsca docelowego podróży danego pasażera. W momencie wejścia pasażera na stanowisko przystankowe rozpoczyna on oczekiwanie na odjazd z węzła przesiadkowego. Oczekiwanie kończy się w momencie odjazdu ze stanowiska przystankowego autobusu, do którego wsiadł dany pasażer w celu przejazdu do celu podróży.

Jednorazowy przejazd trasy linii komunikacyjnej między stacją początkową i końcową przez pociąg i opisany rozkładem jazdy definiowany jest jako **połączenie kolejowe**. Natomiast analogicznie w komunikacji miejskiej przejazd między przystankiem początkowym i przystankiem końcowym autobusu jest definiowany jako **kurs**.

Na funkcjonowanie PTZ oddziałuje nierównomierność czasowo-przestrzenna w wielkości zgłaszanego zapotrzebowania na przewozy pasażerskie, z uwzględnieniem podziału modalnego i motywacji podróży [252]. W rezultacie oddziaływania wskazanego czynnika, rzeczywista realizacja przewozów może różnić się od realizacji przewozów opisanej rozkładem jazdy [45, 140, 262, 268]. Nierównomierność oddziaływania w czasie i przestrzeni

w różny sposób wpływa na poszczególne **linie komunikacyjne w kierunkach jazdy**³ i **relacje w transporcie kolejowym**. Może to skutkować zróżnicowaniem czasu jazdy i punktualności odmiennymi dla poszczególnych linii komunikacyjnych i opisanymi innymi wartościami parametrów rozkładów prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłek od rozkładu jazdy w okresach [90, 217, 244]. Wpływ czasowo-przestrzennych wahań zgłaszanego zapotrzebowania na realizację przewozów na punktualność pojazdów komunikacji zbiorowej i możliwości odpowiedzi ze strony organizacji przewozów na występowanie zakłóceń cechuje odrębna specyfika w komunikacji miejskiej i transporcie kolejowym [240]. Skutkuje to zróżnicowaniem struktury odchyłek od rozkładu jazdy.

W pracy wyróżniono ponadto dwa typy linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy:

- **linie komunikacyjne w modyfikowanych kierunkach jazdy,**
- **linie komunikacyjne w niemodyfikowanych kierunkach jazdy,**

Wszystkie relacje w transporcie kolejowym rozpatrywane są w pracy jako niemodyfikowane.

Układ tras linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy w określonych kierunkach jazdy oraz relacji w transporcie kolejowym stanowi podstawę definicji i identyfikacji **segmentów**, z których każdy rozumiany jest w pracy jako kolejne stanowiska przystankowe lub perony zlokalizowane w obszarze oddziaływania węzła przesiadkowego i obsługiwane przez te same linie komunikacyjne w kierunkach jazdy lub te same relacje w transporcie kolejowym. Ze względu na lokalizację segmentu na trasie linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy lub relacji w transporcie kolejowym względem węzła przesiadkowego wyróżnione zostały w pracy dwa typy segmentów:

- **segmenty źródłowe** obejmujące perony, na których pasażerowie rozpoczynają przejazdy pociągami kończone w węźle przesiadkowym,
- **segmenty docelowe** obejmujące stanowiska przystankowe, na których pasażerowie kończą przejazdy autobusami komunikacji miejskiej rozpoczęte w węźle przesiadkowym.

Charakteryzującą podróżę uporządkowana para: segment źródłowy, segment docelowy definiuje w pracy pojęcie **relacji podróży**, która jednoznacznie identyfikuje miejsca rozpoczęcia i zakończenia podróży bez wskazania drogi, którą zrealizowano podróżę [36]. Natomiast **rozłożenie potoków pasażerów na kursy w węźle przesiadkowym** wynika z wahań czasowo-przestrzennych liczby realizowanych przez pasażerów podróży ze zmianą środka transportu w węźle przesiadkowym i związane jest z rozkładem jazdy w węźle przesiadkowym. Rozłożenie potoków pasażerów na kursy w węźle przesiadkowym opisuje dla każdego kursu dla linii komunikacyjnych obsługujących węzeł liczbę pasażerów, którzy realizując podróż ze zmianą środka transportu, wsiadają do autobusu komunikacji miejskiej w tym kursie. Dla każdego pasażera zmieniającego środek transportu w węźle przesiadkowym to, autobusem w którym kursie odjedzie z węzła zależy m.in. od:

³ Jest to pojęcie stosowane w zakresie PTZ m.in. przez prof. O. Wyszomirskiego w [243] i pozostaje w obszarze tematycznym związanym z kształtowaniem rozkładów jazdy.

- momentu wejścia tego pasażera na stanowisko przystankowe,
- momentów odjazdów ze stanowisk przystankowych w węźle przesiadkowym autobusów komunikacji miejskiej dla linii komunikacyjnych zapewniających połączenie węzła przesiadkowego z segmentem docelowym, zdefiniowanym w relacji podróży tego pasażera.

Natomiast moment wejścia pasażera na stanowisko przystankowe zależy od momentu przyjazdu tego pasażera pociągiem do węzła przesiadkowego oraz czasu, w którym przebędzie drogę przejścia.

Rozkład jazdy jest dla potrzeb pracy rozpatrywany w trzech zakresach:

- 1) **Rozkład jazdy w węźle przesiadkowym** to zestawienie planowanych momentów przyjazdów na tory przy peronach w węźle przesiadkowym pociągów w połączeniach kolejowych i odjazdów ze stanowisk przystankowych w węźle przesiadkowym wszystkich autobusów w kursach dla linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy w ciągu całego okresu funkcjonowania węzła przesiadkowego.
- 2) **Rozkład jazdy dla linii komunikacyjnej w określonym kierunku jazdy** opisuje planowane momenty odjazdów autobusów w kursach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy ze stanowiska przystankowego w węźle przesiadkowym i jest tym samym składową rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym.
- 3) **Rozkład jazdy dla relacji w transporcie kolejowym** opisuje planowane momenty przyjazdów pociągów na tor przy peronie w węźle przesiadkowym w połączeniach kolejowych dla relacji w transporcie kolejowym w ciągu doby i będący tym samym składową rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym.

Rola jaką pojedyncze węzły przesiadkowe pełnią w sieci transportowej i osadniczej determinuje **lokalne uwarunkowania** charakteryzujące każdy z węzłów i opisywane w pracy z zastosowaniem elementów publicznego transportu zbiorowego przedstawionych w niniejszym podrozdziale. Lokalne uwarunkowania powodują zróżnicowanie pomiędzy funkcjonowaniem poszczególnych węzłów przesiadkowych oraz odpowiadają za odmienną specyfikę i indywidualne cechy każdego węzła. W zakresie rozpatrywanym w dysertacji należy zatem wskazać na różnice w obsłudze węzła przez linie komunikacyjne (różna liczba linii, liczba i częstotliwość realizacji kursów, różna liczba, układ i obsługa segmentów), różną liczbę i układ przestrzenny elementów infrastruktury w węźle, w tym dróg przejścia, różnicowanych dodatkowo ze względu na rozwiązania urbanistyczne. Na indywidualne cechy węzła wpływa również liczba oraz czasowo-przestrzenna struktura potoków pasażerów wraz z wartościami opisującymi ich charakterystyki. Liczba i charakterystyki opisujące podróże realizowane w poszczególnych relacjach odpowiadają również za zmienne warunki ruchu na poszczególnych segmentach w obszarze oddziaływania węzła i zróżnicowanie tych warunków pomiędzy okresami. To z kolei determinuje odwzorowane w pracy występowanie odchyłek od rozkładu jazdy różnych dla poszczególnych linii komunikacyjnych w okresach i typach dni ruchowych.

Synchronizacja rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym (synchronizacja węzłowa) realizowana jest na taktycznym poziomie planowania transportu publicznego i polega na modyfikacjach rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym dla zdefiniowanych wcześniej i niezmiennych tras linii komunikacyjnych [168]. Synchronizacja rozkładów jazdy oddziałuje na czas oczekiwania pasażerów podczas zmiany środka transportu, który jest składową czasu podróży [13, 168].

W pracy przyjęto, że **synchronizacja rozkładów jazdy** obejmuje kształtowanie rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym, który zapewni pasażerom dogodną zmianę środka transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej. Działania polegają na doborze planowanych momentów odjazdów z węzła przesiadkowego autobusów komunikacji miejskiej w kursach dla wszystkich linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy względem planowanych momentów przyjazdów do węzła przesiadkowego pociągów w połączeniach kolejowych. Celem tego doboru jest zapewnienie najkrótszego średniego czasu oczekiwania wszystkich pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym w skali doby z pociągu na autobus komunikacji miejskiej. Może to, zwłaszcza w kontekście odchyłek od rozkładów jazdy, znacząco wpłynąć na decyzje pasażerów o wyborze transportu zbiorowego zamiast samochodu osobowego.

1.2. Obszary badawcze związane z tematem pracy

Niniejsza dysertacja dotyczy problematyki transportu zbiorowego. Zadaniem transportu zbiorowego jest zaspokajanie zgłaszanego zapotrzebowania mieszkańców na realizację podróży w relacjach. Współcześnie należy zwiększać rolę transportu zbiorowego jako alternatywnej względem samochodu osobowego formy przemieszczania [30, 62, 63, 67, 79, 221, 227]. Trwała zmiana dotychczasowych zachowań transportowych wymaga zwiększenia atrakcyjności transportu zbiorowego i budowania satysfakcji pasażerów poprzez systemowe podwyższanie jakości oferty. Jakość w transporcie zbiorowym to zespół cech i parametrów usługi przewozowej wpływających na zdolność zaspokajania potrzeb społeczeństwa korzystającego z PTZ. Konieczne jest spełnienie oczekiwań możliwie jak najszerzej grupy podróżnych [3, 28, 29, 53, 189]. Postulaty przewozowe wyrażają **formułowane przez pasażerów preferencje i oczekiwania wobec transportu zbiorowego**. Wśród najważniejszych cech atrakcyjnej oferty przewozowej należy wskazać [144, 185, 206, 243]:

- dużą dostępność obszaru zapewnianą przez transport zbiorowy:
 - przestrzenną - lokalizacja i liczba przystanków dopasowana do rozmieszczenia generatorów ruchu oraz układ tras dostosowany do relacji podróży,
 - czasową - krótki czas podróży i duża częstotliwość realizacji przewozów dla linii komunikacyjnych,
- wysoką punktualność środków transportu,
- komfort podróżowania,
- niewielki koszt,
- dużą niezawodność.

Liczne badania wykazały, że postrzegany czas trwania poszczególnych etapów podróży nie jest równy. Najgorzej postrzegany jest czas oczekiwania [23, 28, 120, 139, 213]. Niezbędne jest zatem podejmowanie działań przede wszystkim na rzecz skrócenia wskazanej składowej czasu podróży. Na postrzeganie czasu podróży wpływa również motywacja i stopień obligatoryjności podróży [185, 206, 243]. Konieczne jest zatem niwelowanie uciążliwości wynikających z realizacji procesu zmiany środka transportu, m.in. poprzez skrócenie czasu i poprawę warunków oczekiwania oraz niezawodności podróży, czyli realizacji zgodnie z przewidywaniami.

W niniejszej dysertacji, w odpowiedzi na zidentyfikowane problemy i potrzeby, transportowe rozpatrywane jest zagadnienie wpływu synchronizacji rozkładów jazdy na czas podróży pasażerów. Działania badawcze zostały ukierunkowane na minimalizację czasu oczekiwania podczas zmiany środka transportu. Synchronizacja realizowana jest w całym okresie funkcjonowania węzła, co implikuje, że w procesie budowy rozkładu jazdy czas oczekiwania rozważany w funkcji kryterium uwzględnia wielkości potoków pasażerów zmieniających środek transportu.

W proponowanej metodzie linie komunikacyjne opisywane są z uwzględnieniem wspólnych odcinków tras. Synchronizacja ukierunkowana jest na budowę rozkładów jazdy dla poszczególnych relacji podróży, z uwzględnieniem zgłaszanego zapotrzebowania oraz założenia stałego interwału międzykursowego w danych okresach dla każdej linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy. Warunek ten wpływa również na czas oczekiwania pasażerów nie zmieniających środka transportu, a korzystających z tych samych linii komunikacyjnych.

Przemieszczenia piesze są elementem każdej podróży, zatem uwzględnienie potrzeb i specyfiki ruchu pieszego w planowaniu oferty przewozowej wpływa na atrakcyjność publicznego transportu zbiorowego. Badania prezentowane w literaturze rozpatrują ruch pieszego w dwóch obszarach:

- 1) z perspektywy sprawności ruchowej pieszych, w tym pomiarów prędkości swobodnej [26],
- 2) z perspektywy prędkości potoku ruchu, oddziaływań pieszych w potoku i wpływu zatłoczenia na strukturę i wartość średnią czasu przejścia na wybranych elementach infrastruktury ruchu pieszego:
 - na ciągach pieszych podczas podróży pieszych [4, 39, 143, 187, 254],
 - podczas korzystania z transportu zbiorowego [40, 58, 103, 231, 246].

W wyróżnionych obszarach badawczych wykazano istnienie wyraźnych różnic w prędkości przejścia determinowanych przez wiele czynników psychomotorycznych badanej próby osób, tzn. nawet w warunkach braku oddziaływania otoczenia na ruch [26]. Wyniki tych badań uwzględniono w analizach przeprowadzonych w dysertacji. W celu wyznaczenia struktury czasu przebycia poszczególnych dróg przejścia wykonano badania symulacyjne ruchu pieszych, z uwzględnieniem zróżnicowanej prędkości przejść w populacji. Dotychczas w niewielu metodach synchronizacji brane były pod uwagę przejścia w węźle przesiadkowym podczas zmiany środka transportu [51, 127, 156, 238, 244]. Problem ten stanowi w niniejszej

rozprawie ważne zagadnienie w związku z rozpatrywaniem węzłów integrujących transport kolejowy i autobusową komunikację miejską.

Zapewnienie atrakcyjnego transportu zbiorowego osiągane jest m.in. poprzez **integrację podsystemów transportu zbiorowego**, która polega na wdrożeniu takiej organizacji transportu zbiorowego, aby z perspektywy pasażera swobodnie, łatwo można było przemieszczać się po całym obszarze funkcjonalnym, nie doznając uciążliwości wynikających ze zmiany środka transportu i podsystemu transportu zbiorowego [20, 30, 87, 153, 210]. Integracja w węźle przesiadkowym jest zagadnieniem wielowymiarowym i dotyczy różnych aspektów funkcjonowania transportu zbiorowego, w tym m.in. [38, 206, 243]:

- kształtowania tras i rozkładów jazdy linii komunikacyjnych,
- określania lokalizacji przystanków,
- ustalania jednolitej taryfy oraz kanałów dystrybucji i informacji dostosowanej do indywidualnych i aktualnych potrzeb.

W wyniku wdrożenia integracji zwiększa się komfort podróży transportem zbiorowym, w tym zmiany środka transportu i skracany jest czas podróży. Zagadnienie to stanowi współcześnie ważny problem badawczy i jeden z filarów wdrażania zrównoważonej mobilności [3, 60, 93, 161, 191]. Niniejsza dysertacja wpisuje się w tą problematykę, ponieważ obejmuje opracowanie metody wspierającej synchronizację rozkładów jazdy zwiększając dostępność czasową obszaru.

Integracja podsystemów transportu zbiorowego pozwala m.in. wykorzystać zalety różnych środków transportu w obsłudze przewozów na poszczególnych odcinkach trasy między miejscami rozpoczęcia i zakończenia podróży [6, 12, 30, 87, 222]. Kluczową rolę w tym zakresie stanowią **węzły przesiadkowe** jako miejsca integracji przestrzennej, zapewniające pasażerom warunki dla sprawnej zmiany środka transportu [78, 116, 172, 210, 249]. Ponieważ w wielu systemach nie ma uzasadnienia dla realizacji połączeń bezpośrednich we wszystkich relacjach podróży, konieczne jest zapewnienie połączeń, bazując na węzłach przesiadkowych. Atrakcyjność węzłów przesiadkowych i organizacji połączeń przesiadkowych wpływa na atrakcyjność całego systemu transportu zbiorowego [46, 114, 115, 116, 161]. W pracy uwzględniono wnioski ze współczesnych badań i opracowano metodę synchronizacji rozkładów jazdy na styku transportu kolejowego i autobusowej komunikacji miejskiej. Tym samym zapewnienie minimalizacji czasu oczekiwania podczas zmiany środka transportu może zachęcić pasażerów do podróży z zastosowaniem dwóch podsystemów transportu zbiorowego i zwiększyć dostępność czasową obszaru, koncentrując się na obsłudze relacji podróży zamiast na rozważaniu poszczególnych linii komunikacyjnych [210].

Opóźnienia w transporcie zbiorowym są współcześnie zjawiskiem powszechnym [23, 135, 155, 207, 248]. Niepunktualność doświadczana jest przez pasażerów na przystankach, podczas [250, 251]:

- oczekiwania na przyjazd środka transportu,
- wysiadania z pojazdu.

Powoduje to uciążliwości dla pasażerów i obniża atrakcyjność transportu zbiorowego [52, 207, 248, 250, 251]. Wraz ze wzrostem niepunktualności pasażerowie zwykle wcześniej rozpoczynają podróż, aby zapewnić punktualne dotarcie do miejsca docelowego. Niepunktualność jest szczególnie uciążliwa w podróżach ze zmianą środka transportu. Zbyt późny przyjazd do węzła powoduje niezrealizowanie przesiadki zgodnie z planem [250, 251, 267]. To z kolei powoduje wydłużenie czasu oczekiwania na odjazd kolejnego pojazdu w kursie zapewniającym połączenie węzła z segmentem docelowym. Występowanie opóźnień zwiększa dyskomfort i poczucie stresu wśród pasażerów w węźle przesiadkowym [68, 78, 99, 154, 174]. W procesie zmiany środka transportu im dłuższy planowany czas przesiadania, tym dłuższy i bardziej regularny, przewidywalny jest przeciętny czas oczekiwania przy jednoczesnym wzroście niezawodności realizacji zmiany środka transportu zgodnie z planem [3, 33, 36, 250, 251]. Krótki planowany czas na przesiadkę powoduje:

- spadek niezawodności,
- zwiększenie dyspersji czasu oczekiwania podczas zmiany środka transportu.

Poszukiwanie kompromisu między prawdopodobieństwem opuszczenia węzła przez pasażerów zgodnie z planem, autobusami, które według rozkładu jazdy odjeżdżają jako pierwsze po momentach wejścia pasażerów na stanowiska przystankowe a rozkładowym czasem przesiadania w węźle leży u podstaw proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy. Spadek niezawodności wydłuża czas oczekiwania, bo powoduje opuszczenie węzła kursem późniejszym niż planowano. Przyjęta funkcja kryterium wyraża czas oczekiwania z uwzględnieniem wpływu występowania regularnych odchyłek od rozkładu jazdy. W badaniach realizowanych w dysertacji analizowany jest wpływ uwzględniania odchyłek od rozkładu jazdy na czas oczekiwania podczas zmiany środka transportu w odniesieniu do rozwiązań wyznaczonych z pominięciem danych o odchyłkach od rozkładu jazdy. Analizowany jest również wpływ stanów atrybutów węzłów przesiadkowych na zróżnicowanie zmian czasu oczekiwania.

W dotychczasowej literaturze prezentowanych jest wiele **metod synchronizacji rozkładów jazdy** [59, 65, 124, 132, 137, 264]. Różnią się one:

- uwzględnianymi czynnikami, w tym zakresem odwzorowania stochastycznego charakteru funkcjonowania procesów ruchu,
- celem realizacji synchronizacji,
- kryterium, przy pomocy którego oceniane są wyznaczane rozwiązania,
- parametrami rozkładu jazdy modyfikowanymi podczas synchronizacji.

Wyróżniane są następujące główne grupy metod synchronizacji [95, 97, 142, 152, 198]:

- metody bazujące na heurystycznych zasadach, czyli zbiorze zaleceń i ogólnych wytycznych dotyczących budowy rozkładów jazdy [37, 59, 105, 170, 245].
- metody modelowania analitycznego, w których stosuje się algebrę i rachunek różniczkowy podczas synchronizacji oraz funkcje ciągłe do opisu składowych czasu podróży [51, 59, 215, 239, 242].

- metody programowania matematycznego – najobszerniejsza współcześnie grupa metod obejmująca metody dokładne, gwarantujące wyznaczenie rozwiązania optymalnego oraz metody heurystyczne i metaheurystyczne, obejmujące procedury wykorzystujące algorytmy genetyczne, algorytmy przeszukiwania lokalnego i algorytmy optymalizacji stadnej [70, 81, 159, 162, 195].
- metody modelowania symulacyjnego, w tym modele agentowe, których zastosowane dotychczas do problemu synchronizacji rozkładów jazdy opisano jedynie w kilku artykułach [56, 130, 158, 223].

Poszczególne metody zastosowano do synchronizacji rozkładów jazdy w zróżnicowanych warunkach od przykładowych sytuacji do rzeczywistych sieci transportu zbiorowego. Dlatego uzyskane wyniki nie są bezpośrednio porównywalne. Wynika to także z przyjęcia różnych funkcji kryterium do oceny wyznaczonych rozwiązań.

Przegląd literatury w zakresie metod synchronizacji stanowił w pracy podstawę identyfikacji luki badawczej i podstawę dla opracowania własnego modelu dla potrzeb opisu procesu zmiany środka transportu, proponowanej metody wraz z algorytmem obliczeniowym. Badania zrealizowane w dysertacji obejmują m.in. dobór wartości parametrów oraz analizę przebiegu zaproponowanego algorytmu obliczeniowego, w zastosowaniu do wybranych węzłów przesiadkowych zlokalizowanych na obszarze Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii. Wynikiem prac jest autorska metoda synchronizacji rozkładów jazdy uwzględniająca taką konfigurację czynników, która dotychczas nie była rozważana w literaturze. Wśród kluczowych czynników wskazać należy:

- uwzględnienie odchylek od rozkładu jazdy i zróżnicowania czasu przebycia dróg przejścia rozpatrywanych jako czynniki o charakterze stochastycznym, o zmienności i intensywności różnej dla poszczególnych linii komunikacyjnych i dróg przejścia w okresach doby,
- zorientowanie na obsłudze relacji podróży,
- synchronizację w całym okresie funkcjonowania węzła w skali doby,
- odwzorowanie wspólnych fragmentów tras linii komunikacyjnych,
- modyfikacje planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej ze stanowisk przystankowych,
- dostosowanie synchronizacji do momentów zgłoszeń na stanowisku przystankowym pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej w węźle,
- koncentrację na pasażerach zmieniających środek transportu, przy uwzględnieniu innych pasażerów korzystających z linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy.

Opracowanie narzędzia wspomagającego synchronizację rozkładów jazdy zgodnie z proponowaną metodą stanowi element użyteczny przeprowadzonych badań.

Jedną z dostępnych metod badania zjawisk losowych jest **modelowanie symulacyjne** [66, 97, 125, 175]. Podstawą postępowania w tej grupie metod, zwłaszcza w **symulacji typu Monte Carlo** jest wielokrotne powtarzanie realizacji procesu stochastycznego, każdorazowo poprzedzone losowaniem wartości danych wejściowych, parametrów modelu przyjmowanych w dalszej procedurze obliczeniowej stałych, a wyznaczanych na podstawie przyjętych rozkładów prawdopodobieństwa opisujących wybrane elementy procesu. W wyniku analizy uzyskiwana jest struktura wartości funkcji kryterium poddawana następnie ocenie, w tym z zastosowaniem miar statystyki opisowej. Modelowanie symulacyjne znajduje zastosowanie zwłaszcza do badania zjawisk i procesów złożonych, w związku z trudnością opisu problemu, w taki sposób aby zapewnić zgodność z wymaganiami metod analitycznych [8, 50, 85, 86, 230]. Zastosowanie modelowania symulacyjnego wspiera podejmowanie optymalnych decyzji i może zapewnić sprawne funkcjonowanie transportu zbiorowego, choć dotychczas jedynie w kilku artykułach podjęto problematykę synchronizacji rozkładów jazdy realizowanej poprzez symulację [56, 130, 158, 223].

Złożoność zagadnienia rozpatrywanego w rozprawie wynikała z konieczności wielokrotnej oceny czasu oczekiwania determinowanego przez rozkład jazdy przy równoczesnym rozpatrywaniu kilku czynników o charakterze stochastycznym. Zastosowane w rozprawie modelowanie metodą Monte Carlo pozwoliło odwzorować realizację procesu zmiany środka transportu rozpatrywanej dla potoku pasażerów. Ponadto za pomocą modelowania symulacyjnego wyznaczono w pracy strukturę czasu przebycia dróg przejścia w badanych węzłach przesiadkowych na obszarze Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii (GZM).

1.3. Cel, teza i zakres pracy

Zwiększenie atrakcyjności transportu zbiorowego stanowi współcześnie jeden ze sposobów skutecznego, trwałego wdrożenia koncepcji zrównoważonej mobilności [25, 67, 79]. Oznacza to, że w ujęciu ogólnym istotne jest zagadnienie jakości oferty przewozowej w podróżach pasażerów. Zapewnienie synchronizacji rozkładów jazdy w rzeczywistych warunkach funkcjonowania węzła przesiadkowego, a wynikających z lokalnych uwarunkowań, realizowanej w aspekcie czasu podróży pasażerów zmieniających środek transportu, stanowi współcześnie istotny problem badawczy, w ramach którego sformułowany został przedmiot rozprawy. Znalazło to odzwierciedlenie w temacie pracy dotyczącym uwzględnienia w metodzie synchronizacji wpływu regularnych odchyłek od rozkładu jazdy związanych z lokalnymi uwarunkowaniami funkcjonowania na czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu. Kluczowym wyzwaniem jest zrozumienie, jak odchyłki od rozkładu jazdy uwzględniane podczas synchronizacji wpływają na średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu oraz jak można poprawić jakość transportu zbiorowego, minimalizując czas oczekiwania pasażerów w węzle przesiadkowym mimo występowania odchyłek.

W związku z podjęciem w dysertacji problematyki synchronizacji rozkładów jazdy w aspekcie czasu podróży uznano za ważne i aktualne udzielenie odpowiedzi na następujące pytanie badawcze:

Czy synchronizacja rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym, uwzględniająca odchyłki od rozkładu jazdy, wpływa na wartość średni czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus w tym węźle, w odniesieniu do rozwiązań wyznaczonych z pominięciem danych o odchyłkach od rozkładu jazdy?

Przedmiotem rozprawy jest ocena wpływu uwzględniania odchyłek od rozkładu jazdy w synchronizacji rozkładów jazdy na średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym. W badaniach rozpatrywano jedynie występujące regularnie odchyłki od rozkładu jazdy, odwzorowujące lokalną specyfikę ruchu pojazdów i pieszych w węźle wynikającą z jego geometrii i obsługi jego obszaru oddziaływania przez transport zbiorowy.

Tezę pracy sformułowano w sposób następujący:

Synchronizacja rozkładów jazdy uwzględniająca odchyłki od rozkładu jazdy występujące w węźle przesiadkowym i realizowana z zastosowaniem przeszukiwania lokalnego pozwala skrócić średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus w tym węźle.

W rozprawie wyznaczono dwa cele ogólne: cel naukowy i cel użyteczny oraz na ich podstawie także cele szczegółowe.

Celem naukowym pracy jest opracowanie metody synchronizacji, która pozwoli zbadać wpływ uwzględnienia podczas konstrukcji rozkładów jazdy odchyłek od rozkładu jazdy, występujących w węźle przesiadkowym na zmianę czasu podróży pasażerów zmieniających środek transportu w ciągu doby w tym węźle, z pociągu na autobus komunikacji miejskiej.

Celem użytecznym pracy jest opracowanie narzędzia wspomagającego synchronizację rozkładów jazdy realizowaną według proponowanej metody, uwzględniającej odchyłki od rozkładu jazdy, występujące w węźle przesiadkowym.

Opracowana metoda może stanowić narzędzie wspomagania synchronizacji w węźle przesiadkowym integrującym przewozy pasażerskie w transporcie kolejowym i komunikacji miejskiej. Zastosowanie proponowanej metody pozwoli uwzględnić odchyłki od rozkładu jazdy podczas synchronizacji rozkładów jazdy, zapewniając lepsze dostosowanie funkcjonowania węzła przesiadkowego w zakresie czasu oczekiwania podczas zmiany środka transportu, dzięki dokładniejszemu odwzorowaniu procesu zmiany środka transportu. Wskazane zagadnienie dotyczy budowy rozkładu jazdy linii komunikacji miejskiej na podstawie oceny czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle, szacowanego z uwzględnieniem występowania odchyłek od rozkładów jazdy w danym węźle przesiadkowym. Dzięki proponowanym rozwiązaniom synchronizacja może zapewnić lepsze dostosowanie rozkładu jazdy do potrzeb pasażerów. Zastosowanie proponowanej metody pozwoli zwiększyć atrakcyjność PTZ poprzez poprawę jakości przy dopasowaniu opisu do zróżnicowanych uwarunkowań lokalnych, wynikających z roli węzła w sieci transportowej i osadniczej.

Na podstawie zdefiniowanych celów ogólnych określono następujące **szczegółowe cele pracy**:

- przeprowadzenie analizy porównawczej odchyłek od planowanych momentów: przyjazdów pociągów i odjazdów autobusów komunikacji miejskiej w wybranych typach dni ruchowych i okresach dla linii komunikacyjnych, obsługujących badany węzeł przesiadkowy oraz zbadanie zgodności rozkładów empirycznych z rozkładami teoretycznymi,
- zbadanie wpływu uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy w synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym, realizowanej przy pomocy dedykowanego narzędzia opracowanego na bazie autorskiej metody, na zmianę średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej w węźle przesiadkowym w ciągu doby.
- zbadanie wpływu:
 - lokalizacji węzła przesiadkowego w sieci transportowej i osadniczej, który spełnia przyjęte w pracy założenia,
 - wybranych typów dni ruchowych,
 - sposobów łączenia taktówna zróżnicowanie zmian średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągów na autobusy komunikacji miejskiej powodowanych uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji w węźle przesiadkowym względem synchronizacji rozkładów jazdy proponowaną metodą z pominięciem danych odchyłek, dla zbioru przypadków testowych wyróżnionych na podstawie kilku węzłów przesiadkowych wybranych do analizy.

Zakres podmiotowy stanowi proces zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym rozpatrywany w ujęciu ogólnym, odniesionym do potoków pasażerów. Przyjęte w pracy ujęcie stochastyczne obejmowało uwzględnienie losowości w obsłudze węzła przez komunikację miejską i transport kolejowy oraz zróżnicowany wśród pasażerów czas przebycia dróg przejścia.

Zakres czasowy pracy obejmuje okres funkcjonowania węzła przesiadkowego w skali doby. W analizie rozpatrywane są kursy dla obsługujących węzeł przesiadkowy dziennych linii komunikacyjnych w komunikacji miejskiej i połączenia kolejowe.

Zakres przedmiotowy pracy stanowi synchronizacja rozkładów jazdy realizowana w celu minimalizacji średniego czasu oczekiwania w węźle przesiadkowym pasażerów zmieniających środek transportu z pociągów na autobusy komunikacji miejskiej. W pracy pod uwagę brany jest średni czas oczekiwania przypadający na jednego pasażera. Czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu jest wypadkową momentów wejścia pasażerów na stanowiska przystankowe, na których zatrzymują się autobusy komunikacji miejskiej zapewniające połączenia w relacjach podróży i momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej ze stanowisk przystankowych w węźle. Momenty wejścia pasażerów na stanowiska przystankowe zależą od momentów przyjazdów do węzła przesiadkowego pociągów i czasów przebycia dróg przejścia. Synchronizacja rozkładów jazdy osiągnana jest

poprzez dopasowywanie planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej do momentów wejścia pasażerów na stanowiska przystankowe.

Badania w pracy skoncentrowano na opracowaniu metody synchronizacji rozkładów jazdy:

- w pojedynczych węzłach przesiadkowych na styku dwóch podsystemów transportu realizujących odrębne zadania przewozowe,
- uwzględniającej stochastyczny charakter procesu zmiany przez pasażerów środka transportu w węźle przesiadkowym, w tym występowania odchyłek od rozkładu jazdy,
- umożliwiającą odwzorowanie odmiennych dla poszczególnych węzłów ról w sieci transportowej i osadniczej w tym zróżnicowanych układów segmentów, wahań czasowo-przestrzennych struktury realizowanych podróży, geometrii węzła i obsługi przez transport zbiorowy,
- uwzględniającej czas oczekiwania wszystkich pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym w ciągu doby, wyrażony w jednostkach czasu bez różnicowania wartości czasu ze względu na cechy pasażerów i atrybuty podróży.

W pracy budowany jest rozkład jazdy w węźle przesiadkowym, który zapewnia najkrótszy średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej w całym okresie funkcjonowania węzła w skali doby.

Dane wejściowe dla opracowanej metody obejmują wielkość potoków pasażerów docierających do węzła przesiadkowego połączeniami kolejowymi, dotychczasowy rozkład jazdy dla wszystkich linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy i parametry opisujące czynniki o charakterze stochastycznym.

W pracy uwzględniono następujące czynniki wpływające na rozkład jazdy linii komunikacyjnych w poszczególnych modyfikowanych kierunkach:

- wielkość potoków pasażerów przesiadających się z transportu kolejowego na autobusową komunikację miejską w poszczególnych relacjach podróży, w tym w poszczególnych połączeniach,
- rozkłady jazdy w transporcie kolejowym,
- liczbę linii komunikacyjnych oraz liczbę kursów autobusowej komunikacji miejskiej w okresach umożliwiających realizację podróży w poszczególnych relacjach,
- układ segmentów w obszarze oddziaływania węzła,
- ograniczenia na dobór rozkładu jazdy dla linii komunikacyjnych w poszczególnych kierunkach,
- rozkłady jazdy dla linii komunikacyjnych w niemodyfikowanych kierunkach,
- stochastyczny charakter procesu zmiany środka transportu dla potoku pasażerów.

Zadania badawcze zrealizowane w celu weryfikacji przyjętej hipotezy obejmują:

- przegląd literatury w zakresie aktualnych zagadnień i problemów związanych z realizacją podróży środkami transportu PTZ w obszarze funkcjonalnym,

- przegląd literatury dotyczący metod i algorytmów synchronizacji rozkładów jazdy,
- opracowanie modelu węzła przesiadkowego i jego otoczenia dla potrzeb odwzorowania procesu zmiany środka transportu przez pasażerów z pociągu na autobus komunikacji miejskiej z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy dla linii komunikacyjnych i zróżnicowania czasu przebycia dróg przejścia,
- zbadanie odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów i odjazdów autobusów komunikacji miejskiej w wybranych węzłach przesiadkowych,
- zbadanie różnic pomiędzy odchyłkami od rozkładu jazdy charakteryzującymi poszczególne linie komunikacyjne w kierunkach jazdy, w poszczególnych typach dni ruchowych i okresach,
- wyznaczenie, z zastosowaniem modelowania symulacyjnego, dla każdej drogi przejścia w węźle przesiadkowym struktury czasu przebycia tej drogi przez pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym,
- opracowanie metody synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym i algorytmu postępowania,
- opracowanie narzędzia wspomagającego synchronizację rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym i ocenę wyznaczonych rozwiązań na podstawie oszacowania czasów oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z pociągów na autobusy komunikacji miejskiej,
- zbadanie wpływu zastosowania przeszukiwania z tabu na przebieg obliczeń i zmiany znajdowanych rozwiązań,
- implementację metody jako realizację eksperymentów badawczych,
- dokonanie oceny porównawczej średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z pociągów na autobusy komunikacji miejskiej dla rozwiązań wyznaczonych w kolejnych etapach w zależności od tego czy odchyłki od rozkładu jazdy są uwzględniane czy pomijane podczas synchronizacji,
- wykonanie analizy porównawczej średniego czasu oczekiwania pomiędzy rozkładem jazdy w węźle przesiadkowym wyznaczonym proponowaną metodą a zbiorem rozkładów jazdy spełniających ograniczenia nałożone w pracy na konstrukcję rozkładów jazdy,
- wyznaczenie różnic w czasie oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej między rozwiązaniami wyznaczonymi proponowaną metodą a obowiązującymi rozkładami jazdy w badanych węzłach przesiadkowych,
- weryfikację proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym obejmującą ocenę zmian wartości średniej czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z pociągu na autobus komunikacji miejskiej w rezultacie synchronizacji rozkładów jazdy proponowaną metodą z uwzględnieniem odchyłek od rozkładów jazdy w odniesieniu do rezultatów synchronizacji zrealizowanej z pominięciem danych odchyłek od rozkładów jazdy,
- przeprowadzenie oceny wpływu wybranych atrybutów charakteryzujących węzeł przesiadkowy (typ dni ruchowych, sposób łączenia taktów i lokalizacja węzła w sieci

transportowej i osadniczej) na zróżnicowanie zmian wartości średniej czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z pociągu na autobus komunikacji miejskiej w rezultacie synchronizacji rozkładów jazdy proponowaną metodą z uwzględnieniem odchyłek od rozkładów jazdy w odniesieniu do rezultatów synchronizacji zrealizowanej z pominięciem danych odchyłek od rozkładów jazdy

- weryfikację tezy i sformułowanie wniosków.

Weryfikację tezy sformułowanej w pracy przeprowadzono na podstawie badania wybranych, rzeczywistych węzłów przesiadkowych zlokalizowanych na obszarze GZM. Dla każdego z przyjętych węzłów przesiadkowych zastosowano proponowaną metodę synchronizacji rozkładów jazdy. Rozpatrywane atrybuty charakteryzujące węzły stanowiły podstawę wyróżnienia w każdym z węzłów kilku przypadków testowych poddanych synchronizacji proponowaną metodą oraz oceny wpływu stanów atrybutów na zróżnicowanie zmian średniego czasu oczekiwania w rezultacie uwzględnienia odchyłek od rozkładów jazdy podczas synchronizacji w porównaniu z synchronizacją zrealizowaną z pominięciem odchyłek.

Zakres pracy obejmuje część teoretyczną (rozdziały 1-5) i praktyczną (rozdziały 6-7). W części teoretycznej scharakteryzowano:

- stan zagadnienia w zakresie synchronizacji rozkładów jazdy w węzłach przesiadkowych (rozdział 2),
- opracowany model węzła przesiadkowego i jego otoczenia dla potrzeb opisu procesu zmiany środka transportu z pociągów na autobusy komunikacji miejskiej (rozdział 3),
- opracowaną metodę synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym zarówno w zakresie omówienia zadania optymalizacyjnego (rozdział 4) jak i algorytmu obliczeniowego (rozdział 5).

Natomiast w części praktycznej przedstawiono zakres, sposób realizacji i wyniki implementacji i walidacji opracowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy w zastosowaniu w wybranych węzłach przesiadkowych w GZM stanowiących w rozprawie podstawę wyróżnienia kilkunastu przypadków testowych (rozdział 6). Omówiono zmiany i zróżnicowanie zmian średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z pociągu na autobus komunikacji miejskiej wynikające z synchronizacji z uwzględnieniem odchyłek od rozkładów jazdy względem synchronizacji z pominięciem danych odchyłek (rozdział 6). Rozprawę zamykają wnioski sformułowane na podstawie uzyskanych wyników badań (rozdział 7). Wskazano oryginalne osiągnięcia metodyczne i praktyczne pracy. Omówiono rezultaty weryfikacji postawionej tezy oraz dokonano oceny realizacji celów pracy. Przedstawiono rekomendacje końcowe oraz zidentyfikowane potencjalne kierunki dalszych badań stanowiące rozwinięcie przyjętej w rozprawie tezy pracy.

2. Stan zagadnienia w zakresie synchronizacji rozkładów jazdy w węzłach przesiadkowych

2.1. Rola węzłów przesiadkowych w realizacji podróży w publicznym transporcie zbiorowym

Węzły przesiadkowe rozważano w niniejszym podrozdziale jako element systemu PTZ ważny z perspektywy pasażera. Dlatego analiza obejmowała kluczowe aspekty związane z oczekiwaniami pasażerów, ich zachowaniami podczas przesiadek, a także wpływem punktualności na postrzeganą jakość podróży. Rozszerzenie funkcjonalności węzłów przesiadkowych wynika z integracji różnych podsystemów transportowych. Wpływa to na czas oczekiwania pasażerów oraz komfort zmiany środka transportu. Przegląd dotychczasowych wyników badań pozwala na charakterystykę zachowań i decyzji pasażerów oraz wynikających z tego uwarunkowań dla potrzeb synchronizacji rozkładów jazdy.

Preferencje pasażerów

Użytkownicy transportu, zwłaszcza w codziennych podróżach wewnątrz obszarów funkcjonalnych oczekują coraz wyższej jakości, przystępnych cenowo oraz zapewniających sprawne i bezpieczne przemieszczanie się usług transportowych. Ponadto ważne jest ciągle usprawnianie obecnie funkcjonującego systemu transportowego poprzez ewolucyjne, cykliczne zmiany długości, układu, integracji sieci [60, 151, 216]. O jakości komunikacji miejskiej stanowi ogół linii komunikacyjnych, zorganizowanych według przyjętego klucza i określonej hierarchii połączeń [49, 108, 144, 146, 208]. Nie pojedyncze linie komunikacyjne ale cała sieć komunikacyjna, zbiór realizowanych połączeń, powiązań we wzajemnych relacjach stanowi istotę dobrze funkcjonującej komunikacji miejskiej na obszarze funkcjonalnym [49, 108, 144, 146, 208]. W literaturze wskazuje się na konieczność spójnej analizy, planowania i rozwoju transportu zbiorowego na obsługiwanym obszarze w ujęciu systemowym, zorientowanym na obsługę przewozową w poszczególnych relacjach podróży [30, 67, 87, 208, 249].

Kiedy pasażerowie planują podróż, ich postrzeganie cech mierzalnych (np. ocena czasu jazdy i oczekiwania, cech przesiadki), niemierzalnych (np. niechęć do spóźniania się, postrzeganie komfortu, efektywności wykorzystania czasu) oraz to, czy są częstymi, czy okazjonalnymi użytkownikami, ma istotny wpływ na zachowania transportowe i wybór środka transportu [107, 169, 185]. Perspektywa pasażera w planowaniu systemu transportu zbiorowego obejmuje tylko te elementy procesu planowania i organizacji systemu, które związane są z minimalizacją uogólnionego kosztu realizacji podróży. W głównej mierze dotyczy to minimalizacji czasu trwania składowych podróży [69, 107, 183, 226]. Uciążliwość poszczególnych składników podróży nie jest w ocenie pasażerów jednakowa, ze względu na zróżnicowanie warunków w jakich są realizowane i rozrzut czasu ich trwania [54, 55, 181, 226, 261].

Rekomendacje w zakresie doboru rozkładów jazdy w celu poprawy standardu obsługi pasażerów obejmują [107, 185, 267]:

- zapewnienie następstwa odjazdów o ustalonej liczbie minut w kolejnych godzinach funkcjonowania linii w celu realizacji postulatu łatwego zapamiętywania rozkładu jazdy,
- dostosowanie planowanych czasów przejazdu o wartościach dostosowanych do zmieniających się w ciągu doby warunków ruchu i wielkości potoku wymiany pasażerów na przystankach czyli stosowanie realistycznych rozkładów jazdy,
- synchronizację rozkładów jazdy podczas zmiany środka transportu jak i dla wiązki linii w tym także pojazdów różnych operatorów/przewoźników.

Działania wykonywane są z uwzględnieniem wybranych grup pasażerów lub całej populacji pasażerów [84, 169, 181, 183, 228]. Przyjmuje się różne wagi dla poszczególnych etapów podróży lecz optymalizacja dokonywana jest przez organizatora transportu, który w równym stopniu uwzględnia koszty wszystkich pasażerów branych pod uwagę w analizie [169, 228]. Oznacza to, że optymalizacja realizowana jest w sensie Stackelberga [95, 192] i zapewnia minimalizację uciążliwości jakiej doświadczają pasażerowie w związku z realizacją podróży. W zagadnieniach rozpatrywanych z perspektywy pasażera kluczowe miejsce zajmują dwa elementy [181, 192, 267]:

1. struktura czasowo-przestrzenna wielkości potoków pasażerów wraz z przypisaniem dróg przemieszczania (ang. Passenger assignment) [36, 183, 267].
2. uwzględnianie w funkcji kryterium tylko elementów realizacji podróży transportem zbiorowym istotnych i ocenianych przez pasażerów.

Postrzegana ocena czasu spędzonego w podróży jest subiektywna, ma charakter sytuacyjny i dynamiczny oraz zależy od jej celu [107, 226, 243, 247]. Poszczególne składowe czasu podróży mają różny wpływ na decyzje pasażerów o realizacji podróży transportem zbiorowym [48, 67, 122, 151, 192, 214, 243]. Prowadzenie odrębnych analiz obejmujących rolę, znaczenie, charakterystykę poszczególnych etapów podróży transportem zbiorowym daje dokładniejszy obraz transportu zbiorowego. Dla czasu oczekiwania, który w ocenie pasażerów ma największą wartość według badań psychologicznego wartościowania czasu podróży [21, 107, 154, 174, 207] istotne są częstotliwość, punktualność, rytmiczność i niezawodność. Czas oczekiwania odpowiada w największym stopniu za dyspersję czasu podróży [120, 185].

Podróżni często oceniają punktualność gorzej, niż wynika to z obiektywnej oceny, ponieważ większość podróży odbywa się w szczycie komunikacyjnym, doświadczając największych opóźnień w porównaniu z okresami pozaszczytowymi. Wydłużony czas oczekiwania i przejazdu powoduje dyskomfort i niepewność co do dalszej podróży. Szczególną uwagę na punktualność zwracają pasażerowie realizujący ściśle terminowe podróże [121, 185]. Wskazuje to na potrzebę uwzględniania postrzegania czasu podróży i punktualności przy konstrukcji rozkładu jazdy [11, 151]. W warunkach polskich choć poranny szczyt komunikacyjny zawiera się w krótszych ramach czasowych i cechuje się

większą intensywnością to właśnie w popołudniowym szczycie komunikacyjnym występuje najistotniejszy w dobie wzrost zjawiska kongestii ruchu powodującego m.in. opóźnienia w komunikacji miejskiej [144, 243].

Pasażerowie podczas podróży transportem zbiorowym najbardziej negatywnie odczuwają czas oczekiwania. Jest to czynnik wpływający na postrzeganą jakość transportu publicznego [68, 99, 122, 151, 226, 243]. W przeciwieństwie do przemieszczania się, oczekiwanie jest elementem pasywnym [144]. Przesiadki są nieodłącznym elementem transportu zbiorowego, generującym dodatkowe straty czasu [71, 74, 185]. Bezpośrednie połączenia między wszystkimi źródłami i celami podróży są niemożliwe do zapewnienia ze względu na nadmierne koszty, które znacznie przewyższałyby korzyści wynikające danego układu tras [46, 112, 114, 116, 144]. Konieczne jest ograniczenie zbędnego kluczenia i nakładania drogi przed dotarciem do celów podróży poprzez proste prowadzenie tras [3, 12, 13, 181, 261].

Jednocześnie występowanie przesiadek jest jednym z najgorzej postrzeganych elementów podróży transportem zbiorowym, skłaniając do wyboru innego środka transportu [185, 243]. Dodatkowy czas oczekiwania zależy od częstotliwości kursów i niepewności osiągnięcia założonej przesiadki na skutek opóźnień [13, 21, 84, 100, 174]. Uciążliwość jest różnie postrzegana, zależy m.in. od terminowości podróży. Pasażerowie decydują się na zmianę środka transportu w podróży tylko jeśli wynikające z tego korzyści przewyższą niedogodności. Kluczowe znaczenie ma organizacja przesiadek i warunki oczekiwania [13, 161, 172, 222, 226]. Dlatego należy skoncentrować działania w kluczowych lokalizacjach na zapewnieniu racjonalnego kształtowania atrakcyjności przesiadek, dostosowanych do potrzeb i oczekiwań bieżących i przyszłych użytkowników [68, 161, 222, 226, 249].

Podsumowując wyniki przeprowadzonego przeglądu literatury dotyczącej preferencji pasażerów uznano za zasadne uwzględnienie w sposób bezpośredni w proponowanej metodzie następujące elementy. Skoncentrowanie rozważań na jednej, najbardziej uciążliwej składowej całkowitego czasu podróży środkami transportu zbiorowego, jaką jest czas oczekiwania podczas zmiany środka transportu, ukierunkowanie na perspektywę pasażera oraz zapewnienie możliwie najbardziej atrakcyjnych warunków realizacji podróży ze zmianą środka transportu. Odzworowano zatem wskazany czas oczekiwania w funkcji kryterium.

Wskazano, aby synchronizacja rozkładu jazdy zapewniała minimalizację czasu oczekiwania w relacjach podróży, zamiast rozpatrywania odstępów czasu pomiędzy przyjazdami i odjazdami środków transportu. W tym zakresie w pracy odzworowano sieć PTZ w postaci segmentów. Uwzględniono strukturę obsługi połączeń z węzła przesiadkowego z segmentami sieci, z rozróżnieniem liczby kursów oraz udziału pasażerów przesiadających się. Ważnym współcześnie aspektem jest uwzględnianie zróżnicowania populacji pasażerów wpływające na prędkość przejść w węzle.

Uwzględnienie potrzeb pasażerów wymaga analizy w skali całej doby. Zastosowano podejście oparte na odtworzeniu struktury czasowo-przestrzennej wielkości potoków pasażerskich. Opracowanie metody synchronizacji w pojedynczych węzłach przesiadkowych zapewnia większą elastyczność i umożliwia koncentrowanie zmian rozkładów jazdy w kluczowych lokalizacjach sieci transportowej. Wprowadzenie buforowania czasu

zatrzymania wiązałoby się z dodatkowymi uciążliwościami dla pasażerów. Jednocześnie zachowanie rytmicznego charakteru rozkładów jazdy w ramach poszczególnych linii komunikacyjnych, niezależnie dla każdego kierunku ruchu jest korzystne dla pasażerów niezmieniających środa transportu. Co jest ważne, gdy udział pasażerów przesiadających się nie jest dominujący.

Integracja podsystemów transportu pasażerskiego

Integracja podsystemów transportu zbiorowego w spójny system zapewnia użytkownikom atrakcyjną ofertę dzięki komplementarności i substytucyjności [7, 12, 30]. Integracja podsystemów ułatwia przemieszczanie się oraz zmniejsza uogólnione koszty podróży [12, 191, 202, 216, 235, 243]. Podstawą systemu jest możliwość realizacji podróży różnymi środkami transportu, przy czym najważniejsi są pasażerowie oraz ich oczekiwania [7, 12, 18, 30, 87, 210].

Za podstawowe cele integracji transportu zbiorowego uznaje się [49, 84, 203, 208, 243]:

- zaoferowanie wyższej niż w przypadku dezintegracji podsystemów PTZ jakości usług, w zakresie wszystkich postulatów,
- zwiększenie, poprawa konkurencyjności transportu zbiorowego względem transportu indywidualnego,
- racjonalizację kosztów funkcjonowania transportu zbiorowego,
- wkład transportu zbiorowego w rozwój miast, obszarów funkcjonalnych i regionów.

Skrócenie czasu podróży transportem zbiorowym to kluczowy efekt integracji [243]. Osiąga się je poprzez koordynację rozkładów jazdy, zwiększenie prędkości przejazdu oraz ułatwienie przesiadek. Równie istotne są inne elementy zintegrowanej oferty, takie jak częstotliwość, rytmiczność i punktualność [243].

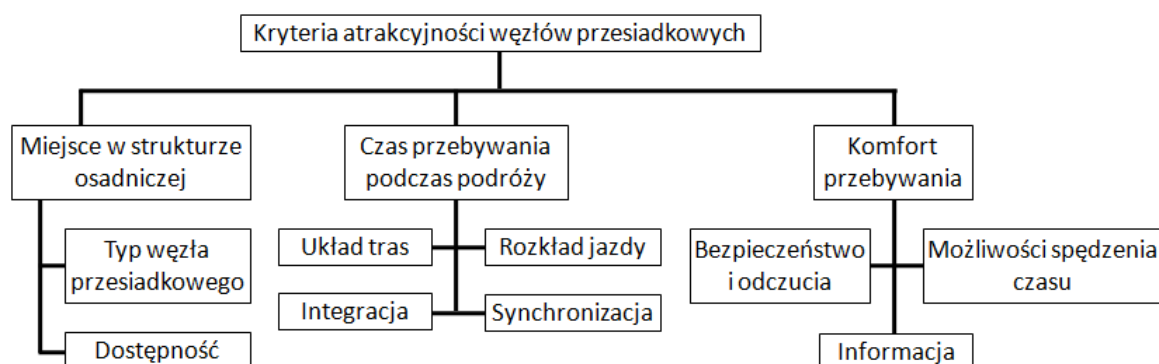
Ważną rolę w systemie transportowym pełnią węzły przesiadkowe, będące miejscem integracji sieci [46, 71, 74, 114, 202, 210]. W dużych miastach węzły przesiadkowe podnoszą mobilność, umożliwiając podróże w relacjach, dla których połączenia bezpośrednie byłyby zbyt kosztowne [108, 112, 139, 146, 216, 243]. Literatura przedstawia różne klasyfikacje węzłów przesiadkowych, wynikające z ich roli w systemie [15, 116]. Węzły znajdujące się w otoczeniu linii kolejowych stanowią przypadek szczególnie ważny [17, 106, 116, 202]. Ze względu na wielkość i układ stacji oraz liczne linie komunikacji miejskiej obsługujące węzeł i prowadzone różnymi trasami, zapewnienie skomunikowania różnych środków transportu jest wyzwaniem, utrudniającym tworzenie funkcjonalnych węzłów [115]. Węzły przesiadkowe odgrywają ważną rolę we wszystkich aspektach integracji systemu transportu zbiorowego [15, 71, 74, 104, 210, 249] m.in. poprzez organizacyjne, czasowe i przestrzenne oddziaływanie na system transportu zbiorowego:

- Oddziaływanie organizacyjne węzła przesiadkowego obejmuje kryteria, zasady powiązania rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym pozwalające spełnić oczekiwania pasażerów. Planowane momenty przyjazdów i odjazdów środków transportu różnych

linii komunikacyjnych dostosowywane są do realizacji podróży ze zmianą środka transportu w węźle przesiadkowym,

- Oddziaływanie czasowe wynika z czasu oczekiwania pasażerów, zależnego od parametrów rozkładów jazdy linii komunikacyjnych obsługujących węzeł [104, 238],
- Oddziaływanie przestrzenne węzła przesiadkowego dotyczy ukształtowania tras linii komunikacyjnych obsługujących węzeł zależnego od przypisanej roli węzła w systemie transportu zbiorowego wynikającej z układu sieci transportowej i osadniczej [100].

Poprawa atrakcyjności czasu przesiadania się realizowana jest w trzech obszarach wskazanych na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Zestawienie kategorii i kryteriów oceny atrakcyjności węzłów przesiadkowych
Źródło: opracowanie własne na podstawie [78]

Równoczesne działania w różnych obszarach atrakcyjności węzłów przesiadkowych przyczyniają się do wzrostu liczby pasażerów. Połączenia ze zmianą środka transportu są atrakcyjne, gdy oferują krótszy czas podróży, względem połączeń bezpośrednich, w tym realizowanych samochodem osobowym. Kluczowe jest oddziaływanie na wszystkie składowe czasu podróży, zapewniając minimalny czas oczekiwania dzięki synchronizacji oraz lepszą dostępność transportu miejskiego, dzięki integracji w węzłach zwiększając liczbę relacji, w których zapewnione są połączenia [14, 18, 29, 68, 172, 261].

Pasażerowie, zwłaszcza regularnie podróżujący, preferują węzły przesiadkowe z minimalnym czasem oczekiwania [21, 30, 154]. Wskutek synchronizacji mogą jednak wzrosnąć wydatki na realizację połączeń i trudność planowania transportu [10, 19, 31, 44, 107]. Kompromisem jest identyfikacja kluczowych węzłów z dużą wymianą pasażerską, gdzie priorytetem jest skrócenie czasu oczekiwania [44, 243, 249].

Procesy zachodzące w węźle i systemie transportowym mają charakter stochastyczny, dlatego niezbędne jest określenie charakterystyk probabilistycznych [185]. Skomplikowana struktura ruchu i usług, wynikająca z wielu zmiennych losowych, utrudnia pełny opis systemu [38, 77, 185]. Ze względu na złożoność zagadnienia i wpływ węzłów przesiadkowych na planowanie systemu transportu zbiorowego konieczne jest w analizach stosowanie matematycznych i fizycznych modeli funkcjonowania węzłów.

Ze względu na wykazaną w literaturze istotną przewagę zintegrowanych podsystemów PTZ rozpatrywanych wspólnie względem nieskoordynowanego planowania i organizacji przewozów w poszczególnych podsystemach PTZ w zwiększaniu atrakcyjności PTZ względem transportu samochodowego przyjęto w pracy opracować metodę przeznaczoną szczególnie do stosowania w zintegrowanych węzłach przesiadkowych, w punktach sieci łączących transport kolejowy i autobusowy. Tym bardziej, że rozpatrywanie węzłów związanych z koleją w aspekcie PTZ jest wskazywane współcześnie jako istotne, złożone zagadnienie badawcze. Problematy zapewniania integracji podsystemów transportu PTZ w tym kwestie dotyczące węzłów przesiadkowych, w które wpisuje się proponowana metoda koncentrują się na niwelowaniu dotychczasowej niechęci pasażerów do przesiadania się poprzez zapewnienie atrakcyjnych warunków zmiany środka transportu i likwidowaniu barier. W opracowanej metodzie uwzględniono specyfikę geometryczną węzłów, w tym niezerowy czas przejścia między peronem kolejowym a stanowiskiem przystankowym, jako element wpływający na przebieg procesu przesiadkowego. Ponadto w modelu odwzorowano stochastyczny charakter procesów transportowych, typowy dla systemów rzeczywistych, co pozwala lepiej odzwierciedlić zmienność warunków ruchu i zachowań pasażerów.

Punktualność

Wzrost mobilności wiąże się ze zwiększeniem obciążenia systemu transportowego, podkreślając znaczenie niezawodności sieci transportowej. Na wybory dotyczące formy i czasu realizacji podróży ma wpływ nie tylko doświadczany średni czas podróży, ale także jego zmienność [19, 52, 155, 174, 248]. W przypadku transportu autobusowego ruch pojazdów PTZ realizowany jest w ogólnym ruchu drogowym. Pogarsza to płynność jazdy oraz przewidywalność czasu przejazdu, co utrudnia konstrukcję rozkładów jazdy [16, 128, 144, 240]. Ocena wpływu opóźnień na atrakcyjność transportu zbiorowego powinna uwzględniać zmiany dostępności, czasu, kosztów i komfortu podróży [72, 106, 202, 233, 250].

Współcześnie w warunkach polskich opóźnienia w transporcie zbiorowym są zjawiskiem powszechnym [16, 104]. W pracy [104] obejmującej badania punktualności wybranych linii tramwajowych w Krakowie w sierpniu 2016 roku wskazano, że w przypadku 60% kursów występują odchyłki od rozkładu jazdy. Średnia odchyłka wynosi 58 s o odchyleniu standardowym 1,23 min. Potwierdza to wcześniejsze wyniki badań komunikacji miejskiej w Krakowie z roku 1998, gdzie wskazano, że rozkład odchyłek jest asymetryczny, występują niewielkie wartości ujemne średnie wynoszące około 1÷2 min natomiast odchylenie standardowe rozkładu odchyłek zwykle zwiększa się wraz z przebywaniem trasy linii komunikacyjnej wynosząc średnio 1÷3 min [185].

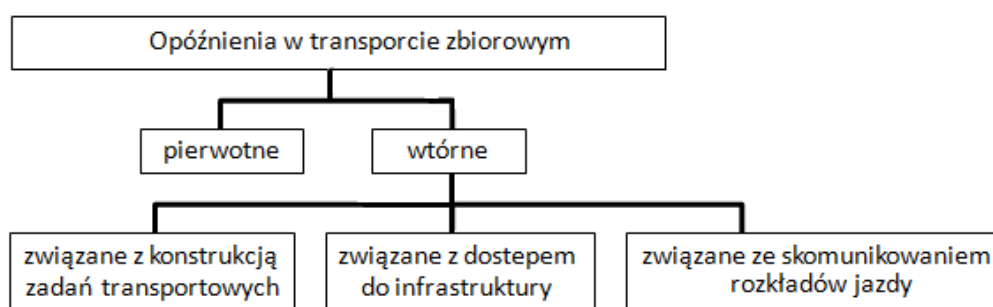
Ostatnie wyniki badań wskazują, że w zakresie analiz związanych z czasem podróży do opisu empirycznych rozkładów prawdopodobieństwa stosowane są mieszaniny rozkładów: mieszanina rozkładów normalnych lub mieszanina rozkładów logarytmiczno-normalnych [129]. Czas podróży wynika z sumarycznego oddziaływania w tym samym czasie czynników o charakterze stochastycznym o różnej intensywności, w tym zróżnicowanych warunków drogowych. Mieszaniny rozkładów pozwalają opisać dużą zmienność struktury danych,

cechujących się umiarkowaną prawostronną skośnością [129]. Przykładowo w pracy [127] wskazano, że w Holandii odchyłki od rozkładu jazdy pociągów można opisywać przy pomocy rozkładu logarytmiczno-normalnego [127]. Wzrost średniego czasu przejazdu oraz wzrost dyspersji powodowane są wzrostem natężenia ruchu do wartości bliskich przepustowości [185].

System drogowy uznaje się za niezawodny, gdy czasy podróży o różnych porach dnia i różnych dniach tygodnia są zbliżone, a zatem przewidywalne, nawet jeśli sieć nie działa z powodu regularnie niskich prędkości [216]. Stałość czasu podróży, zwłaszcza codziennych jest kluczowa dla pasażerów autobusowej komunikacji miejskiej. Zmienność czasu przejazdu w ramach tej samej trasy utrudnia planowanie podróży. Im pilniejsza podróż, tym większą uciążliwość stanowi rozrzut czasów przejazdu [185, 216, 243].

Dobrze skonstruowany rozkład jazdy powinien zapewniać punktualność w komunikacji miejskiej i kolejowej [128, 144, 192, 216, 257]. Postulowane przez pasażerów dążenie do skracania czasu podróży może prowadzić do pogorszenia niezawodności przewozów powodowanego wpływem warunków ruchu [21, 68, 99, 154]. Wskazane jest zatem dążenie do zapewnienia przesiadki (w jednym lub wielu kierunkach) i mechanizmów kompensacji opóźnień uwzględniając liczbę linii komunikacyjnych i interwał w różnych okresach doby [144, 243]. Istotą współczesnego podejścia jest opis funkcjonowania transportu zbiorowego w warunkach niepewności [185].

Czas podróży jest istotnym wskaźnikiem sprawności sieci transportowej. Niezawodność przejazdu zmienia się w czasie, zależnie od wielu czynników, zarówno stałych, jak i trudnych do przewidzenia, które mogą powodować [31, 73, 90, 91, 216]. Czas podróży charakteryzuje się dużą zmiennością, dlatego podróżni wybierają wcześniejszy moment rozpoczęcia podróży, aby zwiększyć szanse na punktualne dotarcie do celu. Zwiększenie niezawodności stanowi wyraźną korzyść dla podróżnych [100, 185, 243]. Pozwala to zmniejszyć wpływ i skutków opóźnień, których klasyfikację na podstawie przyczyn przedstawiono na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Klasyfikacja opóźnień w transporcie zbiorowym

Źródło: opracowanie własne na podstawie [84, 144]

Opóźnienia pierwotne determinowane są przez zakłócenia występujące w czasie realizacji kursu i dotyczą opóźnień odjazdu z kolejnych stanowisk przystankowych na trasie mimo punktualnego rozpoczęcia realizacji kursu [144]. Opóźnienia wtórne wynikają z powiązań czasowych i przestrzennych w systemie transportu zbiorowego i są skutkiem oddziaływania

opóźnień pierwotnych rozprzestrzeniających się w sieci transportu zbiorowego, których rozkład jazdy nie jest w stanie skompensować [84, 144]. Opóźnienia związane są:

- z konstrukcją rozkładu jazdy gdy czas postoju na pętli między realizacją dwóch kolejnych kursów jest mniejszy niż wielkość opóźnienia.
- ze skomunikowaniem rozkładów jazdy, gdy konieczne jest zagwarantowanie pasażerom zmiany środka transportu. Wstrzymanie odjazdu następuje do czasu przyjazdu opóźnionego środka transportu [144].
- z dostępu do infrastruktury w transporcie szynowym i zależą od ustalonej kolejności ruchu [31, 96]. Przyjazd lub odjazd środków transportu często następuje dopiero po wykonaniu manewru przez inny środek transportu nawet bez względu na opóźnienie [96].

Obecne badania koncentrują się głównie na niezawodności transportu zbiorowego. Analizowane są powtarzające się, niewielkie zakłócenia, które nie wpływają na dostępność infrastruktury [17, 250]. Przykłady działań poprawiających niezawodność na poziomie strategicznym, taktycznym i operacyjnym w poszczególnych podsystemach transportu zbiorowego można znaleźć m.in. w [31, 33, 73, 101, 216].

W transporcie kolejowym rozkład jazdy zależy od przepustowości sieci, organizacji ruchu, współdzielenia infrastruktury [31, 33, 96, 183]. Rozkład jazdy jest konstruowany z perspektywy operatora, przez co może nie w pełni odpowiadać potrzebom pasażerów [169, 183]. Opóźnienia pociągów są mniejsze niż opóźnienia pasażerów podczas realizacji podróży wynikające z zakłóceń w transporcie [100, 169].

Uwzględnienie odchylek podczas konstrukcji rozkładu jazdy w postaci dodatkowego czasu postoju na stacjach lub pętlach pozwala kompensować opóźnienia zmniejszając wpływ zakłóceń na punktualność i realizację podróży zgodnie z planem [31, 151, 169]. Odporność sieci transportu zbiorowego jest obecnie rozważana oddzielnie dla każdego podsystemu transportu zbiorowego i każdego operatora [33, 101, 174, 189, 216]. Powoduje to, że dostosowanie zadań transportowych do zakłóceń dotyczy jedynie obsługiwanej części sieci, co może prowadzić do niedopasowania zoptymalizowanych podsieci do potrzeb podróży „od drzwi do drzwi” [216, 243, 251]. Powiązania między podsystemami transportu zbiorowego nadal nie są w pełni uwzględniane [134, 201].

W świetle przeglądu literatury, w pracy przyjęto za konieczne uwzględnienie stochastycznego charakteru odchylek od rozkładu jazdy, zwłaszcza w podsystemach transportu działających w ruchu ogólnym. Ze względu na asymetryczność rozkładu odchylek oraz istotnego wpływu charakterystyki trasy linii komunikacyjnej na rozkład odchylek w poszczególnych punktach trasy konieczne jest przyjęcie rozkładu prawdopodobieństwa o parametrach pozwalających na elastyczne odwzorowanie kształtu rozkładu prawdopodobieństwa. Przyjęto mieszaninę rozkładów normalnych ze względu na to, że była już stosowana jako rozkład prawdopodobieństwa opisujący zmienność czasu podróży. Ze względu na ograniczony wpływ operatora/przewoźnika w kolejowych przewozach pasażerskich na dobór rozkładu jazdy oraz jednocześnie uzależnienie rozkładu jazdy

i propagacji zakłóceń w systemie transportu kolejowego wynikających z zasad organizacji systemu i prowadzenia ruchu w proponowanej metodzie odwzorowano występowanie odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów na tory przy peronach w węźle oraz założono, że rozkład jazdy w transporcie kolejowym będzie daną wejściową, niezmienną podczas synchronizacji rozkładu jazdy w komunikacji miejskiej.

Zgodnie z aktualnym podejściem badawczym dotyczącym niezawodności transportu zbiorowego, które koncentruje się na powtarzalnych, niewielkich zakłóceniach, uwzględniono w metodzie typowe, regularnie występujące odchyłki od rozkładu jazdy. Zmienność czasu podróży odwzorowano w metodzie poprzez szacowanie wartości funkcji kryterium na podstawie zbioru pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu rozpatrywanego w ujęciu ogólnym, potoku pasażerów. Powiązania między podsystemami transportu zbiorowego nadal nie są w pełni uwzględniane. Zatem wskazane jest tworzenie prac uwzględniających ten aspekt w ujęciu zintegrowanym łącznym. W synchronizacji rozkładów jazdy w proponowanej metodzie rozpatrywane były odchyłki w aspekcie czasu podróży pasażerów w poszczególnych relacjach.

Badania ruchu pieszego

Ruch pieszcy jest podstawą zrównoważonego rozwoju miast [62, 63, 146, 191, 221]. Nowego znaczenia nabrały prowadzone od dziesięcioleci badania ruchu i zachowań pieszych podczas realizacji podróży. Problem pozostaje nadal aktualny, obejmuje nie tylko parametry ruchu poszczególnych osób ale również oddziaływanie pieszych w potoku i wybór drogi w funkcji charakterystyki cech i parametrów infrastruktury [47, 121, 141, 221]. Charakterystyki ruchu pieszego, a w szczególności prędkość piesza wyznaczone są dla poszczególnych grup osób, klasyfikowanych odrębnie przez poszczególnych autorów. Wyniki przeglądu literatury w tym zakresie przedstawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1 Analizowane w literaturze wybrane czynniki różnicujące prędkość przejścia

Artykuł	Wiek	Miejsce pracy w relacji do badanego obszaru	Główny środek transportu	Swoboda i gwałtowność ruchu	Płeć	Liczebność grupy	Cel podróży	Okres doby	Kąt pochylenia drogi(różnic poziomów)
Bohannon 2011 [26]	✓				✓				
Chen 2016 [40]					✓	✓			
Pinna 2018 [171]	✓								
Kasehyani 2019 [103]				✓				✓	
Sangeeth 2019 [187]	✓					✓	✓		
Aghabayk 2021 [4]	✓				✓				✓
López 2021 [141]	✓	✓	✓						
Zhou 2021 [265]				✓					

Zródło: opracowanie własne

Urbaniści, projektanci miejscy i decydenci potrzebują skutecznych narzędzi do prognozowania ruchu pieszych oraz oceny dostępności i funkcjonalności istniejących lub planowanych przestrzeni miejskich [47, 151, 197]. Badania nad ruchem pieszym stanowią

podstawę opracowywania i kalibracji metod modelowania, umożliwiając wierne odwzorowanie lokalnych uwarunkowań ruchu w analizowanych obszarach [47, 121, 197].

W rezultacie licznych badań [47, 55, 141, 187, 265] wykazano, że prędkość przejścia jest zróżnicowana w populacji nawet przy braku oddziaływania czynników zewnętrznych jak charakterystyka drogi czy występujące przeszkody. Przejścia stanowią ważny element realizacji podróży środkami transportu zbiorowego dlatego wiele badań koncentruje się na czasie przejścia w obiektach związanych z transportem [40, 47, 54, 55].

W rezultacie badań [40, 266] wykazano, że czas przejścia jest charakteryzowany przez rozkład logarytmiczno-normalny i zależy od trajektorii ruchu jaką przemieszczał się pieszy. Trajektorja w każdym momencie przemieszczania wynika z decyzji/wyborów podejmowanych przez pieszego [39, 47] i determinowana jest przez:

- motywację (miejsce docelowe, do którego realizowane jest przemieszczenie),
- czasowe i przestrzenne rozmieszczenie innych pieszych i przeszkód w ruchu,
- dotychczasową trasę, którą od źródła do bieżącego miejsca przemieszczał się pieszy.

W pracy [241] wskazano zróżnicowanie trajektorii ruchu pieszych w węźle przesiadkowym w zależności od stopnia znajomości geometrii ciągów pieszych. Pasażerowie regularnie korzystający z węzła przemieszczają się tak, aby przebyć najmniejszy dystans [260]. Wszyscy pasażerowie dążą do minimalizacji uciążliwości przejścia tzn. realizacji przejścia zgodnie z własnymi preferencjami na bazie doświadczeń i podejmują decyzję na podstawie lokalnych warunków ruchu, obserwacji bieżącego otoczenia związanego z polem widoczności, co zrozumiałe bez systemowej eksploracji węzła przesiadkowego [47, 241, 260]. Ze wzrostem gęstości ruchu maleje średnia prędkość przejścia [47, 171] oraz entropia prędkości [47, 256]. Wykazano również wpływ oddziaływania schodów na zmianę średniej prędkości przejścia [4]. Przepływ pieszych jest z natury bardziej złożony niż przepływ pojazdów, a opracowanie mikroskopowego modelu przepływu pieszych zawsze było trudnym zadaniem dla badaczy [47, 246].

W literaturze [47, 141, 265] wskazuje się węzły przesiadkowe jako jeden z istotnych generatorów ruchu pieszego, które poddawane są odrębnym badaniom zachowań i charakterystyk ruchu podróźnych. W badaniu [58] przedstawiono metodę identyfikacji rozkładów czasu przejścia podczas zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym z autobusu na pociąg, na podstawie danych z systemu biletów elektronicznych. Analiza obejmowała oszacowanie rozkładu czasu przejścia dla dwóch typów węzłów przesiadkowych:

- węzłów, w których pasażerowie spędzają dodatkowy czas podczas przesiadki z powodu słabej synchronizacji między autobusami i pociągami,
- węzłów, gdzie pasażerowie realizują podczas przesiadki inne, pozatransportowe aktywności związane ze skorzystaniem z oferty firm handlowych i usługowych, w krótkim czasie zorientowanym na określony cel.

W rezultacie badań [58], poza wykazaniem istotnej przewagi zastosowanej metody nad pomiarami ręcznymi wykryto, że czas przebycia dróg przejścia w węźle przesiadkowym

jest opisany rozkładem o umiarkowanej prawostronnej skośności. Autorzy zaproponowali zastosowanie mieszaniny dwóch rozkładów normalnych do charakterystyki zbadanego zjawiska. Dyspersja czasu przejścia związanego z realizacją dodatkowych aktywności jest większa a kurtoza mniejsza niż wartości wskazanych parametrów charakteryzujących czas bezpośredniego przejścia dróg w węźle. Wskazano, że pominięcie pasażerów realizujących dodatkowe aktywności, których udział w populacji jest mały, powoduje niedoszacowanie czasu potrzebnego na przebycie dróg przejścia.

Analiza porównawcza wynikowego rozkładu czasu przejścia z czasem przejścia przyjętym przez organizatora transportu ma na celu identyfikację miejsc, w których występują największe rozbieżności. Wynikiem analizy jest zmiana zakładanych czasów przejścia. W ten sposób można zaplanować bardziej niezawodne połączenia między autobusami i pociągami, uwzględniając zmienność czasu przejścia pasażerów [58].

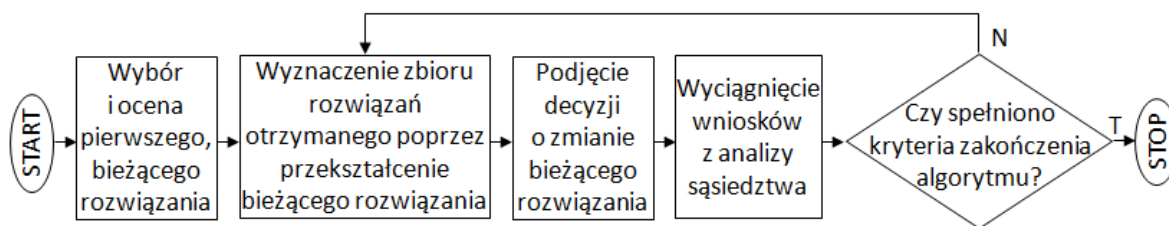
Ze względu na wykazane w literaturze zróżnicowanie prędkości ruchu pieszych i grup pieszych oraz oddziaływanie pieszych w potoku uznano za ważne odwzorowanie rozkładu prawdopodobieństwa czasu przebycia dróg przejścia w węźle o parametrach odmiennych dla każdej drogi przejścia i okresu doby cechującego się określonym udziałem różnych grup pasażerów w rozważanym wspólnie potoku pasażerów zmieniających środek transportu. Przyjęto w pracy podział pasażerów na jednorodne grupy na podstawie płci, grupy wiekowej, terminowości podróży i stopnia znajomości węzła. Do opisu rozkładu prędkości ruchu poszczególnych jednorodnych grup pieszych przyjęto rozkład normalny, a do opisu struktury czasu przebycia dróg przejścia mieszaninę dwóch rozkładów normalnych.

2.2. Dobór narzędzi dla synchronizacji rozkładów jazdy

Synchronizacja rozkładów jazdy stanowi kluczowy element w organizacji transportu zbiorowego, mający na celu poprawę efektywności i komfortu podróży pasażerów. Wybór odpowiednich narzędzi do synchronizacji jest istotny nie tylko z perspektywy operatorów transportu, ale także w kontekście potrzeb pasażerów, którzy oczekują minimalizacji czasu oczekiwania i większej niezawodności połączeń. W tym podrozdziale przedstawiono metody przeszukiwania lokalnego oraz modelowanie symulacyjne, które stanowią fundamenty w doborze narzędzi umożliwiających optymalizację synchronizacji rozkładów jazdy.

Metody przeszukiwania lokalnego

Przeszukiwanie lokalne obejmuje zbiór metod należących do klasycznych technik rozwiązywania zadań optymalizacyjnych [178, 198]. Podstawową cechą wskazanej grupy metod jest definicja sposobu identyfikacji kolejnych badanych rozwiązań coraz lepiej spełniających funkcję kryterium i wybieranych z otoczenia bieżącego rozwiązania. Ogólny schemat postępowania realizowanego w ramach przeszukiwania lokalnego przedstawiono na rysunku 2.3.



Rys. 2.3. Ogólny schemat procedury przeszukiwania lokalnego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [152]

Procedurę rozpoczyna wybór pierwszego pełnego rozwiązania, czyli rozwiązania, które spełnia ograniczenia zadania i może być bezpośrednio zastosowane. Każde rozwiązanie oceniane jest z zastosowaniem funkcji kryterium. Wspólną cechą omawianej grupy metod jest definicja sąsiedztwa, określającego jak bardzo kolejne analizowane rozwiązania różnią się od bieżącego rozwiązania. Wraz ze wzrostem liczby rozwiązań uznawanych za sąsiednie wzrasta czas obliczeń ale maleje prawdopodobieństwo wystąpienia problemu optimum lokalnego. W zależności od metody przyjmuje się różny sposób identyfikacji sąsiedztwa w kolejnych krokach. Wskazuje się:

- dobór za każdym razem rozwiązań tak samo odległych od rozwiązania bieżącego,
- zmniejszanie odległości rozwiązań sąsiednich w trakcie realizacji algorytmu, rozpoczynając od przeszukiwania losowego a kończąc na rozwiązaniach najbliższych bieżącemu.

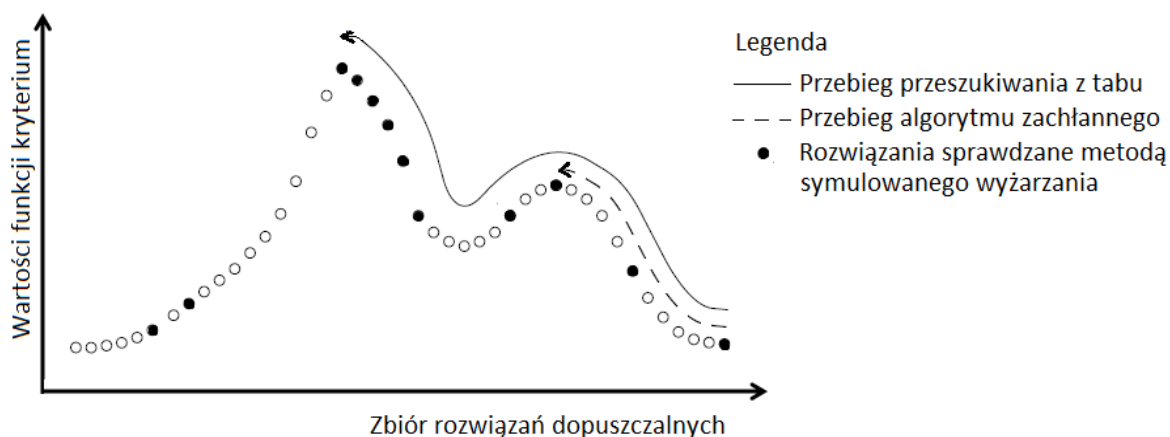
W poszczególnych metodach stosowane są różne warunki końca algorytmu, wśród których wskazuje się [178, 198]:

- zbadanie określonej liczby rozwiązań bieżących,
- realizację algorytmu przez ustalony czas,
- brak znalezienia rozwiązania lepszego o określoną wartość progową funkcji kryterium w ciągu realizacji ustalonej liczby kroków lub mimo upływu określonego czasu trwania badania.

Wśród metod przeszukiwania lokalnego wyróżnia się najczęściej [178, 198]:

- algorytmy zachłanne,
- symulowane wyżarzanie,
- przeszukiwanie z tabu.

Przykład przeszukiwania zbioru rozwiązań dopuszczalnych z zastosowaniem wskazanych metod przedstawiono na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Przykład analizy zbioru rozwiązań dopuszczalnych z zastosowaniem różnych metod przeszukiwania lokalnego
Źródło: opracowanie własne

W algorytmach zachłannych procedura z rysunku 2.4. działa, dopóki w sąsiedztwie rozwiązania bieżącego znajduje się rozwiązanie o lepszej wartości funkcji kryterium [142]. Stosuje się dwa podejścia: w pierwszym (ang. greedy) sąsiednie rozwiązania są badane pojedynczo, a poszukiwanie przerywa się po znalezieniu korzystniejszego rozwiązania, które staje się nowym rozwiązaniem bieżącym. W drugim podejściu (ang. steepest) przeszukiwane jest całe sąsiedztwo, a do następnej iteracji wybierane jest najkorzystniejsze rozwiązanie. W tych algorytmach nie są uwzględniane informacje z wcześniejszych iteracji. Uzupełnieniem wskazanego podejścia jest procedura wielokrotnych startów, polegająca na wielokrotnym uruchamianiu algorytmu z losowo wybranych punktów początkowych [147].

Symulowane wyżarzanie bazuje na algorytmie greedy z elementami losowości i zmiennym prawdopodobieństwem akceptacji rozwiązań. Decyzja o zastąpieniu rozwiązania bieżącego wynika z różnicy wartości funkcji kryterium — im lepsze rozwiązanie, tym większe prawdopodobieństwo jego przyjęcia [147, 152, 173]. Procedura zaczyna się od losowego przeszukiwania zbioru rozwiązań dopuszczalnych, a w kolejnych iteracjach zawężane jest sąsiedztwo, aż algorytm realizowany jest tak, jak algorytm zachłanny [147, 152, 173].

Podstawą postępowania w **przeszukiwaniu z tabu** jest algorytm zachłanny typu steepest, uzupełniony o procedurę przewyżczania problemu lokalnego optimum. Jest to metoda deterministyczna [75, 147]. W każdej iteracji wybierane jest najlepsze rozwiązanie dopuszczalne z otoczenia, bez względu na relację wartości funkcji kryterium względem rozwiązania bieżącego. Wartość funkcji kryterium dla rozwiązania ostatecznego zależy od przyjętego rozwiązania początkowego, które determinuje obszar analizowanego zbioru rozwiązań dopuszczalnych [123]. Procedura kończy się po wykonaniu przyjętej liczby iteracji [75, 147].

Cechą charakterystyczną, która dała nazwę metodzie przeszukiwania z tabu jest lista rozwiązań zabronionych. Postać listy jest zróżnicowana, zależy od rozpatrywanego problemu i przyjętego sposobu kodowania zmiennych. Rolą listy Tabu jest ograniczenie możliwości doboru rozwiązań sąsiednich utworzonych poprzez modyfikacje wartości dla wybranych

zmiennych. Lista Tabu, bazując na najlepiej rokujących rozwiązaniach, rozpoznanych we wcześniejszych iteracjach, wymusza przeszukiwanie obszarów zbioru rozwiązań dopuszczalnych, które nie były jeszcze sprawdzane [75]. Każda modyfikacja rozwiązania jest wpisywana na listę tabu, co zakazuje jej powtarzania przez ustaloną liczbę kolejnych iteracji. Wskazuje się, że czas przechowywania informacji o pojedynczej modyfikacji jest tym dłuższy im więcej zmiennych opisuje rozwiązanie, czyli im bardziej rozbudowane jest sąsiedztwo [76, 142].

Procedura przeszukiwania z tabu zależnie od potrzeb rozpatrywanego zagadnienia jest rozbudowywana o dodatkowe elementy [75]. Wyróżnia się pamięć uzupełnianą w trakcie realizacji algorytmu i charakteryzującą częstość dokonywania modyfikacji wartości dla poszczególnych zmiennych opisujących rozwiązanie. Identyfikowany jest wpływ zmian wartości dla poszczególnych zmiennych na wartości funkcji kryterium [75]. Uzyskiwane wyniki stanowią podstawę wyboru kolejnych rozwiązań sąsiednich, w sytuacjach gdy żadne nie poprawia rozwiązania. Natomiast stosowane dodatkowo kryterium aspiracji określa, że dopuszczalna jest modyfikacja rozwiązania poprzez zmianę wpisanej na liście tabu jeśli taka zmiana powoduje znaczną poprawę wartości funkcji kryterium [75, 147].

Wskazany zbiór metod stosowany jest wraz z dodatkowymi heurystykami, które służą dostosowaniu ogólnych narzędzi do specyfiki poszczególnych rozwiązywanych problemów [142, 147, 152]. Metody przeszukiwania lokalnego pozostają istotnym narzędziem badawczym, które jest stale rozwijane i integrowane z nowoczesnymi technikami optymalizacji. Wśród złożonych strategii optymalizacji wskazać można m.in. połączenie z algorytmami ewolucyjnymi np. [5, 9, 149, 218, 224, 259], czy metodami zmiennego sąsiedztwa np. [42, 109, 179, 253], opis w ujęciu stochastycznym [80, 83, 196, 200] i uwzględnienie zmiennych binarnych [32, 123, 177, 194]. Współczesne badania w obszarze transportu wskazują na szerokie zastosowanie metod przeszukiwania lokalnego. Ich elastyczność i skuteczność pozwalają na dostosowanie procedur do specyfiki problemów transportowych, co czyni je ważnym elementem współczesnych narzędzi optymalizacyjnych [36, 39, 192].

Ze względu wykazaną wielokrotnie w literaturze na złożoną zależność między rozkładem jazdy a czasem oczekiwania jako podstawę proponowanej metody, przy stochastycznym ujęciu zagadnienia zmiany środka transportu przyjęto przeszukiwanie lokalne, o stałym sąsiedztwie obejmujące wyłącznie rozwiązania najbliższe bieżącemu, przy przeszukiwaniu całego sąsiedztwa i które w problemie synchronizacji mogą istotnie różnić się wartościami czasu oczekiwania. Specyfika problemu i przyjęte podejście spowodowało dalej, że jako sposób ucieczki z lokalnego optimum i przeszukiwania nowych obszarów zbioru rozwiązań dopuszczalnych zastosowano procedurę wielokrotnych startów i zastosowanie przeszukiwania z tabu, zwłaszcza przyjęcia zasad zarządzania listą kroków tabu. Dobór pierwszego rozwiązania ze względu na znaczenie tego elementu w dalszym przeszukiwaniu w przyjętej metodzie realizowany jest w dedykowanym etapie poprzedzającym przeszukiwanie z tabu.

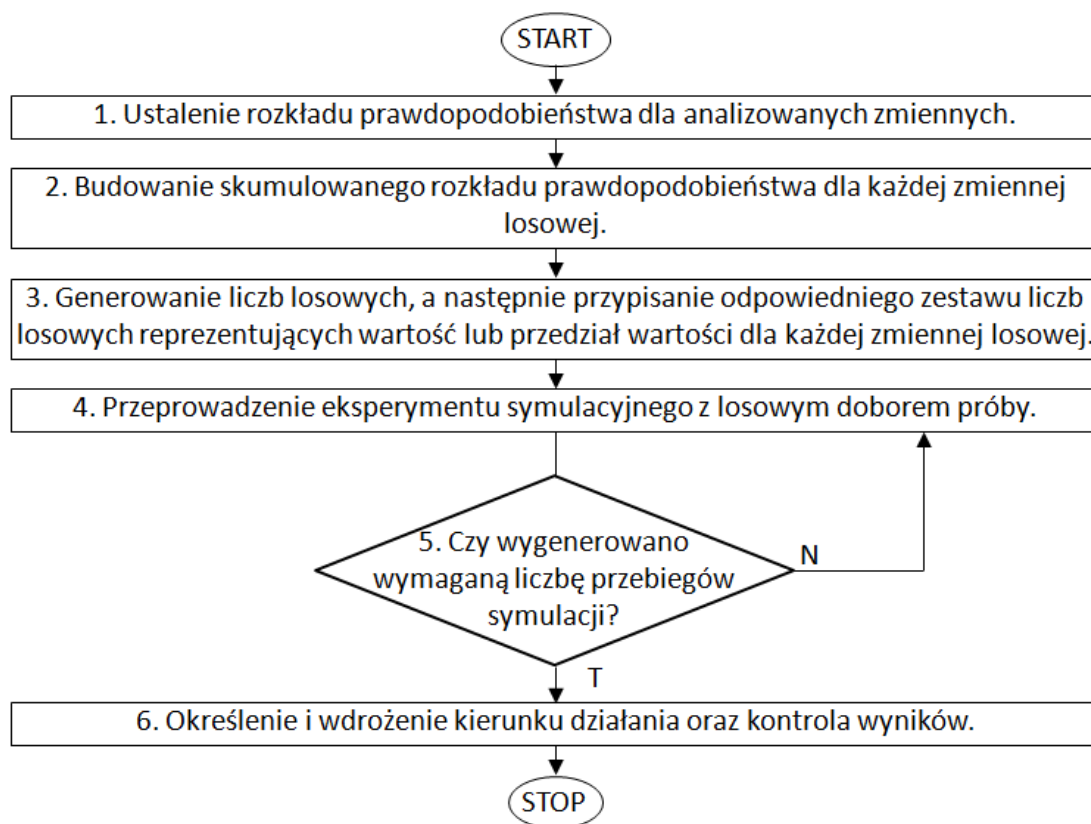
Modelowanie symulacyjne

Sprawne funkcjonowanie systemów transportowych wymaga podejmowania optymalnych decyzji dotyczących kształtowania infrastruktury oraz organizacji przewozów [95, 150, 188,

190, 221]. Ze względu na złożoność systemów transportowych, wynikającą z licznych powiązań między elementami oraz stochastycznego charakteru ruchu, współczesne badania opierają się na zaawansowanych metodach modelowania symulacyjnego [36, 57, 97, 163, 175, 212].

Modelowanie symulacyjne pozwala odwzorować złożone interakcje w systemach transportowych oraz badać wpływ czynników zewnętrznych na ich funkcjonowanie. Jest ono wykorzystywane jako narzędzie wspierające procesy decyzyjne, umożliwiając ocenę organizacji systemów oraz przewidywanie skutków wprowadzanych zmian, stanowiąc narzędzie kształtowania nie tylko bieżącej organizacji systemu ale i przyszłej polityki transportowej [22, 27, 212]. Modele symulacyjne odwzorowują zależności w systemach złożonych, opisujących zjawiska masowe, procesy dynamiczne i umożliwiają badanie wpływu czynników na zmiany charakterystyk analizowanych procesów, a wyniki charakteryzowane są z zastosowaniem narzędzi statystycznych [34, 126, 138, 230, 234].

Jednym z podejść w modelowaniu symulacyjnym jest technika Monte Carlo, która znajduje szerokie zastosowanie w badaniach transportowych. Metoda ta, dla stałych parametrów modelu, polega na wielokrotnym przeprowadzaniu symulacji, w której istotną rolę odgrywa losowanie wartości wybranych zmiennych wejściowych zgodnie z rozkładem prawdopodobieństwa, co pozwala uzyskać wyniki zbliżone do rzeczywistości, charakteryzując funkcjonowanie systemu [94, 97, 145, 175, 234]. Podejście symulacyjne Monte Carlo składa się z sześciu kroków przedstawionych na rysunku 2.5. [178].



Rys. 2.5. Algorytm przeprowadzania powtarzalnych eksperymentów z zastosowaniem techniki symulacji Monte Carlo

Źródło: opracowanie własne na podstawie [178, 198]

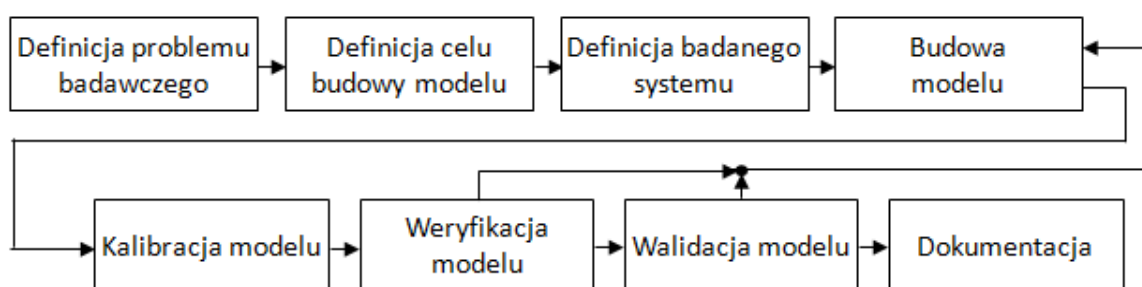
Symulacja Monte Carlo wymaga wygenerowania sekwencji liczb losowych, gdzie (i) wszystkie liczby są jednakowo prawdopodobne oraz (ii) w sekwencji liczb nie pojawiają się żadne wzorce. Ta sekwencja liczb losowych pomaga w wyborze losowych obserwacji (próbek) z rozkładu prawdopodobieństwa [198].

W symulacji Monte Carlo proces stochastyczny traktowany jest jako deterministyczny badany wielokrotnie [48, 66, 125]. Pozwala to odwzorować proces w taki sposób jakby dane zostały zgromadzone na drodze obserwacji prowadzonej przez czas odpowiadający czasowi odwzorowanemu w symulacji [48, 66, 125]. Podstawą modelu jest losowanie wartości charakterystyk opisujących wzajemnie oddziałujących na siebie agentów, z których każdy funkcjonuje w sposób niezależny, pozwalając odwzorować złożoności rzeczywistego systemu [102, 121, 131, 163, 164].

Modelowanie symulacyjne znalazło szerokie zastosowanie w analizie systemów transportowych, od planowania ruchu drogowego po organizację transportu publicznego. Główną zaletą symulacji jest możliwość odwzorowania złożoności zachowań uczestników ruchu oraz badania wpływu decyzji organizacyjnych na funkcjonowanie systemu [102, 121, 131, 163, 164].

Symulacja nie zastępuje metod optymalizacyjnych, lecz stanowi ich uzupełnienie. W praktyce zaleca się łączenie modelowania analitycznego z symulacyjnym. Metody analityczne i heurystyki pozwalają wyznaczyć kolejne rozwiązania, które są dalej oceniane poprzez symulację, odwzorowującą rzeczywiste funkcjonowanie systemu transportowego [48, 66, 84, 178, 198].

Każdy model symulacyjny musi zawierać określone elementy i być skonstruowany we właściwy sposób. Spełnienie tego warunku jest osiągane jeśli podstępowanie obejmować będzie rzetelną realizację każdego z etapów budowy modelu symulacyjnego przedstawionego na rysunku 2.6.



Rys. 2.6. Etapy budowy modelu symulacyjnego
Źródło: opracowanie własne na podstawie [92, 125, 188, 190, 198]

Badania symulacyjne rozpoczynają się od zdefiniowania problemu i wprowadzenia zmiennych. Następnie budowany jest model, określone kierunki działań, a wyniki symulacji poddawane są analizie. W razie niezadowolających wyników model, założenia, algorytmy lub procedury są modyfikowane [66, 125, 198]. Proces kończy się sformułowaniem wniosków i wskazaniem kierunków dalszych badań [178].

Modelowanie symulacyjne jest procesem iteracyjnym, wymagającym ciągłej weryfikacji na każdym etapie [198]. Nawet po pozytywnej weryfikacji modelu wyniki mogą odbiegać od danych empirycznych, co wymaga ponownej kalibracji, sprawdzenia poprawności logiki modelu lub adekwatności danych wejściowych [66, 125, 198]. Etap projektowania logiki modelu jest kluczowy i najbardziej twórczy, gdyż odwzorowuje wszystkie istotne interakcje w systemie [66, 125, 198]. Modele odgrywają kluczową rolę w badaniach systemów transportowych, wspierając poszukiwanie optymalnych rozwiązań zgodnych z zasadami zrównoważonego i dostępnego transportu publicznego [1, 97, 113]. Aktualnie podejmowane kierunki badawcze wskazywane w literaturze podkreślają rosnące znaczenie modelowania symulacyjnego w procesie planowania transportu zbiorowego [84, 121].

W modelowaniu systemu transportowego odwzorowuje się zgłaszane zapotrzebowanie na realizację przewozów, wahania czasowo przestrzenne wielkości potoków, zachowania komunikacyjne oraz sieć transportową [48, 121]. W pracy [57, 180] podstawę stanowił model bazujący na podróżach, charakteryzowany przez ciągłą przestrzeń i dyskretny czas. Analiza ruchu samochodów osobowych koncentrowała się na zachowaniach kierowców, zużyciu paliwa i emisji, przy uwzględnieniu zmiennych warunków ruchu w porannym szczycie komunikacyjnym [57, 180].

Potoki pasażerskie zależą od struktury sieci transportowej i wymagają iteracyjnej analizy w celu odwzorowania interakcji [14]. Wiele badań zakłada stałe lokalizacje przystanków i niezmienną wielkość potoków pasażerskich, skupiając się na analizie wyboru środka transportu [163]. Współczesne modele uwzględniają wpływ zatłoczenia w ruchu drogowym na czas podróży autobusem, odwzorowując sieć i rozkłady jazdy, a także dezagregując zapotrzebowanie na przewozy w wymiarze czasowym i przestrzennym [163].

Symulacja Monte Carlo stosowana jest m.in. do modelowania ruchu pieszego, którego podstawą jest teoria przepływu pieszych. Modelowanie symulacyjne ruchu pieszych w skali mikro stanowi współcześnie główne narzędzie badania zależności i zjawisk przepływu pieszych w różnych sytuacjach. Będąc rezultatem badań naukowych w obszarze przepływów pieszych teoria przepływów pieszych i dynamika pieszych stanowi podstawową teorię stosowaną w projektowaniu przestrzeni i infrastruktury dla pieszych, planowania przestrzennego jak i organizacji, zarządzania i kontrolowania przepływu pieszych [121, 254].

Współczesne badania potwierdzają rosnące znaczenie uwzględniania zróżnicowanej struktury populacji pieszych w analizach i modelowaniu ich ruchu. W pracy [141] wykazano, że segmentacja pieszych według motywacji podróży, wieku i dominującego środka transportu – oparty na kompleksowych badaniach ruchu – pozwala uzyskać znacznie dokładniejszy obraz zachowań pieszych w przestrzeni miejskiej niż klasyczna analiza infrastruktury. Podobne wnioski płyną z badań [47, 254], w których podkreślono wpływ przekroju poprzecznego ciągów komunikacyjnych na płynność ruchu, szczególnie w kontekście zatorów w najważniejszych miejscach. Z kolei w pracy [265] dowiedziono, że modelowanie z udziałem wielu grup pasażerów o różnych parametrach pozwala uchwycić oddziaływania między grupami, skutkujące wydłużeniem czasu przejścia przez peron, zwłaszcza w warunkach ograniczonej przepustowości. Wyniki badań [197] dodatkowo pokazują,

że średnia prędkość ruchu grupy zróżnicowanej jest o 12% niższa niż jednorodnej, a bariery infrastrukturalne, takie jak przewężenia czy schody, powodują lokalne spadki prędkości sięgające nawet 42%. Potwierdza to zasadność kompleksowego podejścia w analizach ruchu pieszego, uwzględniającego wewnętrzne zróżnicowanie populacji.

Ze względu na złożoność zjawisk zachodzących w systemie transportowym, zwłaszcza w aspekcie procesów ruchu w literaturze podkreśla się na rosnące znaczenie modelowania symulacyjnego w badaniach dotyczących transportu ze względu na istotne zalety modelowania symulacyjnego i przewagę względem innych metod optymalizacji w zakresie odwzorowania złożoności rzeczywistych systemów. W związku z tym, że modelowanie symulacyjne, w szczególności w wariancie Monte Carlo, pozwala na analizę procesów w sposób zbliżony do rzeczywistych obserwacji, uwzględniając stochastyczny charakter zdarzeń i nieliniowość zależności, w pracy modelowanie symulacyjne zastosowano do wyznaczania wartości funkcji kryterium w synchronizacji, co umożliwiło ujęcie wpływu zmiennych warunków eksploatacyjnych i zróżnicowanych zachowań uczestników ruchu. Zastosowanie podejścia symulacyjnego wpisuje się w aktualne kierunki rozwoju badań transportowych i potwierdza jego przydatność do rozwiązywania złożonych problemów organizacji i optymalizacji transportu zbiorowego. Ponadto na podstawie przeglądu aktualnych kierunków badań w proponowanej metodzie połączono modelowanie analityczne z symulacyjnym, oraz zastosowano modelowanie symulacyjne do określenia rozkładu czasu przebycia dróg przejścia.

2.3. Przegląd metod synchronizacji rozkładów jazdy

W niniejszym podrozdziale przedstawiono przegląd metod synchronizacji rozkładów jazdy stosowanych w planowaniu transportu zbiorowego. Wyniki przeglądu literatury zostały uporządkowane w trzech komplementarnych obszarach. W pierwszej kolejności scharakteryzowano ogólne podejścia do synchronizacji w transporcie pasażerskim, z uwzględnieniem uwarunkowań ich stosowania. Następnie zaprezentowano metody synchronizacji rozkładów jazdy, uwzględniające różne strategie dostosowania obsługi połączeń do charakterystyki popytu z uwzględnieniem struktury sieci. Ostatnia część dotyczy algorytmów oraz procedur wykorzystywanych do synchronizacji, obejmujących zarówno klasyczne techniki planistyczne, jak i rozwiązania oparte na optymalizacji matematycznej. Tak ujęty przegląd stanowi podstawę dalszych analiz nad autorską koncepcją synchronizacji uwzględniającej odchyłki od rozkładu jazdy.

Problematyka synchronizacji w transporcie pasażerskim

Rozkład jazdy linii komunikacyjnych budowany jest najczęściej w sposób, zapewniający minimalizację czasu oczekiwania pasażerów [77, 93, 144, 174, 216], w tym m.in. przez synchronizację kursów węzłową lub interwałową [105, 154, 216]. Dobór planowanych momentów realizacji kursów, uwzględniający zmienność zapotrzebowania na przewozy w różnych relacjach i okresach, stanowi kluczowy, ale trudny element planowania transportu zbiorowego [77, 144, 153, 162, 229].

Celem synchronizacji interwałowej jest dążenie do minimalizacji zróżnicowania odstępów między realizacją kursów dla linii komunikacyjnych obsługujących wspólny fragment trasy [105]. Proces ten skraca (szczególnie przy zapewnieniu identycznych odstępów pomiędzy kursów) średni czas oczekiwania pasażerów na przystankach, zwłaszcza rozpoczynających podróże, [204]. Jednym z podejść jest przypisywanie dla poszczególnych linii komunikacyjnych wielokrotności ustalonego taktu, co ułatwia zapewnienie regularności realizacji kursów [104].

Synchronizacja węzłowa obejmuje modyfikacje planowanych momentów realizacji kursów, zapewniając krótki czas oczekiwania podczas zmiany środka transportu między liniami komunikacyjnymi [7, 12, 38, 87, 235]. Celem projektowania procesu zmiany środka transportu jest zwiększenie dostępności czasowej i niezawodności połączeń podczas zmiany środka transportu [7, 38, 68, 99, 235].

Zakres przestrzenny synchronizacji rozkładu jazdy w sieci transportu zbiorowego jest określany jeszcze przed rozpoczęciem fizycznego procesu planistycznego i obejmuje wybór linii, odcinków, punktów oraz okresów doby [7, 12, 87, 144, 235]. Kluczowe jest dostosowanie synchronizacji do celu, jaki ma zostać osiągnięty. Szczególne znaczenie ma synchronizacja w węzłach o niskiej częstotliwości realizacji kursów, gdzie długie odstępy między odjazdami wydłużają czas oczekiwania na przesiadkę [104, 124, 127]. W lokalnych węzłach przesiadkowych synchronizuje się zwykle wszystkie linie, natomiast w węzłach regionalnych, obsługiwanych przez znaczną liczbę linii obejmuje tylko wybrane relacje lub okresy [127].

Synchronizacja rozkładów jazdy zorientowana na minimalizację planowanego czasu przesiadania się w węźle skutkuje niewielką odpornością na wystąpienie zakłóceń zwiększając długość i dyspersję czas oczekiwania [19, 135, 155, 213, 250, 251]. Synchronizacja rozkładów jazdy w pojedynczym węźle przesiadkowym umożliwia łatwiejsze wprowadzanie zmian i zapewnia większą elastyczność oraz odporność systemu niż synchronizacja całej sieci transportowej ze względu na mniejszą liczbę powiązań. Pozwala to zapewnić większą elastyczność i odporność systemu transportu zbiorowego [43, 127, 158, 220, 244].

Synchronizacja jest osiągana poprzez zastosowanie różnych środków planistycznych stosowanych na poziomie taktycznym, takich jak [38]:

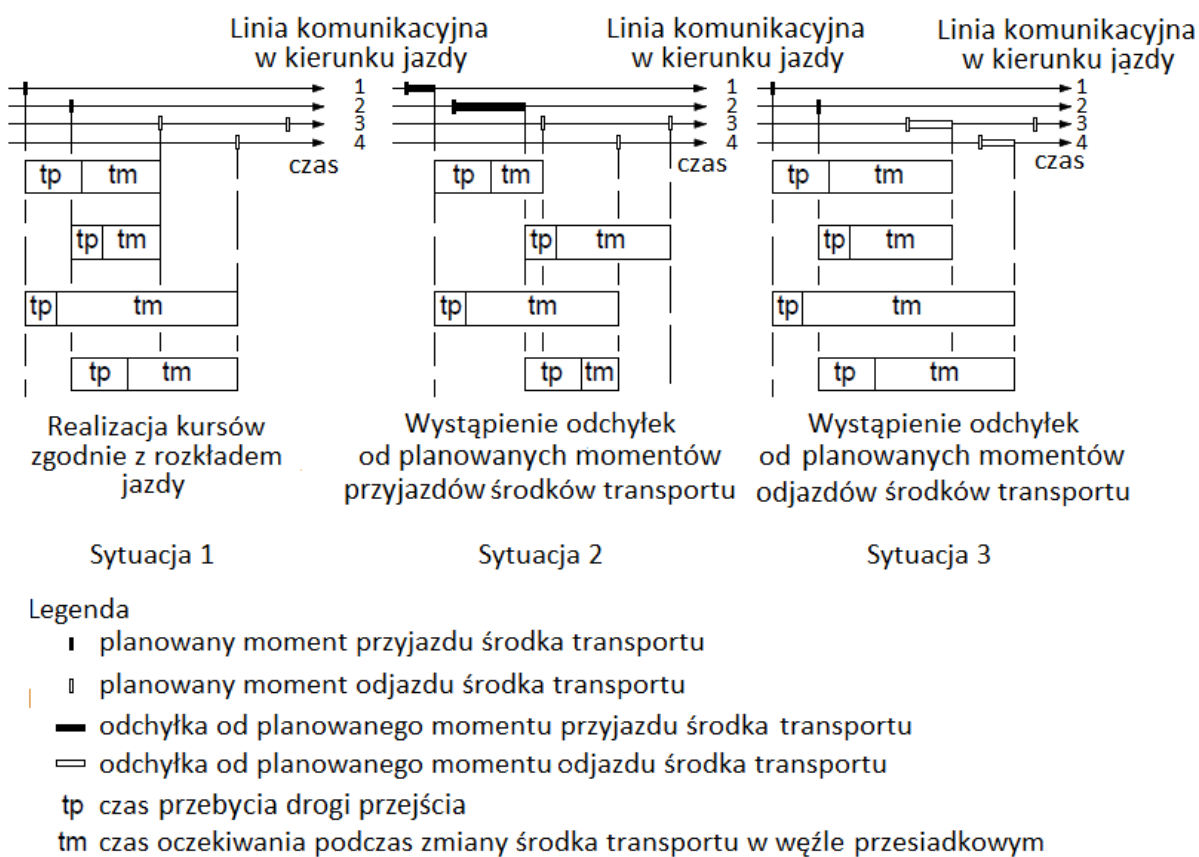
- zmiana planowanych momentów rozpoczęcia realizacji kursów [2, 128, 156, 252, 263],
- zmiana częstotliwości realizacji kursów lub odstępów pomiędzy odjazdami kolejnych pojazdów [156, 201, 239],
- dostosowanie planowanych czasów przejazdu odcinków międzyprzystankowych i czasów buforowych [38, 51, 128, 144].

Synchronizacja rozkładów jazdy to złożony problem optymalizacji wielokryterialnej, wymagający systemowego podejścia. Nawet w deterministycznym ujęciu rozpatrywanych czynników, obejmując wiele zmiennych decyzyjnych i ograniczeń jest to zagadnienie NP-trudne [77, 92, 150, 176, 192]. W praktyce dodatkową trudność stanowią stochastyczne

czynniki, takie jak zmienny czas jazdy i postoju, które komplikują planowanie przewozów i zmniejszają zgodność między planowaniem a realizacją przewozów [20, 38, 77, 144].

Optymalizacja czasu oczekiwania pasażerów podczas zmiany środka transportu wymaga globalnego podejścia, uwzględniającego wpływ zmian rozkładu na funkcjonowanie całego systemu transportu zbiorowego [20, 77, 93, 257]. Nierówne odstępy między odjazdami kolejnych środków transportu mogą wydłużać czas oczekiwania pasażerów na innych stanowiskach przystankowych wzdłuż trasy linii [89, 151, 208, 257, 258]. Zmiana czasu postoju na stanowiskach przystankowych wpływa na czas jazdy pasażerów [144].

W ujęciu teoretycznym etapy procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym rozpatrywane w aspekcie synchronizacji rozkładów jazdy, dla wybranych, przykładowych sytuacji zostały przedstawione na rysunku 2.7. prezentującym skutki wystąpienia odchyłek od rozkładu jazdy na czas oczekiwania w węźle przesiadkowym.



Rys. 2.7. Przykłady realizacji procesu zmiany środka transportu z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy

Źródło: opracowanie własne na podstawie [127]

Na rysunku 2.7. przedstawiono proces zmiany środka transportu pomiędzy wybranymi kursami dla czterech linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy obsługujących węzeł przesiadkowy [127]. W przykładzie pasażerowie wysiadają z dwóch środków transportu (linie komunikacyjne w kierunkach jazdy nr 1 i 2), przemieszczają się wybraną z dwóch dróg przejścia w węźle i wsiadają do środków transportu w kursach linii komunikacyjnych

w kierunkach jazdy nr 3 i 4. Czas oczekiwania zależy zarówno od rozkładu jazdy, jak i ewentualnych opóźnień. Niewielkie opóźnienia mogą być kompensowane, przez dobór rozkładowego odstępu czasu między przyjazdem i odjazdem pojazdów, skracając tym samym jedynie czas oczekiwania pasażerów. W przypadku większych odchyłek pasażerowie muszą czekać na kolejny kurs, co wydłuża czas podróży [10, 124, 135, 207, 216]. W literaturze w tym zakresie realizowano jedynie buforowanie czasu zatrzymania lub przyjmowano w funkcji kryterium stopień zgodności dobranych w rozkładzie jazdy odstępów czasu między przyjazdem i odjazdem pojazdów, do założonego odstępu czasu, optymalnego ze względu na wielkość odchyłek, podczas gdy w niniejszej pracy w problemie synchronizacji rozkładów jazdy bezpośrednio w funkcji kryterium oceniającej modyfikowane rozkłady jazdy przyjęto czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu [237, 238, 239].

W literaturze [38, 127, 216] wskazuje się 5 kluczowych zmiennych wpływających na czas przesiadania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym. Zostały one scharakteryzowane w tabeli 2.2.

Tabela 2.2 Zestawienie determinant zmiennych wpływających na czas przesiadania i skutków ich oddziaływania w węzłach przesiadkowych

L.p.	Zmienna	Determinanty	Skutki
1.	Rozkład jazdy linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy	Układ sieci transportu zbiorowego Reguły i ograniczenia konstrukcji rozkładu jazdy Wielkość oraz czasowo przestrzenne wahania zgłaszanego zapotrzebowania na realizację przewozów	Większy interwał zwiększa uciążliwość zawodności przesiadania się. Dłuższy czas postoju zmniejsza uciążliwość zawodności przesiadania się przy wydłużeniu czasu podróży pasażerów oczekujących zatrzymanym środkiem transportu.
2.	Odchyłki od rozkładu jazdy	Zakłócenia i natężenie ruchu w sieci transportowej Planowany czas postoju w węźle przesiadkowym Odległość węzła przesiadkowego od początku tras linii obsługujących węzeł	Mniejsza dyspersja zmniejsza dyspersję czasu oczekiwania i zwiększa niezawodność realizacji przesiadki
3.	Czas przebycia dróg przejścia w węźle przesiadkowym	Geometria, wyposażenie i czytelność węzła przesiadkowego Zachowania i liczba podróżnych	Mniejsza wartość skutkuje krótszym czasem przesiadania
4.	Planowany czas przesiadania	Reguły kształtowania połączeń przesiadkowych	Większa wartość wydłuża czas przesiadania ale zmniejsza zawodność połączenia
5.	Liczba pasażerów przyjeżdżających do węzła przesiadkowego w poszczególnych kursach realizujących podróż w poszczególnych relacjach	Liczba i zróżnicowanie czasowo przestrzenne zgłaszanego zapotrzebowania na realizację przewozów Jakość usług przewozowych w węźle przesiadkowym	Większa wartość determinuje wagę kształtowania niezawodności połączeń i kształtowania czasu oczekiwania.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [38, 127, 192, 216]

Odstęp czasu między momentami odjazdów kolejnych pojazdów dla linii komunikacyjnych zapewniających połączenia w poszczególnych relacjach podróży determinuje czas oczekiwania podczas zmiany środka transportu. W przypadku wystąpienia

opóźnień skutkujących niezrealizowaniem założonej przesiadki mniejsza częstotliwość wpływa na wydłużenie czasu oczekiwania na kontynuowanie podróży [38, 127, 216].

Planowany czas przesiadania określa pożądany odstęp czasu między planowanym momentem przyjazdu i odjazdu środków transportu podczas synchronizacji rozkładów jazdy [38, 127, 216]. Dłuższy postój środków transportu w węźle przesiadkowym kompensuje opóźnienia, zwiększając niezawodność i komfort przesiadki, ale wydłuża czas podróży pasażerów pozostających w pojeździe [38, 127, 216, 238]. Udział pasażerów zmieniających środek transportu oraz punktualność realizacji kursów wpływa na całkowity czas podróży w systemie transportu zbiorowego [38, 127, 216].

W związku z aktualnym podejściem proponowanym w literaturze przyjęto w metodzie, że dobór planowanych momentów realizacji kursów będzie uwzględniał zmienność zapotrzebowania na przewozy w różnych relacjach i okresach doby. Ponadto proponowaną metodę przeznaczono dla węzłów lokalnych lub wybranych linii w węzłach regionalnych, a dla zapewnienia elastyczności oraz odporność systemu do pojedynczych węzłów przesiadkowych. Zakres przestrzenny synchronizacji rozkładu jazdy w sieci transportu zbiorowego z uwzględnieniem taktu będzie określany jeszcze przed rozpoczęciem optymalizacji. Natomiast synchronizacja realizowana będzie poprzez modyfikacje planowanych momentów rozpoczęcia realizacji kursów.

Opis metod synchronizacji rozkładów jazdy

Uwzględnienie odchylek od rozkładu jazdy na etapie planowania rozkładu jazdy zwiększa niezawodność podróży, ułatwia pasażerom planowanie i realizację podróży. Jednocześnie rozkład jazdy odporny na zakłócenia zmniejsza częstotliwość i zakres zmian, interwencji realizowanych na poziomie operacyjnym, obejmującym dynamiczne zarządzanie ruchem środków transportu w czasie realizacji kursów [238].

W [182] sformułowano problem synchronizacji rozkładu jazdy pociągów rozpatrywany z perspektywy pasażera, z uwzględnieniem zmian wielkości zgłaszanego zapotrzebowania na realizację podróży, przy cyklicznym rozkładzie jazdy pociągów. Celem było maksymalizowanie prawdopodobieństwa wejścia pasażera do pociągu. Analiza dla Kolei Izraelskich wykazała 15% poprawę wartości funkcji kryterium przy uwzględnieniu zachowań pasażerów.

W pracy [232] zintegrowano synchronizację rozkładu jazdy pociągów i planowania realizacji brygad dla linii w kolejowym podsystemie transportu zbiorowego w mieście. Podczas doboru rozkładu jazdy nie brano pod uwagę w sposób bezpośredni zróżnicowania czasowo przestrzennego wielkości potoków pasażerów podczas synchronizacji rozkładów jazdy. Przyjęte podejście oparte jest na wzorcach realizacji przewozów poprzez dobór odstępów między odjazdami pociągów w godzinach szczytu i poza szczytem komunikacyjnym. Wartości stałego interwału wyznaczano na podstawie analizy potoków pasażerów i planowania przewozów.

Dwukryterialna optymalizacja obejmująca: synchronizację rozkładów jazdy i konstrukcję zadań transportowych w warunkach wahań czasowo przestrzennych wielkości potoków pasażerów zwiększa złożoność modelowania w porównaniu z prowadzeniem odrębnych analiz w obu wskazanych obszarach. Zwykle w opracowaniach oba problemy rozpatrywane są oddzielnie. Wtedy w zakresie synchronizacji rozkładów jazdy pomijane lub rozpatrywane w sposób uproszczony są ograniczenia wynikające z konstrukcji zadań transportowych [228]. Natomiast w zakresie budowy zadań transportowych interwały międzykursowe dla linii komunikacyjnych stanowią daną wejściową. Optymalizacja dwóch wskazanych kryteriów wykonywana jest zwykle sekwencyjnie lub iteracyjnie [232]. Jedynie w nielicznych artykułach omawiane są wyniki synchronizacji rozkładów jazdy ocenianych równocześnie według dwóch wskazanych kryteriów [228].

W pracy [228] zrealizowano jednocześnie budowę acyklicznego rozkładu jazdy pociągów, podczas której uwzględniono wymagania formułowane zarówno względem obsługi zgłaszanego zapotrzebowania na realizację przewozów, a także konstrukcji zadań transportowych. Celem jest minimalizacja zróżnicowania napełnienia pojazdów i zróżnicowania odstępów czasu między realizacją kolejnych kursów w celu zapewnienia lepszej obsługi pasażerów oraz zminimalizowanie liczby manewrów i kursów technicznych w celu zmniejszenia złożoności operacyjnej i kosztów realizacji przewozów.

W [127] dokonano oceny wpływu odchyłek od rozkładu jazdy na niezawodność realizacji zmiany środka transportu w zależności od doboru planowanego czasu przesiadania. Badania przeprowadzone w jednym węźle przesiadkowym, obejmowały synchronizację rozkładów jazdy jednej linii autobusowej względem ustalonego rozkładu jazdy jednej relacji w transporcie kolejowym wykonane metodą przeglądu zupełnego. Wykazano, że dla rozpatrywanego problemu praktycznego trudno znaleźć rozkład jazdy jednocześnie maksymalizujący niezawodność przesiadek we wszystkich relacjach podróży. Zwiększenie planowanego czasu przesiadania skraca dodatkowy czas oczekiwania, zwiększa niezawodność połączenia kosztem wydłużenia planowanego czasu oczekiwania. Wskazano, że istnieje kompromis między planowanym i dodatkowym czasem oczekiwania zależy od lokalnych charakterystyk węzła przesiadkowego i przesiadki obejmujących m.in. interwał dla linii komunikacyjnej, rozkład odchyłek od rozkładu jazdy, czas przebycia dróg przejścia i liczba pasażerów. W praktyce wybór rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym dokonywany jest zwykle na podstawie oceny wielokryterialnej, przy czym pojedyncze kryterium stanowi synchronizacja rozkładu jazdy dla pojedynczej relacji podróży.

Mimo, że problem synchronizacji rozkładów jazdy podejmowany jest od dekad, dopiero w ostatnich latach w związku z dostępnością danych i efektywnych narzędzi uwzględniane jest w analizach zróżnicowanie w ciągu doby charakterystyk związanych z czasem przejazdu [128]. Pomijanie tej zmienności prowadzi do długiego oczekiwania i niezadowolenia pasażerów. Wyniki pokazują, że zastosowanie zróżnicowanego w dobie czasu przejazdu odcinków międzyprzystankowych może znacząco zredukować wybrane składowe czasu podróży średnio o 78% w przypadku czasu oczekiwania na początku podróży i w węzłach przesiadkowych, co poprawia ogólną satysfakcję pasażerów [128, 238]. Jednak w pracy [128]

zastosowano podejście deterministyczne, które poprawia synchronizację do planowanego ruchu pojazdów ale nie uwzględniania wpływu czynników o charakterze stochastycznym.

Synchronizację rozkładu jazdy w jednym węźle przesiadkowym z uwzględnieniem odchyłek planowanych momentów przyjazdów i dyspersji czasów przebycia dróg przejścia przeprowadzono w pracy [244]. Celem było zminimalizowanie całkowitego kosztu zmiany środka transportu, osiągnięta poprzez zmiany planowanych momentów realizacji kursów i czasów postojów środków transportu w węźle przesiadkowym. Koszt operatora wynika z dodatkowego czasu trwania realizacji kursów. Pasażerowie ponoszą koszty związane z:

- czasem przebycia drogi przejścia,
- dodatkowym czasem oczekiwania związanym z odchyłką od planowanego momentu przyjazdu i odjazdu,
- czasem oczekiwania na kolejny środek transportu,
- czasem oczekiwania pasażerów w pojeździe zatrzymanym w węźle przesiadkowym w związku z procesem zmiany środka transportu.

W badaniu [244] wykazano, że uwzględnienie czynników o charakterze stochastycznym w analizie czasu przesiadania – zarówno odchyłek od rozkładu jazdy, jak i dyspersji czasu przejścia – pozwoliło na zmniejszenie całkowitego kosztu procesu zmiany środka transportu o 27% względem stanu istniejącego. Zastosowana analiza wrażliwości wykazała, że stosowanie wydłużonego, rozkładowego czasu postoju w węźle przesiadkowym jest uzasadnione wyłącznie wtedy, gdy udział pasażerów przesiadających się wynosi co najmniej 50% względem ogółu pasażerów w pojeździe. W artykule nie przedstawiono analizy porównawczej wartości funkcji kryterium między rozkładem jazdy zsynchronizowanym z uwzględnieniem tylko dyspersji czasu przebycia dróg przejścia a rozkładem jazdy zsynchronizowanym z uwzględnieniem obu czynników o charakterze stochastycznym.

Proces zmiany środka transportu z autobusu na pociąg jest rozpatrywany w artykule [51]. Celem synchronizacji w warunkach występowania odchyłek od rozkładu jazdy był wybór najkorzystniejszych planowanych momentów przyjazdów autobusów w poszczególnych kursach do węzłów przesiadkowych. W porównaniu z obowiązującym rozkładem jazdy skrócono czas oczekiwania o 72,8% a dzięki kompensacji opóźnień przyjazdów poprzez planowany czas postoju zmniejszono dyspersję czasu podróży o 7,2%. Jednak w modelu czas wyrażony był w minutach. W wyniku zastosowania modelu symulacyjnego w szczycie porannym dla jednego węzła przesiadkowego skrócono czas oczekiwania o 1,4% [158]. Natomiast w rezultacie synchronizacji rozkładu jazdy w transporcie autobusowym w aglomeracji Kopenhagi przeprowadzenia przez autora [100] poprzez modyfikacje momentów realizacji kursów rozpatrywanej w ujęciu deterministycznym skrócono czas oczekiwania pasażerów podczas zmiany środka transportu o 5,08%.

Synchronizacja bez uwzględnienia dyspersji czasu przejazdu i postoju zapewnia dopasowanie rozkład jazdy do wartości średnich, pomijając występowanie zróżnicowanego funkcjonowania systemu transportowego, co pogarsza postrzegana jakość przesiadek [72]. Zapewniona obsługa pasażerów odpowiada planowanym momentom realizacji kursów,

pomijając potrzebę zapewnienia synchronizacji w warunkach oddziaływania czynników o charakterze stochastycznym i ich konsekwencjach [72]. W artykule [72] zróżnicowanie czasu przejazdu odwzorowywane jest poprzez przyjmowanie różnych percentyli zależnie od momentu realizacji kursu, pomijając rozpatrywanie rozkładów prawdopodobieństwa. W zadaniu minimalizowano wartość maksymalnego odstępu między realizacją kolejnych kursów dla najgorszego przypadku czyli największego wydłużenia czasu przejazdu trasy. Proponowaną procedurę zastosowano w Hadze dla 8 linii autobusowych. Wyniki wpływu uwzględnienia zmienności czasów przejazdów i postoju pojazdów w poszczególnych kursach na czas oczekiwania podczas przesiadania się przedstawiono w tabeli 2.3.

Tabela 2.3 Wyniki zmian czasu oczekiwania na skutek uwzględniania różnych czynników stochastycznych podczas synchronizacji rozkładów jazdy

L.p.	Uwzględniany w synchronizacji zakres percentyli	Zmiana średniego czasu oczekiwania [%]	
		Najgorszy przypadek	Średnie wartości charakterystyk
1.	45 ÷ 55	5,7	-1,3
2.	40 ÷ 60	10,3	-3,8
3.	30 ÷ 70	18,2	-11,9

Źródło: opracowanie własne na podstawie [72]

Bez względu na przyjęty zakres wartości opisujących rozpatrywane czynniki o charakterze stochastycznym skrócono czas oczekiwania dla najgorszego przypadku i wydłużono czas oczekiwania dla wartości średnich charakterystyk [72]. Wyniki potwierdziły, że najkorzystniejsze jest działanie kompromisowe między wartościami średnimi i granicznymi dyspersji uwzględniające typowe zróżnicowanie czasu przejazdu i postoju środków transportu. Największe korzyści uzyskano w wyniku synchronizacji zrealizowanej z uwzględnieniem mniejszej dyspersji opisującej czynniki o charakterze stochastycznym [72]. Porównawcza ocena rozkładów jazdy wykazuje, że na etapie projektowania korzystniejszy wydaje się rozkład zsynchronizowany bez uwzględnienia czynników stochastycznych. Jednak modelowanie symulacyjne, odwzorowujące rzeczywiste warunki funkcjonowania, potwierdza przewagę synchronizacji uwzględniającej czynniki stochastyczne [238].

W pracy [223] opracowano model symulacyjny negocjacji między dwoma operatorami transportu kolejowego budującymi dla siebie rozkłady jazdy w węźle przesiadkowym poprzez synchronizację. Założono, że rozkład jazdy musi spełniać oczekiwania pasażerów przesiadających się, zachowując jednocześnie atrakcyjność dla podróżujących bez zmiany środka transportu. Dodatkowo rozkłady jazdy poszczególnych linii komunikacyjnych muszą spełniać ograniczenia poszczególnych obsługujących je operatorów transportu.

W modelu symulacyjnym przedstawionym w pracach [56, 130] pasażerowie, autobusy i pociągi metra funkcjonują jako agenci negocjujący synchronizację rozkładów jazdy. W badaniu wykazano, że proponowane podejście skutecznie redukuje czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu poprawiając synchronizację rozkładów jazdy.

Zestawienie czynników, podsystemów transportu i zakresu zastosowania metod synchronizacji rozkładów jazdy rozpatrywanych w literaturze przedstawiono w tabeli 2.4.

Tabela 2.4. Zestawienie charakterystyki badań synchronizacji rozkładów jazdy rozpatrywanych w literaturze

L.p.	Artykuł	Funkcja kryterium	Zmienne decyzyjne	Czas analizy	Interwał	Zakres zastosowania	Podsystem transportu	Zakres planowania	Cechy metody
1	Li 2010 [130]	Koszt związany z przesiadaniem się ↘	Pl. moment realizacji kursu Interwał	S	S	U	O	O	Dynamiczne przypisanie dróg podróży (D)
2	Tsang 2010 [223]	Zyski z biletów pasażerów przesiadających się ↗	Pl. moment realizacji kursu	D		W	K	O	Liczba pasażerów determinowana rozkładem jazdy (D)
3	Nair 2013 [156]	Przeciętny czas oczekiwania podczas przesiadania się ↘	Pl. moment realizacji kursu	D	S	S	O	P	Czas postoju (D) Czas przebycia dróg przejścia (D) Czas przejazdu odcinków (D) Dynamiczne przypisanie dróg podróży (D) Zgłoszenia pasażerów w węźle (S) Model dla dotychczasowych wartości parametrów
4	Lee 2013 [127]	Niezawodność realizacji przesiadki ↗	Pl. moment realizacji kursu	RS	15'	W	O	P	Czas przejazdu zmienny w czasie (D) Czas przebycia dróg przejścia (D) Zróznicowana w czasie liczba pasażerów w relacjach (D) Odchyłki od rozkładu jazdy (S) Ustalony rozkład jazdy pociągów 2 linie wahadłowe
5	Wu 2015 [238]	Koszt przeciętnego czasu oczekiwania ↘	Pl. moment realizacji kursu Czas postoju w węźle	2h	>10'	U	A	P	Czas przebycia dróg przejścia (D) Czas wymiany pasażerskiej (D) Czas przejazdu odcinka (S) Liczba pasażerów w kursach (D) Uwzględniani wszyscy pasażerowie
6	Xiong 2015 [245]	Całkowity koszt połączeń przesiadkowych ↘	Pl. moment realizacji kursu	PS	S	S	A	O	Dynamiczne przypisanie dróg podróży (D) Zróznicowana w czasie liczba pasażerów w relacjach (D)
7	Dou 2016 [51]	Czas oczekiwania podczas przesiadania się ↘ Dyspersja czasu podróży ↘	Czas postoju w węźle		S	S	O	P	Czas przebycia dróg przejścia (D) Czas przejazdu odcinka (S)
8	Fouilhoux 2016 [65]	Liczba zapewnionych przesiadek ↗	Pl. moment odjazdu Czas postoju w węźle	4h		U	A	P	Zakres czasu przesiadania się (D) zakres doboru interwału
9	Ibarra-Rojas 2016 [90]	Suma kar za odchylenia od pożądanego momentu przyjazdu ↘	Pl. moment realizacji kursu	D	O	K	A	P	Czas przejazdu zmienny w czasie (D) Wspólne odcinki tras
10	Wu 2016a [239]	Całkowity koszt ↘	Czas postoju w węźle	D	>10'	U	A	O	Czas przejazdu odcinków (D) Zróznicowana w czasie liczba

L.p.	Artykuł	Funkcja kryterium	Zmienne decyzyjne	Czas analizy	Interwał	Zakres zastosowania	Podsystem transportu	Zakres planowania	Cechy metody
			Interwał						pasażerów w relacjach (D) Odchyłki od rozkładu jazdy (S)
11	Wu 2016b [237]	Liczba pasażerów przesiadających się bez czekania $\nearrow$ Maks. odstęp między kursami $\searrow$	Czas postoju w węźle Interwał	2h	>10'	S	A	P	Liczba pasażerów determinowana rozkładem jazdy (D) Odchyłki od rozkładu jazdy (S)
12	Guo 2017 [81]	Liczba zsynchronizowanych połączeń $\nearrow$	Pl. moment przyjazdu Czas postoju w węźle	15	O	S	K	P	Czas przebycia dróg przejścia (D)
13	Liu 2017 [133]	Koszt połączeń przesiadkowych $\searrow$	Pl. moment odjazdu	2h	S	P	A	O	Czas przebycia dróg przejścia (D) Dynamiczne przypisanie dróg podróży (D) Zakres doboru interwału
14	Nasirian 2017 [157]	Czas oczekiwania podczas przesiadania się $\searrow$ Liczba jednoczesnych przyjazdów $\searrow$	Odstęp między odjazdami	P	S	S	K	P	Czas przebycia dróg przejścia (D) Czas postoju (D) zakres odstępów między odjazdami 5-10'
15	Tian 2017 [220]	Liczba pasażerów, którym zapewniono przesiadkę $\nearrow$ Czas postoju w węźle $\searrow$	Pl. moment odjazdu	D		W	K	P	Zakres czasu postoju (D) Zdefiniowane okna czasowe przyjazdów i odjazdów pojazdów zakres doboru interwału
16	Xiao 2017 [244]	Całkowity koszt realizacji przesiadek $\searrow$	Pl. moment przyjazdu Czas postoju w węźle	D	S	W	A	O	Wartość czasu (D) Czas przebycia drogi przejścia (S) Odchyłki od rozkładu jazdy (S)
17	Gkiotsalitis 2018 [70]	Czas oczekiwania $\searrow$ Rytmiczność $\nearrow$	Pl. moment realizacji kursu	S		S	A	P	Zakres odstępów między odjazdami
18	Liu 2018 [136]	Czas oczekiwania podczas przesiadania się $\searrow$	Pl. moment realizacji kursu	14	S	S	K	P	Czas przebycia dróg przejścia (D) Dynamiczne przypisanie dróg podróży (D)
19	Shang 2018 [195]	Czas podróży $\searrow$	Czas postoju w węźle Pl. moment realizacji kursu	S	S	S	K	P	Zróżnicowana w czasie liczba pasażerów w relacjach (D)
20	Wu 2018 [242]	Liczba pasażerów, którym zapewniono przesiadkę $\nearrow$	Pl. moment odjazdu	1h		P	A	P	Liczba pasażerów determinowana rozkładem jazdy (D)
21	Cao 2019 [35]	Liczba jednoczesnych przyjazdów $\nearrow$	Pl. moment realizacji kursu	R	S	S	K	P	Czas postoju (D) Zakres czasu przebycia dróg przejścia (D)
22	Chowdhury 2019 [43]	Czas oczekiwania podczas przesiadania się $\searrow$ Koszty realizacji przewozów $\searrow$	Pl. moment realizacji kursu Interwał	1h	S	W	A	O	Czas przebycia dróg przejścia (D) Liczba pasażerów determinowana rozkładem jazdy (D)

L.p.	Artykuł	Funkcja kryterium	Zmienne decyzyjne	Czas analizy	Interwał	Zakres zastosowania	Podsystem transportu	Zakres planowania	Cechy metody
23	Liang 2019 [132]	Koszt połączeń $\searrow$	Pl. moment realizacji kursu Interwał	2h	S	S	O	O	Czas przebycia dróg przejścia (D) Czas przejazdu odcinka (S) Określony koszt przesiadki
24	Tian 2019 [219]	Czas oczekiwania $\searrow$ Nieawodność $\nearrow$	Czas postoju w węźle Pl. moment realizacji kursu	D		S	K	P	Czas przebycia dróg przejścia (D) Zakres czasu postoju (D)
25	Abdolmaleki 2020 [2]	Czas oczekiwania podczas przesiadania $\searrow$	Pl. moment realizacji kursu	D	S	S	A	P	Czas przebycia dróg przejścia (D) Zróżnicowana w czasie liczba pasażerów w relacjach (D)
26	Gkiotsalitis 2020 [72]	Maks. odstęp między realizacją kursów $\searrow$	Pl. moment realizacji kursu	PS	S	S	A	O	Czas postoju w węzłach (S) Czas przejazdu odcinka (S) Określone zakresy zmienności dla czynników
27	Lai 2020 [124]	Koszt połączeń przesiadkowych $\searrow$	Pl. moment odjazdu Czas postoju w węźle	6h		K	O	O	Czas postoju w węzłach (S) Czas przejazdu odcinka (S) Zgłoszenia pasażerów w węźle (S)
28	Liu 2020 [137]	Liczba zapewnionych przesiadek $\nearrow$ Koszty realizacji przewozów $\searrow$	Pl. moment odjazdu Czas postoju w węźle Interwał	S	S	K	K	O	Liczba pasażerów w kursach (D) Zakres doboru interwału
29	Naumov 2020 [158]	Czas oczekiwania podczas przesiadania się $\searrow$	Pl. moment realizacji kursu	PS	S	W	A	P	Liczba pasażerów (S)
30	Silva-Soto 2020 [201]	Czas oczekiwania podczas przesiadania się $\searrow$ Koszt uruchamiania połączeń $\searrow$	Odstęp między odjazdami	2h		U	A	O	Czas przejazdu zmienny w czasie (D) Zróżnicowana w czasie liczba pasażerów w relacjach (D) Wspólne odcinki tras Określone zakresy zmienności dla czynników
31	Wang 2020 [229]	Czas oczekiwania $\searrow$ Nieawodność $\nearrow$	Odstęp między odjazdami	1h		S	K	P	Czas postoju (D) Czas przebycia dróg przejścia (D) Zróżnicowana w czasie liczba pasażerów w relacjach (D) Zakres odstępów między odjazdami
32	Zhang 2020 [258]	Czas oczekiwania $\searrow$ Koszty realizacji przewozów $\searrow$	Pl. moment odjazdu Liczba kursów	S		P	A	O	Rozkład równomierny napływu pasażerów (D)
33	Zhou 2020 [264]	Liczba zapewnionych przesiadek $\nearrow$	Pl. moment odjazdu Interwał	S	S	K	K	P	Liczba pasażerów w kursach (D) Zakres doboru interwału
34	Estrada 2021	Całkowity koszt połączeń	Czas postoju	1h	S	K	A	O	Zróżnicowana w czasie liczba

L.p.	Artykuł	Funkcja kryterium	Zmienne decyzyjne	Czas analizy	Interwał	Zakres zastosowania	Podsystem transportu	Zakres planowania	Cechy metody
	[59]	przesiadkowych $\searrow$	w węzle Pl. moment realizacji kursu						pasażerów w relacjach (D) Wspólne odcinki tras
35	Yin 2021 [252]	Zatłoczenie na peronach $\searrow$	Pl. moment odjazdu	S		S	K	O	Zróznicowana w czasie liczba pasażerów w relacjach (D) Pojemność taboru
36	Zhao 2021 [263]	Maks. czas oczekiwania pasażera $\searrow$ Maks. czas zadania transportowego $\searrow$	Pl. moment odjazdu Zadania transportowe Obsługa przystanków	S	S		K	O	Zróznicowana w czasie liczba pasażerów w relacjach (D) 1 linia SKM Zakres doboru interwału
37	Feng 2022 [61]	Koszt połączeń przesiadkowych $\searrow$	Pl. moment odjazdu	2h		U	O	O	Czas przejazdu odcinka (S) Czas przebycia dróg przejścia (D) Rozkład równomierny napływu pasażerów (D) Tylko funkcja odwozowa
38	Huang 2022 [89]	Liczba pasażerów, którym zapewniono przesiadkę $\ddot{O}$ Całkowity koszt $\searrow$	Czas postoju w węzle Pl. moment realizacji kursu Interwał		S		O	P	Czas przebycia dróg przejścia (D) Czas przejazdu odcinków (D) Dynamiczne przypisanie dróg podróży (D) Zakres doboru interwału Wagi istotności dla węzłów i grup pasażerów
39	Lee 2022 [128]	Czas podróży $\searrow$ Niezwadność $\nearrow$	Pl. moment odjazdu Czas postoju w węzle	PS	S		A	P	Czas przejazdu zmienny w czasie (D) Czas przebycia dróg przejścia (D) Zróznicowana w czasie liczba pasażerów w relacjach (D) Czas postoju niezależny od liczby pasażerów Zakres doboru interwału

Objaśnienia:

Funkcja kryterium

Maks. – maksymalny

$\nearrow$ - kryterium jest maksymalizowane

$\searrow$ - kryterium jest minimalizowane

Zmienne decyzyjne

Pl. - planowany

Czas analizy

S – szczyt komunikacyjny

PS – poranny szczyt komunikacyjny

RS – popołudniowy szczyt komunikacyjny

D – doba

Xh – czas analizy trwający X godzin

IX – analiza obejmująca okres szczytu komunikacyjnego i sąsiedni okres pozaszczytowy o łącznym czasie analizy X godzin

Zakres zastosowania

S – rzeczywista sieć transportu zbiorowego

Podsystem transportu

A – transport autobusowy

K – transport kolejowy

O – transport zbiorowy: autobusowy i kolejowy

Zakres planowania

P – perspektywa pasażera

S – perspektywa operatora

O – perspektywa pasażera i operatora

Interwał

S - stały interwał dla linii komunikacyjnej

O - interwał dla linii komunikacyjnej stały w okresach

>10' – stały interwał dłuższy niż 10 min

15' – stały interwał wynoszący 15 min

Cechy metody

(D) – czynnik rozpatrywany jako deterministyczny

(S) – czynnik rozpatrywany jako stochastyczny

L.p.	Artykuł	Funkcja kryterium	Zmienne decyzyjne	Czas analizy	Interwał	Zakres zastosowania	Podsystem transportu	Zakres planowania	Cechy metody
U – uproszczona sieć transportu zbiorowego K – korytarz ruchu ciąg komunikacyjny obsługiwany przez transport zbiorowy W – pojedynczy węzeł przesiadkowy P – przykładowy problem									

Źródło: opracowanie własne

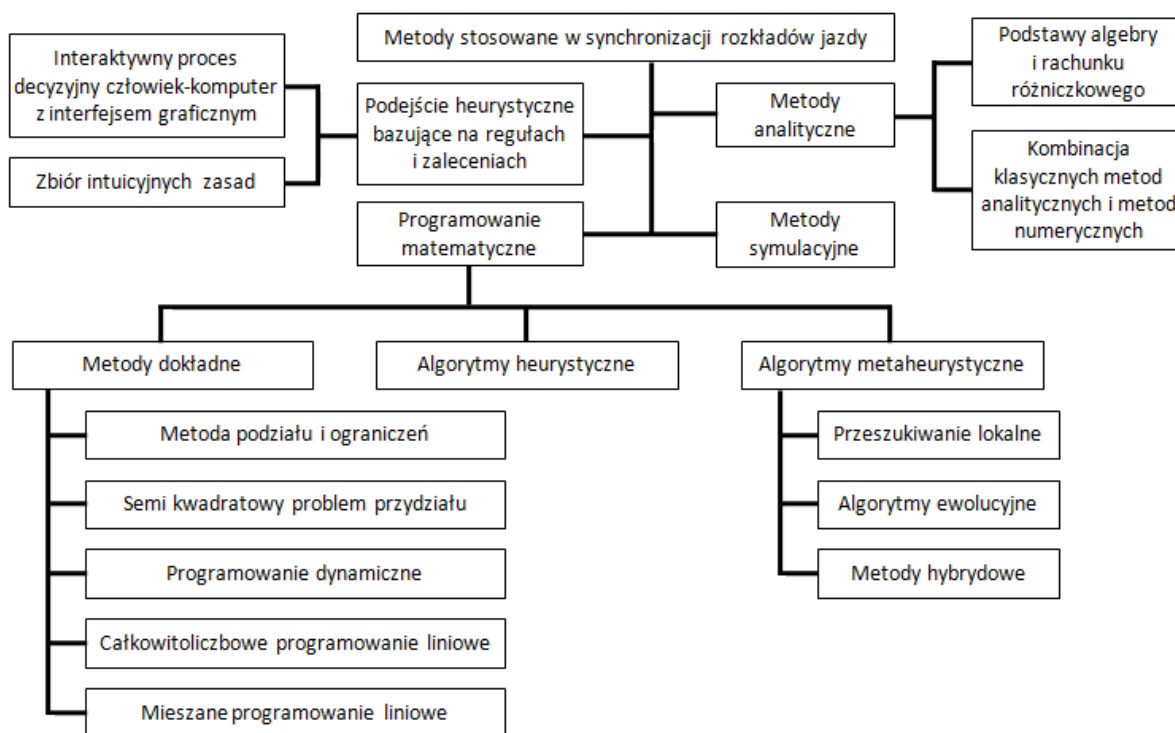
W artykułach z tego obszaru badawczego skupiono się głównie na pasażerach, pomijając pojemność taboru. Wskazano jednak, że zmienne odstępy między kursami skuteczniej skracają czas oczekiwania na przesiadkę niż stały interwał.

Przegląd literatury wykazał, że w badaniach dotyczących synchronizacji rozkładów jazdy stosowane są bardzo zróżnicowane podejścia, zarówno pod względem sposobu i zakresu uwzględniania odchylek od rozkładu jazdy, jak i przyjętych celów, uwzględnianych danych wejściowych czy organizacji systemów transportu zbiorowego. W rezultacie w literaturze wskazuje się na bardzo zróżnicowany ilościowy wpływ synchronizacji i uwzględniania odchylek na wartości parametrów charakteryzujących funkcjonowanie systemu PTZ. Uzyskiwane wyniki dotyczące wpływu synchronizacji na system PTZ są rozbieżne i mieszczą się w szerokim przedziale, od kilku do kilkudziesięciu procent. W efekcie, trudno jest jednoznacznie określić, jakiego rzędu poprawy można oczekiwać w przypadku zastosowania opracowanej metody, co wyklucza możliwość sformułowania wiarygodnych przewidywań ex ante. W podejściu przyjętym w proponowanej metodzie z poszczególnych badań prezentowanych w literaturze zaczerpnięto takie elementy jak:

- *wyznaczanie wartości stałego interwału na podstawie analizy potoków pasażerów i planowania przewozów,*
- *uwzględnienie wahań czasowo-przestrzennych wielkości potoków pasażerów,*
- *przyjęcie dyspersji czasu przyjazdów do węzła i odjazdów z węzła środków transportu zbiorowego,*
- *przeznaczenie metody do synchronizacji rozkładów jazdy w węzłach przesiadkowych integrujących transport kolejowy i autobusową komunikację miejską,*
- *uwzględniono w synchronizacji typowe, regularne odchyłki od rozkładu jazdy.*

Charakterystyka algorytmów i procedur synchronizacji rozkładów jazdy

Problem doboru metod i narzędzi synchronizacji rozkładów jazdy jest analizowany od dziesięcioleci. W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie badaniami nad optymalizacją procesu zmiany środka transportu, co doprowadziło do opracowania różnych podejść. Wyróżnia się cztery główne grupy technik poszukiwania optymalnego rozwiązania [133], przedstawione na rysunku 2.8. wraz z dalszą klasyfikacją metod stosowanych w poszczególnych grupach.



Rys. 2.8. Klasyfikacja wybranych metod stosowanych w synchronizacji rozkładów jazdy
Źródło: opracowanie własne

Najwcześniejsze badania nad synchronizacją rozkładów jazdy wykorzystywały podejście heurystyczne, bazujące na regułach i zaleceniach. Stosowano graficzny, interaktywny proces decyzyjny człowiek-komputer [64]. Metody te opierają się na komputerowo wspomaganym projektowaniu synchronizacji rozkładów jazdy, uwzględniającym stałe interwały dla poszczególnych linii komunikacyjnych, wykresy ruchu oraz graficzną prezentację planowanych momentów przyjazdów i odjazdów środków transportu. Wyznaczone rozwiązania są prezentowane decydentowi, który modyfikuje rozkład jazdy na podstawie oceny wykresów ruchu, w celu dostosowania do praktycznych potrzeb i możliwości realizacji rozkładu jazdy.

W kolejnym podejściu autorzy bazują na definicji zbioru intuicyjnych zasad kształtowania synchronizacji rozkładów jazdy [257]. Na podstawie badań wpływu interwału, planowanego czasu przesiadania i doboru czasu postoju środków transportu w węźle przesiadkowym określono najkorzystniejsze momenty przyjazdów i odjazdów środków transportu jakie należy stosować podczas doboru rozkładu jazdy dla zapewnienia minimalizacji czasu oczekiwania pasażerów. Synchronizacja rozkładów jazdy realizowana z zastosowaniem metod bazujących na intuicyjnych zasadach polega na minimalizacji rozbieżności między zastosowanymi a pożądanymi wartościami charakterystyk rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym.

Metody analityczne opisują optymalizację synchronizacji rozkładów jazdy za pomocą modeli matematycznych. W metodach analitycznych optymalne wartości zmiennych decyzyjnych wyznaczane są przy pomocy algebry i rachunku różniczkowego [124]. Analiza wrażliwości parametrów rozkładu jazdy pozwala lepiej zrozumieć zależności między poszukiwanymi wartościami a funkcją kryterium, wymagając mniejszych zasobów niż metody programowania matematycznego. Głównym ograniczeniem metod analitycznych jest konieczność przyjęcia ciągłości funkcji kryterium, co dla pewnych rozwiązań dopuszczalnych może prowadzić do znacznych różnic między oszacowanymi

a rzeczywistymi wartościami charakteryzującymi funkcjonowanie systemu transportowego. Współcześnie łączy się rachunek różniczkowy z metodami numerycznymi, aby zwiększyć efektywność wyznaczania optymalnych wartości zmiennych decyzyjnych [133].

Zasadniczą różnicą między programowaniem matematycznym a metodami analitycznymi jest sposób odwzorowania funkcji kryterium. W programowaniu matematycznym może być przyjmowana nieliniowa, nieciągła postać funkcji kryterium, zgodnie z rzeczywistą charakterystyką rozpatrywanego problemu synchronizacji rozkładów jazdy [133]. Wyróżnia się kilka grup metod optymalizacyjnych w tym obszarze. Metody dokładne gwarantują znalezienie optymalnego rozwiązania [59], natomiast heurystyki i meta heurystyki zwykle dostarczają zwykle rozwiązań suboptymalnych [72, 233, 240]. W większości badań autorzy formułują zadania jako nieliniowe programowanie całkowitoliczbowego. Heurystyki i meta heurystyki stosowane są do rozwiązania problemu zdefiniowanego zarówno w ujęciu deterministycznym [233] jak i stochastycznym [72, 240]. W podejściu stochastycznym metody bazują na modelach stochastycznych [240] lub optymalizacji odpornej [72].

Metody symulacyjne są rzadziej stosowane do synchronizacji rozkładów jazdy niż inne podejścia [56]. Podstawową zaletą modelowania symulacyjnego jest możliwość odwzorowania złożoności systemu transportu zbiorowego, losowości związanych z poszczególnymi elementami systemu i współzależności pomiędzy elementami [56]. W rezultacie synchronizacja rozkładu jazdy dokonywana jest na podstawie modelu, który pozostaje najbardziej zbliżony do rzeczywistego systemu transportu zbiorowego. Dzięki czemu możliwe jest badanie wpływu synchronizacji rozkładu jazdy, realizowanej na podstawie różnych funkcji kryteriów na parametry podróży [56].

Wyniki przeglądu literatury obejmującego charakterystykę metod synchronizacji rozkładów jazdy przedstawiono w tabelach 2.5 i 2.6, które zawierają odpowiednio klasyfikację wybranych artykułów według struktury zastosowanego modelu oraz algorytmu rozwiązania.

Tabela 2.5 Zestawienie wybranych artykułów o tematyce synchronizacji rozkładów jazdy z uwzględnieniem zastosowanej struktury modelu

L.p.	Struktura modelu	Autorzy
1.	Programowanie całkowitoliczbowe	Teodorović 2005 [217], Abdolmaleki 2020 [2], Tian 2019 [219], Liu 2018 [136], Liu 2016 [134], Ibarra-Rojas 2016 [90], Shen 2015 [199], Estrada 2021 [59]
2.	Liniowe programowanie całkowitoliczbowe	Ibarra-Rojas 2015 [91] Ha 2020 [82]
3.	Liniowe programowanie mieszane	Dou 2016 [51], Silva-Soto 2020 [201], Yin 2021 [252], Wang 2020[229], Nesmachnow 2021 [159], Hu 2019 [88], Cao 2019 [35], Shang 2018 [195], Nasirian 2017 [157], Takamatsu2020 [215], Wu 2018 [242], Fouilhoux 2016 [65], Huang 2022 [89], Samà 2017 [186]
4.	Nieliniowe programowanie całkowitoliczbowe	Gkiotsalitis 2018 [70], Niu 2015 [162], Tian 2017 [220], Feng 2022 [61]
5.	Nieliniowe programowanie mieszane	Wu2016b [237], Guo 2017 [81], Chowdhury2019 [43], Liu 2020 [137]
6.	Stochastyczne programowanie całkowitoliczbowe	Nair 2013 [156], Wu 2015 [238]
7.	Optymalizacja odporna	Gkiotsalitis 2020 [72], Wu 2019 [240], Dou 2016 [51]

Źródło: opracowanie własne

Tabela 2.6 Klasyfikacja wybranych artykułów w tematyce synchronizacji rozkładów jazdy na podstawie algorytm rozwiązania zastosowanego w metodzie

L.p.	Algorytm rozwiązania		Autorzy
1.	Metoda dokładna		Wu 2016a [239], Dou 2016 [51], Estrada 2021 [59], Takamatsu2020 [215], Wu 2018 [242]
2.	Heurystyka		Wang 2021 [233], Hu 2019 [88], Tian 2019 [219], Gkiotsalitis 2018 [70], Liu 2016 [134], Fouilhoux 2016 [65]
3.	Metaheurystyka	Przeszukiwanie lokalne	Yin 2021 [252], Abdolmaleki 2020 [2], Gkiotsalitis 2018 [70], Ibarra-Rojas 2015 [91]
		Algorytmy genetyczne	Wu 2015 [238], Wu2016b [237], Silva-Soto 2020 [201], Wang 2020[229], Nesmachnow 2021 [159], Cao 2019 [35], Shang 2018 [195], Nasirian 2017 [157], Ibarra-Rojas 2016 [90], Xiong 2015 [245], Niu 2015 [162], Feng 2022 [61], Zhang 2020 [258]
		Symulowane wyżarzanie	Wang 2021 [233], Liu 2018 [136], Guo 2017 [81], Shen 2015 [199], Feng 2022 [61], Nickkar 2022 [160]
4.	Symulacja		Tsang 2010 [223], Li 2010 [130], Elbaz 2018 [56], Naumov 2020 [158]

Źródło: opracowanie własne

Synchronizacja rozkładu jazdy jest nieliniowym, niewypukłym problemem programowania mieszanego, co utrudnia znalezienie dokładnego rozwiązania za pomocą metod analitycznych i programowania matematycznego [170]. Wyznaczenie najkorzystniejszego rozkładu jazdy zapewniającego synchronizację w przypadku uwzględnienia czynników o charakterze stochastycznym realizowane jest różnymi metodami.

W artykule [238] zastosowano algorytmy ewolucyjne rozszerzone o przeszukiwanie lokalne. Wszystkie zmienne decyzyjne zapisano w jednym chromosomie jako liczby całkowite, gdzie ciąg wartości określa moment rozpoczęcia realizacji kursów i czasy buforowe w węzłach przesiadkowych dla każdej linii komunikacyjnej. W kolejnych iteracjach, po mutacji rozwiązań, przeprowadzany jest pełny przegląd sąsiednich konfiguracji czasów buforowych wybranej linii komunikacyjnej w celu wybrania najkorzystniejszej konfiguracji wartości rozważanych zmiennych przyjętych do następnej iteracji badania. Zastosowanie przeszukiwania lokalnego pozwala znajdować lepsze rozwiązania, których ocena dokonywana jest za pomocą symulacji Monte Carlo [51, 156, 238].

W pracy [244] algorytm synchronizacji rozkładów jazdy obejmuje odrębną analizę kolejnych linii komunikacyjnych. Punkt wyjścia stanowi rozkład jazdy obowiązujący w węźle. Dla każdej linii komunikacyjnej dokonywany jest przegląd zupełny rozwiązań charakteryzowanych przez czas postoju w węźle przesiadkowym i wybierane jest rozwiązanie zapewniające najmniejszą wartość funkcji kryterium.

Kształtowanie rozkładu jazdy na podstawie najgorszego przypadku charakteryzującego dyspersję odstępów i czynników o charakterze stochastycznym powoduje, że problem z natury stochastyczny jest rozpatrywany jako deterministyczny [72]. Dobór odstępów czasu między odjazdami określa maksymalne odchylenia czynników o charakterze stochastycznym, które wpływają na wartość funkcji kryterium. Stanowi to złożony problem kombinatoryczny, doboru wartości, wzajemnie od siebie zależnych. W pracy [72] zastosowano algorytm sekwencyjny. Iteracyjnie, naprzemiennie dobierane są wartości albo odstępów albo wartości

graniczne i wyznaczone wartości pozostałych zmiennych. Procedura kończy się, gdy różnice między wartościami zmiennych dobranych w kolejnych dwóch iteracjach są akceptowalnie małe.

Wprowadzenie dodatkowych ograniczeń w postaci nierówności powoduje zmniejszenie przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych bez wykluczania rozwiązań całkowitych [65, 128]. Nierówności określone na podstawie specyfiki problemu umożliwiają przeszukiwanie rozwiązań zgodnych z logiką realizacji podróży pasażerów, poprzez ustalenie wartości granicznych dla czasów realizacji poszczególnych etapów podróży [65, 128]. Ograniczenia są wprowadzane do modelu na dwa sposoby, tj. jako regularne ograniczenia modelu lub w ramach metody podziału i cięć. Wpływ zastosowania poszczególnych ograniczeń zależy od charakterystyki rozpatrywanego przypadku [65, 128].

Przedstawiony przegląd metod synchronizacji rozkładów jazdy koncentrował się na algorytmach uwzględniających czynniki o charakterze stochastycznym. Opis nie wyczerpuje jednak wszystkich podejść stosowanych w badaniach, szczególnie w kontekście synchronizacji deterministycznej oraz jej integracji z innymi etapami planowania transportu zbiorowego. Współcześnie podejścia koncentrują się na łączeniu różnych technik. W pracy [217] zastosowano algorytm mrówkowy uzupełniony o logikę rozmytą. Uzyskano lepsze rozwiązanie, niż w wyniku zastosowania klasycznego algorytmu mrówkowego. W pracy [238] algorytmy genetyczne rozszerzono o przeszukiwanie lokalne.

W modelowaniu symulacyjnym zastosowanym w pracy [223] synchronizacja rozkładów jazdy odbywa się poprzez sekwencyjne negocjacje. Procedura trwa określoną liczbę iteracji, podczas których operatorzy naprzemiennie proponują rozkłady jazdy dla obsługiwanych linii komunikacyjnych. Każda propozycja jest analizowana przez drugiego operatora, który może zaproponować modyfikacje. Autorzy zastosowali trzy strategie określające zasady modyfikacji i akceptacji rozkładu jazdy. W poszczególnych strategiach przyjęto, że:

- operator w kolejnych iteracjach dąży do minimalizacji liczby zmian we własnym rozkładzie jazdy,
- operator w kolejnych iteracjach proponuje maksymalne zmiany w otrzymanym rozkładzie jazdy,
- operatorzy wybierają rozwiązanie Pareto-optymalne

Ostateczne rozwiązanie wypracowywane jest poprzez iteracyjne wprowadzanie niewielkich zmian i ustępstw między operatorami. W pracy [130] rozwinięto opisany model symulacyjny, rozszerzając jego zastosowanie na całą sieć transportu zbiorowego. Negocjacje prowadzone są sekwencyjnie, uwzględniając doświadczenia nabyte w kolejnych iteracjach oraz poprzez analizę skutków zastosowania kolejnych proponowanych rozwiązań.

Ze względu na przedstawioną w literaturze złożoność zagadnienia synchronizacji rozkładów jazdy utrudniającą znalezienie dokładnego rozwiązania za pomocą metod analitycznych i programowania matematycznego w pracy przyjęto algorytm modelowania symulacyjnego. Pozwala to na odwzorowanie złożoności systemu transportu zbiorowego, losowości związanych z poszczególnymi elementami systemu i współzależności pomiędzy

elementami. W rezultacie synchronizacja rozkładu jazdy dokonywana jest na podstawie modelu, który pozostaje najbardziej zbliżony do rzeczywistego systemu transportu zbiorowego. Wzorując się na algorytmach stosowanych w literaturze przeprowadzono na etapie doboru pierwszego rozwiązania sekwencyjną analizę poszczególnych linii komunikacyjnych poprzez przegląd zupełny rozwiązań, przyjmując jako punkt wyjścia rozkład jazdy obowiązujący w węźle. W nawiązaniu do aktualnych podejść badawczych, w pracy przyjęto zintegrowane wykorzystanie wybranych metod symulacyjnych i heurystycznych.

2.4. Wnioski z przeprowadzonego przeglądu literatury

Realizacja procesu zmiany środka transportu jest jednym z czynników wpływających na satysfakcję pasażerów, wybór trasy i formy przemieszczania [20, 46, 93, 120, 248]. Współcześnie światowe badania w tym zakresie koncentrują się w dwóch obszarach [87]:

- identyfikacji i charakterystyki czynników wpływających na postrzeganie przez pasażerów procesu zmiany środka transportu wraz z badaniem skuteczności działań związanych z kształtowaniem węzłów przesiadkowych [21, 78, 99, 165, 205],
- skracania czasu oczekiwania i poprawy niezawodności procesu zmiany środka transportu w wyniku poszukiwania nowych algorytmów zapewniających sprawną realizację synchronizacji rozkładów jazdy i opracowywania nowych metod synchronizacji pozwalających zwiększyć dopasowanie wyznaczanych rozwiązań do lokalnych potrzeb i uwarunkowań, zmniejszając całkowity, uogólniony koszt realizacji przewozów, uwzględniając postulaty rozważanych grup interesariuszy [7, 37, 56, 72, 77].

W związku z tym, autorzy w badaniach synchronizacji rozkładów jazdy scharakteryzowanych w podrozdziałach 2.1.-2.3. koncentrują się na jednym lub kilku celach:

- kształtowaniu czasu oczekiwania podczas zmiany środka transportu,
- poprawie koordynacji planowanych momentów przyjazdów i odjazdów pojazdów,
- zwiększanie niezawodności realizacji podróży środkami transportu zbiorowego,
- zmniejszanie całkowitego kosztu uogólnionego obsługi węzłów przesiadkowych,
- poprawianie dostępności transportu zbiorowego.

Poszczególne metody synchronizacji rozkładów jazdy w węzłach przesiadkowych prezentowane w literaturze stosowane były:

- dla danych przykładowych, sytuacji uproszczonych lub rzeczywistych,
- w pojedynczych obiektach, korytarzach transportowych, węzłach przesiadkowych funkcjonujących w systemie dowozowo-odwozowym lub w problematyce węzłów przesiadkowych w sieci transportu zbiorowego,
- w jednym lub większej liczbie podsystemów transportu zbiorowego,
- z podziałem pojazdów na te, z których pasażerowie wysiadają i te pojazdy, do których pasażerowie wsiadają lub bez rozróżnienia roli pojazdów,

- z uwzględnieniem dodatkowych czynników związanych z realizacją zadań transportowych a nie dotyczących bezpośrednio synchronizacji rozkładów jazdy lub bez uwzględnienia dodatkowych czynników.

Poszczególni autorzy stosują w synchronizacji tylko wybrane zmienne decyzyjne, wśród których należy wskazać planowane momenty rozpoczynania kursów, czas postoju środków transportu na kolejnych przystankach na trasie, zwłaszcza w węzłach przesiadkowych. interwał międzykursowy linii komunikacyjnych, trasy i wybór obsługiwanych przystanków. [6, 7, 12, 93, 205].

W problematyce synchronizacji rozkładów jazdy szeroko stosowany jest aparat programowania matematycznego jako podstawa algorytmów najczęściej stosowanych podczas synchronizacji rozkładów jazdy czyli algorytmów heurystycznych i metaheurystycznych [88, 160, 199, 211, 219]. Złożoność powoduje istotne trudności w precyzyjnym odwzorowaniu procesu zmiany środka transportu za pomocą modelu. W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie autorów problematyką zintegrowanego podejścia łączącego programowanie matematyczne i metody optymalizacji numerycznej [22, 41, 113, 145, 167]. Wynika to dodatkowo z występującego powiązania różnych, złożonych kwestii w obszarze planowania transportu zbiorowego, których równoczesne uwzględnienie podczas budowy rozkładu jazdy może zapewnić wypracowanie lepszych rozwiązań, niż gdyby rozpatrywać poszczególne problemy oddzielnie [1, 49, 102, 163, 164].

Metoda oraz narzędzia stosowane do prowadzenia eksperymentów powinny uwzględniać i odwzorowywać [84, 117, 191, 203, 216]:

- złożoność procesu zmiany środka transportu przez pasażerów w węźle przesiadkowym,
- potrzeby różnych grup pasażerów, zwłaszcza przyjeżdżających do węzła z różną intensywnością w ciągu dnia w poszczególnych relacjach podróży,
- występowanie regularnych odchyłek od rozkładu jazdy,
- możliwość odwzorowania rzeczywistych układów tras linii komunikacyjnych obsługujących węzeł, w tym różnej liczby stanowisk przystankowych, liczby i długości dróg przejścia w węźle przesiadkowym,
- niezerowy czas przebycia dróg przejścia, o wartościach zróżnicowanych w populacji pasażerów w przypadku węzłów przesiadkowych w transporcie kolejowym, a zwłaszcza węzłów integrujących transport kolejowy i autobusową komunikację miejską.

Pomimo rozszerzania zintegrowanego podejścia w metodach synchronizacji rozkładów jazdy nadal w ograniczonym zakresie uwzględniane są oczekiwania pasażerów, związane ze zgłaszanym zapotrzebowaniem na realizację podróży. Ta złożona problematyka nie została jak dotąd wyczerpana. W większości artykułów, w funkcji kryterium, synchronizacja oceniana jest na podstawie planowanych momentów realizacji kursów zamiast bezpośrednio na podstawie czasu oczekiwania pasażerów determinowanego przez rozkład jazdy. W literaturze wskazuje się na konieczność uwzględniania liczby osób zmieniających środek transportu w węzłach przesiadkowych w szacowaniu czasu oczekiwania oraz doborze interwału. W dodatku obecnie większość metod dedykowanych jest synchronizacji rozkładów

jazdy w krótkich okresach doby, szczytach komunikacyjnych, co ogranicza możliwości odwzorowania różnic w organizacji i funkcjonowaniu transportu zbiorowego w kolejnych okresach.

Duża liczba metod synchronizacji rozkładów jazdy charakteryzowanych przez zróżnicowany zakres uwzględnianych czynników i stosowanych algorytmów wiąże się z trudnościami w porównaniu efektywności i skutków zastosowania poszczególnych metod. Prezentacja rezultatów zastosowania poszczególnych metod zwykle ograniczona jest do porównania wartości funkcji kryterium oceniającej funkcjonowanie transportu zbiorowego na analizowanym obszarze przed i po wdrożeniu proponowanej metody. Ponadto nie przedstawiono jak dotąd wyników zastosowania opracowanych metod synchronizacji rozkładów jazdy na etapie walidacji równocześnie do kilku sytuacji. Celem badania poszczególnych metod synchronizacji rozkładów jazdy powinna być identyfikacja i wielowymiarowa analiza wpływu uwzględnianych czynników na korzyści wynikające z synchronizacji rozkładu jazdy realizowanej dla przyjętej funkcji kryterium w rozpatrywanych metodach. Zwiększyłoby to możliwość bezpośredniego porównania alternatywnych metod synchronizacji rozkładów jazdy. Jednocześnie pozwoli to ocenić dostosowanie metod do specyfiki węzłów przesiadkowych w poszczególnych uwarunkowaniach lokalnych funkcjonowania transportu zbiorowego, w tym zakresu, potrzeb, przyczyn i zasad zmian rozkładów jazdy.

Wskazana jest w przyszłych badaniach stopniowa, choć częściowa rezygnacja ze stosowanych współcześnie w artykułach założeń o regularnym i deterministycznym charakterze funkcjonowania węzła przesiadkowego. Jako czynniki stochastyczne rozpatrywane są w literaturze czas przejazdu, czas wymiany pasażerskiej i wielkość zgłaszanego zapotrzebowania na realizację podróży, ale poszczególni autorzy rozpatrują tylko niektóre z czynników wpływających na proces zmiany środka transportu. W związku z tym problematyka wpływu odchyłek od rozkładu jazdy na synchronizację nie została jeszcze w pełni rozpoznana.

Nie rozważano dotychczas zastosowania modelowania symulacyjnego, w tym modelowania agentowego w celu dostosowania synchronizacji rozkładów jazdy do stochastycznego charakteru procesów ruchu w sieci transportowej. Daną grupę metod prezentowano tylko w kilku artykułach dotyczących tematyki podjętej w rozprawie. Dopiero w jednym z ostatnich artykułów [244], podjęta została problematyka ściśle związana z tematem dysertacji. Dla potrzeb zbadania wpływu odchyłek od rozkładu jazdy uwzględnianych podczas synchronizacji rozkładów jazdy opracowany przez autorów model opisuje pojedynczy węzeł przesiadkowy. We wskazanym artykule analiza skoncentrowana została na optymalnym doborze rozkładowego czasu zatrzymania pojazdów w węźle przesiadkowym.

Na podstawie krytycznego przeglądu literatury, przedstawionego we wcześniejszych podrozdziałach, zdefiniowano lukę badawczą polegającą na braku oceny wpływu uwzględniania regularnych odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji rozkładów jazdy na wartość średnią czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu

w węźle przesiadkowym. W związku z tym zachodzi potrzeba przeprowadzenia oceny zsynchronizowanych rozkładów jazdy, wyznaczonych z zastosowaniem proponowanej metody, którą charakteryzuje nierozważany dotychczas wspólnie następujący zestaw cech:

- synchronizację rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym integrującym transport kolejowy z autobusową komunikacją miejską, na styku dwóch współistniejących podsystemów transportu zbiorowego, o określonych zadaniach w obsłudze zgłaszanego zapotrzebowania na podróż, wykraczającego poza rolę dowozowo-odwozową,
- opisanie procesu zmiany środka transportu w ujęciu potoku pasażerów za pomocą modelu oraz rozpatrywanego w całym okresie funkcjonowania węzła przesiadkowego, z wyróżnieniem szczytów komunikacyjnych i okresów pozaszczytowych,
- zorientowanie na obsłudze relacji podróży z uwzględnieniem wszystkich kursów zapewniających połączenie węzła przesiadkowego z segmentami źródłowym i docelowym w rozważanej relacji podróży,
- odwzorowanie wspólnych fragmentów tras linii komunikacyjnych,
- synchronizację rozkładów jazdy poprzez modyfikacje planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej ze stanowisk przystankowych w celu dostosowania do momentów zgłoszeń pasażerów zmieniających środek transportu w węźle na stanowisku przystankowym, na którym oczekują na wejście do pojazdu,
- uwzględnienie odchylek od rozkładu jazdy i zróżnicowania czasu przebycia dróg przejścia rozpatrywanych jako czynniki o charakterze stochastycznym, opisanych rozkładami prawdopodobieństwa o wartościach parametrów różnych w poszczególnych okresach, tj. szczytach komunikacyjnych i okresach pozaszczytowych, odpowiednio dla poszczególnych linii komunikacyjnych i dróg przejścia,
- uwzględnienie różnych wartości stałego interwału dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w okresach,
- powiązanie rozkładowych momentów odjazdów wszystkich autobusów komunikacji miejskiej w kursach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy zapewniające płynną zmianę częstotliwości realizacji kursów pomiędzy okresami poprzez uzależnienie wartości odstępów czasu między realizacją dwóch kolejnych kursów realizowanych w sąsiednich okresach od wartości stałych interwałów w rozważanych okresach,
- koncentracja na pasażerach zmieniających środek transportu, przy uwzględnieniu innych pasażerów korzystających z linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy poprzez zapewnienie rozkładu jazdy w komunikacji miejskiej rytmicznego w okresach oraz brak buforowania czasu zatrzymania autobusów w synchronizacji węzłowej,
- brak rozpatrywania przesiadek odrębnie dla par kursów tzn. brak uproszczonego podejścia zakładającego planowany czas przesiadania z karaniem odchylek w zakresie zarówno dłuższego jak i tylko krótszego odstępu czasu pomiędzy realizacją rozważanych par kursów,
- uwzględnienie w szacowaniu czasu oczekiwania liczby pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej, w poszczególnych relacjach podróży,

- przyjęcie obowiązującego rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym jako punktu wyjścia w metodzie,
- brak uwzględniania wartości czasu oczekiwania i subiektywnego postrzegania czasu oczekiwania przez pasażerów zróżnicowanego ze względu na cechy pasażerów i atrybuty podróży,
- zastosowanie w metodzie zarówno przeszukiwania z tabu jak i symulacji Monte Carlo.

Integralnym elementem realizowanych prac, skoncentrowanych na osiągnięciu celu badawczego założonego w dysertacji, jest:

- implementacja proponowanej metody w warunkach polskich do synchronizacji rozkładów jazdy na przykładzie wybranych węzłów przesiadkowych funkcjonujących w GZM wraz z charakterystyką tych węzłów i ich otoczenia, w zakresie wynikającym z celu pracy. Analiza węzłów jest podstawą doboru danych wejściowych do proponowanej metody,
- ocena wpływu lokalnych uwarunkowań, wybranych charakterystyk badanych węzłów przesiadkowych i zasad budowy rozkładu jazdy w komunikacji miejskiej na zróżnicowanie wpływu uwzględniania regularnych odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji na średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym.

Według wiedzy Autora, dotychczas nie opisano metody o przedstawionej konfiguracji cech i zakresie zastosowania wraz z analizą wyników synchronizacji rozkładów jazdy. Opracowanie takiej metody wpisuje się w aktualne kierunki badań światowych.

3. Model węzła przesiadkowego i jego otoczenia

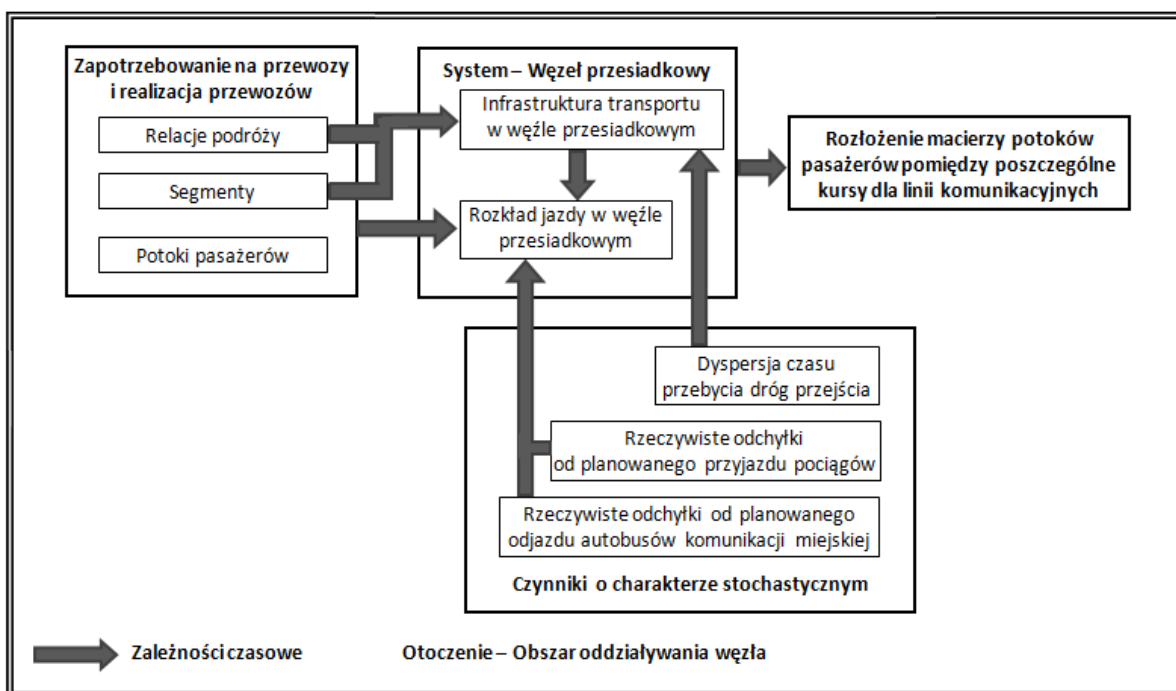
3.1. Struktura modelu

Kluczowym elementem rozpatrywanym w dysertacji jest proces zmiany środka transportu. W celu precyzyjnego odwzorowania opisu tego procesu dla potrzeb synchronizacji rozkładów jazdy zbudowano w pracy model węzła przesiadkowego i jego otoczenia. Opracowany model został w pracy zastosowany do odwzorowania związków, zależności i powiązań pomiędzy elementami istotnymi w procesie zmiany środka transportu. Model odwzorowuje związki między zgłaszanym przez pasażerów zapotrzebowaniem na przejazdy w okresie funkcjonowania węzła w relacjach podróży, rozkładem jazdy w węźle przesiadkowym i oddziaływaniem czynników o charakterze stochastycznym. Wskazane trzy powiązane wzajemnie elementy wpływają na wielkość potoków pasażerów odjeżdżających ze stanowisk przystankowych w węźle przesiadkowym poszczególnymi autobusami komunikacji miejskiej w kursach. Przedstawione związki zostały w rozprawie poddane analizie w zakresie synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym. Elementy modelu przyjętego w dysertacji i zależności pomiędzy tymi elementami odwzorowano następnie w proponowanej metodzie synchronizacji rozkładów jazdy.

Zbudowany dla potrzeb pracy **model węzła przesiadkowego i jego otoczenia MWO** obejmuje:

- węzeł przesiadkowy,
- zapotrzebowanie na przewozy i realizację przewozów,
- zależności czasowe opisujące ruch pojazdów i pieszych w węźle przesiadkowym,
- czynniki o charakterze stochastycznym oddziałujące na ruch środków transportu i pasażerów w węźle przesiadkowym oraz opisane dla potrzeb synchronizacji rozkładów jazdy,
- rozłożenie macierzy potoków pasażerów pomiędzy poszczególne kursy dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy i obsługujących węzeł przesiadkowy.

Elementy przyjętego modelu węzła przesiadkowego i jego otoczenia rozpatrywanego w ujęciu dynamicznym oraz zidentyfikowane powiązania pomiędzy elementami przedstawione zostały na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Model węzła przesiadkowego i jego otoczenia dla potrzeb odwzorowania procesu zmiany środka transportu
Źródło: opracowanie własne

Model rozpatrywany jest w ujęciu dynamicznym, procesowym. **Węzeł przesiadkowy** odwzorowany został w dysertacji jako system, w którym rozważany jest proces zmiany środka transportu. Przyjęte elementy składowe węzła przesiadkowego to infrastruktura transportu i rozkład jazdy.

Linie komunikacyjne obsługujące węzeł przesiadkowy stanowią podstawę określenia w rozprawie zależności istotnych w aspekcie synchronizacji rozkładów jazdy, pomiędzy elementami węzła przesiadkowego i jego otoczenia. W zakresie atrybutów linii komunikacyjnych rozpatrywanych w modelu przyjęto poza rozkładem jazdy również obsługiwane segmenty. Jako składowe modelu, wyróżnione względem węzła przesiadkowego określono:

- **zapotrzebowanie na przewozy i realizację przewozów** obejmujące segmenty, relacje podróży i potoki pasażerów rozpatrywanych w obszarze oddziaływania węzła. Stanowi to wejście do procesu zmiany środka transportu dla potoku pasażerów. Segmenty odwzorowują trasy linii komunikacyjnych i obsługiwane przystanki w sposób zagregowany, tj. na poziomie wystarczająco ogólnym dla potrzeb opisu procesu zmiany środka transportu. Obsługa segmentów przez linie komunikacyjne pozostaje w obszarze tematycznym synchronizacji rozkładów jazdy. Pary segmentów opisują relacje podróży, natomiast potoki pasażerów określono w postaci macierzy zgłoszonego lub planowanego zapotrzebowania na przewóz w poszczególnych relacjach podróży rozłożonego w okresie funkcjonowania węzła,

- **zależności czasowe** opisując rozpatrywane w dysertacji związki pomiędzy elementami modelu stanowią podstawę przekształcenia wyróżnionego zbioru elementów w system. Zależności czasowe pozwalają przedstawić elementy zbiorów w postaci sekwencji, określając tym samym ramy dla odwzorowania w pracy procesu zmiany środka transportu w aspekcie synchronizacji rozkładów jazdy. Podstawą analizy wykonywanej w rozprawie jest proces ruchu pojazdów i pieszych w węźle przesiadkowym w czasie. Sformułowane zależności, pomiędzy zgłaszanym ustalonym zapotrzebowaniem na przewóz ze zmianą środka transportu i realizacją przewozów rozpatrywane są w węźle przesiadkowym.
- **czynniki o charakterze stochastycznym** oddziałujące na realizację procesu zmiany środka transportu przez potoki pasażerów. Czynniki rozpatrywane są wyłącznie w powiązaniu z elementami infrastruktury węzła bez rozważania przyczyn występowania tych czynników, choć przyczyny te związane są zarówno z węzłem przesiadkowym jak i obszarem oddziaływania węzła. Odchyłki od rozkładu jazdy dla transportu kolejowego i komunikacji miejskiej oraz dyspersja czasu przebycia drogi przejścia przez pasażerów powodują, że czas oczekiwania podczas zmiany środka transportu dla poszczególnych pasażerów może różnić się nawet pomiędzy rozważanymi pojedynczymi realizacjami procesu przez potoki pasażerów,
- **rozłożenie macierzy potoków pasażerów** stanowiące podstawę określenia czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle w aspekcie czasu podróży. Rozłożenie macierzy potoków pasażerów opisuje przydział pasażerów do kursów dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy obsługujących węzeł przesiadkowy i jest rezultatem modelowania czyli wypadkową oddziaływania pomiędzy wcześniej omówionymi elementami i powiązaniami elementów,

Węzeł przesiadkowy stanowi kluczową część modelu będąc podstawą odwzorowania powiązań pomiędzy rozpatrywanymi elementami modelu. W modelu węzła przesiadkowego rozpatrywany jest proces zmiany środka transportu w aspekcie synchronizacji rozkładów jazdy. Na podstawie wewnętrznej struktury modelu odwzorowanej w dysertacji wraz z uwzględnieniem danych wejściowych i oddziałujących czynników może być wyznaczane rozłożenie czasowe macierzy potoków pasażerów na poszczególne kursy. Odwzorowano w modelu:

- elementy infrastruktury punktowej - perony i stanowiska przystankowe wraz ze wskazaniem obsługujących je linii komunikacyjnych,
- elementy infrastruktury liniowej - drogi przejścia z identyfikacją relacji podróży, dla których przemieszczenia w węźle przesiadkowym realizowane są poszczególnymi drogami przejścia,
- rozkład jazdy w węźle przesiadkowym opisujący obsługę węzła przesiadkowego przez linie komunikacyjne zarówno w modyfikowanych, jak i niemodyfikowanych kierunkach jazdy. W modelu rozkład jazdy w węźle przesiadkowym opisuje dla transportu kolejowego planowane momenty przyjazdów pociągów na tory przy

peronach, a dla komunikacji miejskiej planowane momenty odjazdów autobusów ze stanowisk przystankowych.

W pracy rozpatrywane są tylko elementy bezpośrednio związane z realizacją podróży pasażerów.

Zapotrzebowanie na przewozy i realizacja przewozów obejmuje dane wejściowe do opisu procesu zmiany środka transportu dla potoku pasażerów w węźle przesiadkowym i stanowi podstawę identyfikacji roli węzła przesiadkowego w obsłudze przewozów pasażerów. Zapotrzebowanie na przewozy i realizacja przewozów obejmuje elementy należące do otoczenia węzła przesiadkowego i są to relacje podróży, potoki pasażerów i segmenty.

Relacje podróży stanowią jeden z kluczowych elementów dysertacji, ponieważ identyfikują w opracowanym modelu strukturę przestrzenną obsługi podróżnych zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym. Relacje podróży determinują w opracowanym modelu sposób realizacji przez pasażerów podróży ze zmianą środka transportu. Każdej relacji podróży odpowiada droga przejścia w węźle przesiadkowym opisana parą peron, stanowisko przystankowe oraz linie komunikacyjne, które zapewniają połączenie węzła przesiadkowego z segmentami. Linie komunikacyjne, z których korzystają pasażerowie przemieszczający się w relacji podróży odpowiednio pomiędzy segmentem i węzłem przesiadkowym, określane są spośród wszystkich linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy.

Potoki pasażerów przyjeżdżających do węzła pociągami i przemieszczających się do poszczególnych segmentów docelowych, wyrażone w modelu w postaci macierzy odwzorowują zgłaszane zapotrzebowanie na podróże w relacjach. Dlatego liczba elementów macierzy potoków pasażerów jest determinowana przez liczbę połączeń kolejowych i liczbę segmentów docelowych. Natomiast wielkości potoków pasażerów wysiadających z pociągów wyrażone w modelu poprzez wartości elementów macierzy odwzorowują zmieniającą się w ciągu doby liczbę podróży realizowanych w poszczególnych relacjach. Liczba pasażerów przyjeżdżających do węzła przesiadkowego poszczególnymi pociągami zależy od wielkości i dobowych wahań zapotrzebowania na podróże w relacjach, rozkładu jazdy dla relacji w transporcie kolejowym dostosowanego do wskazanych wahań i układu tras relacji w transporcie kolejowym.

Segmenty odwzorowują w modelu układ tras linii komunikacyjnych, zwłaszcza występowanie wspólnych odcinków tras istotne dla potrzeb odwzorowania procesu zmiany środka transportu przez pasażerów w węźle przesiadkowym. Segmenty stanowią podstawę opisu realizacji podróży przez pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym i identyfikacji linii komunikacyjnych zapewniających połączenia w poszczególnych relacjach podróży, tzn. obsługujących poszczególne segmenty. W opracowanym modelu dla potrzeb synchronizacji rozkładów jazdy w węźle

przesiadkowym zorientowanej na relacje podróży istotne jest także wskazanie dla każdej linii komunikacyjnej segmentów obsługiwanych przez tą linię.

W węźle przesiadkowym realizowany jest proces zmiany środka transportu, dlatego model wymaga odwzorowania upływu czasu. Przyjęte w modelu **zależności czasowe** charakteryzują zależności w ruchu środków transportu i pasażerów w **procesie zmiany środka transportu przez pasażerów w węźle przesiadkowym**. Zasadniczym elementem jest przypisanie momentów przyjazdów pociągów i momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej. Zależności czasowe stanowią podstawę opisu rozkładu jazdy dla poszczególnych linii komunikacyjnych, a tym samym obsługi węzła przesiadkowego przez transport zbiorowy. W modelu **MWO** odwzorowano:

- zbiór numerów kolejnych jednostek czasu stanowiących podstawę opisu procesu zmiany środka transportu przez pasażerów w okresie funkcjonowania węzła,
- zbiór funkcji określających momenty obsługi węzła przesiadkowego przez środki transportu zbiorowego oraz momenty wystąpienia zdarzeń związanych z realizacją procesu zmiany środka transportu dla potrzeb odwzorowania rozkładu jazdy i obsługi relacji podróży przez transport zbiorowy.

Zależności czasowe w sposób jednoznaczny odwzorowują wystąpienia zdarzeń w czasie i czas trwania etapów podróży dla poszczególnych pasażerów, stanowiąc podstawę synchronizacji rozkładów jazdy. Powiązania pomiędzy zgłaszanym zapotrzebowaniem na podróż w poszczególnych relacjach podróży i obsługą węzła przesiadkowego przez linie komunikacyjne w kierunkach jazdy zapewniające połączenia z poszczególnymi segmentami stanowią podstawę rozłożenia potoków pasażerów węźle przesiadkowym w czasie.

Losowość w procesach ruchu w węźle przesiadkowym występująca w rzeczywistych warunkach funkcjonowania transportu publicznego wpływa na wartość średnią i powoduje występowanie zmienności czasu oczekiwania poszczególnych pasażerów w realizacji procesu zmiany środka transportu. Odwzorowane w pracy **czynniki o charakterze stochastycznym** to:

- 1) odchyłki od planowanych momentów przyjazdów pociągów do węzła przesiadkowego,
- 2) odchyłki od planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej z węzła przesiadkowego,
- 3) dyspersja czasu przebycia drogi przejścia.

Pierwszy ze wskazanych czynników odwzorowuje skutki oddziaływania zakłóceń w transporcie kolejowym na dyspersję rzeczywistych momentów przyjazdów pociągów do węzła przesiadkowego. Drugi odwzorowuje skutki oddziaływania zakłóceń w komunikacji miejskiej na dyspersję rzeczywistych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej z węzła przesiadkowego. Trzeci z czynników odwzorowuje zróżnicowanie czasu przejścia pasażerów w węźle odrębnie dla każdej drogi przejścia.

Założono, że przyjęte czynniki o charakterze stochastycznym dotyczą tylko ruchu w węźle przesiadkowym, a przyczyny i źródła ich wystąpienia są pomijane. Parametry wskazanych charakterystyk przyjmują różne wartości w kolejnych okresach, dla poszczególnych kierunków jazdy/relacji w transporcie kolejowym i dróg przejścia. W aspekcie synchronizacji rozkładów jazdy czynniki o charakterze stochastycznym oddziałując na ruch pojazdów i pieszych w węźle przesiadkowym powodują zróżnicowanie na czasu oczekiwania pasażerów. Występuje zróżnicowanie rozłożenia czasowego macierzy potoków pasażerów w węźle przesiadkowym w kolejnych realizacjach procesu zmiany środka transportu rozpatrywanego w ujęciu stochastycznym mimo ustalonego rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym.

W dysertacji proces zmiany środka transportu dotyczy węzła przesiadkowego. Dlatego w ramach problematyki realizacji podróży ze zmianą środka transportu rozpatrywane są tylko etapy podróży realizowane przez pasażerów w czasie ich przebywania w węźle przesiadkowym. Ramy czasowe przebywania pasażera w węźle przesiadkowym wyznaczone są przez moment przyjazdu pociągiem i moment odjazdu pasażera autobusem komunikacji miejskiej ze stanowiska przystankowego. Przyjęto w rozprawie, że **rozłożenie czasowe macierzy potoków pasażerów w węźle przesiadkowym** jest rozpatrywane jako wynik wzajemnego oddziaływania między zgłaszanym zapotrzebowaniem na realizację podróży, dostosowywanym do tego zapotrzebowania rozkładem jazdy w węźle uwzględniającym obsługę segmentów przez linie komunikacyjne i czynnikami o charakterze stochastycznym determinującymi występowanie odchyłek od rozkładu jazdy i zróżnicowanie wśród pasażerów czasu przebycia dróg przejścia. Rozłożenie czasowe macierzy potoków pasażerów w węźle przesiadkowym określa liczbę pasażerów, którzy odjadą z węzła autobusami w poszczególnych kursach i wyznaczone jest na podstawie zależności czasowych pomiędzy ruchem pojazdów i pieszych w węźle przesiadkowym. Istotne w tym zakresie są momenty wejścia pasażerów na stanowiska przystankowe w węźle przesiadkowym i momenty odjazdów autobusów komunikacji miejskiej dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy zapewniających połączenie z segmentem docelowym w ramach relacji podróży poszczególnych pasażerów. Rozłożenie czasowe macierzy potoków pasażerów w węźle przesiadkowym, czyli przypisanie każdemu pasażerowi zmieniającemu środek transportu autobusu w kursie, którym odjedzie z węzła przesiadkowego determinuje czas oczekiwania pasażerów podczas zmiany środka transportu w węźle. Modyfikacje rozkładu jazdy w podczas synchronizacji powodują celowe zmiany w rozłożeniu czasowym macierzy potoków pasażerów a przez to zmiany czasu oczekiwania.

W związku z tym dla potrzeb pracy zbudowano model węzła przesiadkowego i jego otoczenia **MWO**, który zapisano w postaci:

$$MWO = \langle WP, ZP, T, DR, \Phi \rangle \quad (3-1)$$

gdzie:

WP – model zawierający elementy węzła przesiadkowego istotne dla potrzeb synchronizacji rozkładów jazdy, czyli infrastruktura i rozkład jazdy w węźle przesiadkowym,

- ZP** – model opisujący strukturę czasowo-przestrzenną zgłaszanego względem transportu zbiorowego zapotrzebowania na przewozy ze zmianą środka transportu w węźle przesiadkowym oraz elementy istotne dla zaspokojenia danego zapotrzebowania obejmujące linie komunikacyjne umożliwiające realizację podróży w poszczególnych relacjach,
- T** – model zależności czasowych stanowiących podstawę opisu procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym przyjętego w rozprawie dla potrzeb oceny czasu oczekiwania podczas synchronizacji rozkładów jazdy. Przyjęte powiązania pomiędzy elementami modelu definiują ramy do rozłożenia czasowego potoków pasażerów w węźle,
- DR** – model zawierający czynniki o charakterze stochastycznym oddziałujące na proces ruchu środków transportu i pieszych w węźle przesiadkowym oraz odwzorowujące odchyłki od rozkładu jazdy dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy i zróżnicowanie czasu przebycia dróg przejścia,
- Φ** – model opisujący rozłożenie macierzy potoków pasażerów pomiędzy poszczególne kursy dla linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy.

3.2. Elementy modelu związane z realizacją przewozów pasażerskich w obszarze oddziaływania węzła

W modelu **MWO** odwzorowane zostały tylko elementy węzła przesiadkowego i jego otoczenia, które są niezbędne do opisu procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym. Zakres zrealizowanych działań i przyjętych odwzorowań, dostosowano do potrzeb opisu rozłożenia macierzy potoków pasażerów zmieniających środek transportu na kursy. Elementy modelu związane są z funkcjonowaniem węzła przesiadkowego w zakresie realizacji przez pasażerów przemieszczeń środkami transportu do i z węzła przesiadkowego.

Wskazane przemieszczenia realizowane są liniami komunikacyjnymi. Dlatego zdefiniowano w modelu następujące zbiory:

- zbiór **$J\mathcal{K}$** numerów relacji w transporcie kolejowym obsługujących węzeł określony w postaci:

$$J\mathcal{K} = \{1, \dots, j_{\mathcal{K}}, \dots, |J\mathcal{K}|\} \quad (3-2)$$

gdzie $|J\mathcal{K}|$ oznacza liczebność zbioru **$J\mathcal{K}$** .

- zbiór **$J\mathcal{A}$** numerów kierunków jazdy w komunikacji miejskiej związanych z liniami komunikacyjnymi obsługującymi węzeł przesiadkowy określony w postaci:

$$J\mathcal{A} = \{1, \dots, j_{\mathcal{A}}, \dots, |J\mathcal{A}|\} \quad (3-3)$$

gdzie $|J\mathcal{A}|$ oznacza liczebność zbioru **$J\mathcal{A}$** .

Zbiór **$J\mathcal{A}$** stanowi podstawę identyfikacji podzbiorów:

- zbioru $\widehat{fA}$ numerów linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy,
- zbioru $\widehat{fA}$ numerów linii komunikacyjnych w niemodyfikowanych kierunkach jazdy,
- zbioru JUA numerów linii komunikacyjnych w ustalonych kierunkach jazdy, tzn. linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy, dla których w danym momencie realizacji proponowanej metody znany jest dokładny rozkład jazdy, który pozostaje niezmienny w czasie dalszej realizacji rozważanego etapu algorytmu.

Ponadto w węźle przesiadkowym zdefiniowane zostały zbiory numerów:

- peronów SPK , gdzie oznaczenie $sp\kappa(j\kappa)$ identyfikuje peron $sp\kappa$ w węźle obsługiwany przez $j\kappa$ -tą relację w transporcie kolejowym,
- stanowisk przystankowych SPA gdzie oznaczenie $sp\alpha(j\alpha)$ identyfikuje stanowisko przystankowe $sp\alpha$ w węźle obsługiwane przez linię komunikacyjną w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy.

Zbiór P dróg przejścia dostępnych w węźle przesiadkowym określono w postaci:

$$P = \{p \equiv (sp\kappa, sp\alpha): sp\kappa \in SPK, sp\alpha \in SPA\} \quad (3-4)$$

Drogi przejścia wpływają na czas przemieszczania podczas zmiany środka transportu, który uwzględniono w proponowanej metodzie synchronizacji rozkładów jazdy.

Zbiór numerów kursów w transporcie kolejowym K obsługujących węzeł przesiadkowy zdefiniowano w postaci:

$$K = \{1, \dots, \kappa, \dots, |K|\} \quad (3-5)$$

gdzie $|K|$ oznacza liczebność zbioru K kursów zapewniających połączenia pomiędzy peronami a węzłem przesiadkowym.

Natomiast zbiór numerów kursów w komunikacji miejskiej A obsługujących węzeł przesiadkowy zdefiniowano w postaci:

$$A = \{1, \dots, \alpha, \dots, |A|\} \quad (3-6)$$

gdzie $|A|$ oznacza liczebność zbioru A kursów zapewniających połączenia pomiędzy stanowiskami przystankowymi a węzłem przesiadkowym.

Dla potrzeb opisu obsługi segmentów przez linie komunikacyjne zbiory kursów K i A zostały podzielone na podzbiory opisujące kursy dla poszczególnych linii komunikacyjnych. Dla każdego elementu zbioru relacji w transporcie kolejowym JK podzbiór $Kj_{j\kappa}$ zawiera kursy $j\kappa$ -tej relacji w transporcie kolejowym. Natomiast dla każdego elementu zbioru linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy JA podzbiór $Aj_{j\alpha}$ zawiera kursy $j\alpha$ -tego kierunku jazdy. Dodatkowo zbiór ustalonych kursów w komunikacji miejskiej AU zawiera kursy linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy należących do zbioru ustalonych kierunków jazdy w komunikacji miejskiej JAU .

Proces zmiany środka transportu rozpatrywany jest w dysertacji w węźle przesiadkowym, który zajmuje centralne miejsce w pracy. Dla potrzeb synchronizacji rozkładów jazdy dostosowywanych do zgłaszanego zapotrzebowania na realizację podróży rozpatrywanych

w poszczególnych relacjach z uwzględnieniem obsługi obszaru oddziaływania węzła przez linie komunikacyjne i oddziaływania czynników o charakterze stochastycznym kluczowe elementy odwzorowano w modelu węzła przesiadkowego **WP**, który zapisano w postaci:

$$\mathbf{WP} = \langle \mathbf{JK}, \mathbf{JA}, \mathbf{K}, \mathbf{A}, \mathbf{SPK}, \mathbf{SPA}, \mathbf{P} \rangle \quad (3-7)$$

Czas oczekiwania pasażerów podczas zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym wynika z procesów ruchu środków transportu i pieszych rozpatrywanych w pracy. Realizacja podróży zależy od układu tras wpływających na liczbę linii komunikacyjnych zapewniających połączenie węzła przesiadkowego z segmentami i liczbę połączeń w transporcie kolejowym i kursów w komunikacji miejskiej, z których pasażerowie mogą skorzystać w realizacji podróży. Ruch pieszych rozpatrywany jest w węźle przesiadkowym pomiędzy peronami i stanowiskami przystankowymi, których układ przestrzenny w obszarze węzła przesiadkowego wpływa na cechy dróg przejścia, przede wszystkim długość przejścia. Różna wśród pieszych prędkość przejścia oraz różna liczba pasażerów przechodzących poszczególnymi drogami przejścia m.in. ze względu na zróżnicowane zapotrzebowanie na realizację podróży w poszczególnych relacjach i liczbę linii komunikacyjnych obsługujących poszczególne perony i stanowiska przystankowe wpływa na złożoność problematyki zgłoszeń na stanowiskach przystankowych w węźle pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus. Oczekiwanie na odjazd z węzła przesiadkowego w kursie zapewniającym połączenie z segmentem docelowym rozpoczyna się w pracy w momencie wejścia pasażera na stanowisko przystankowe.

3.3. Zapotrzebowanie na przewozy pasażerskie w obszarze oddziaływania węzła

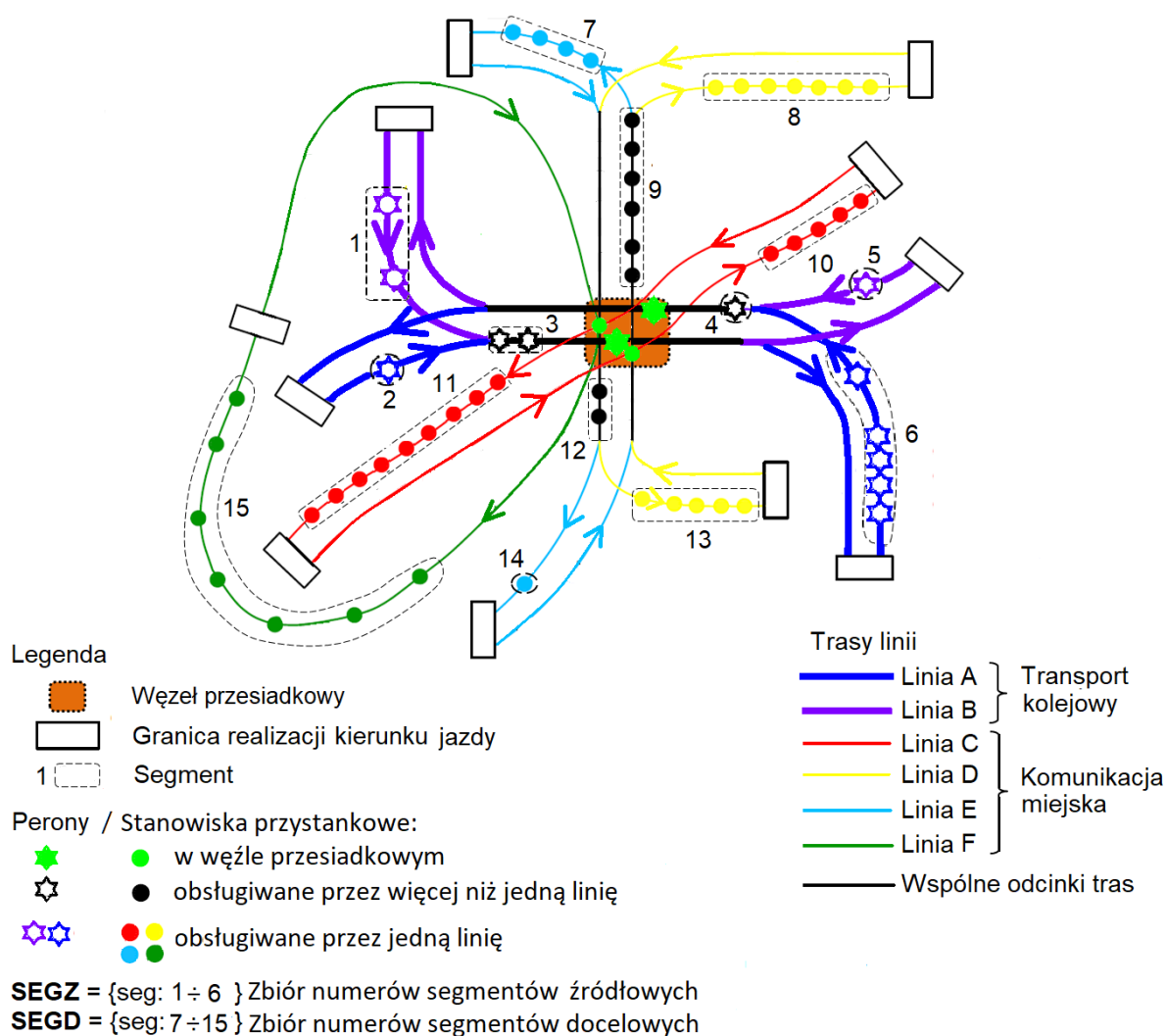
Dla potrzeb pracy odwzorowano w modelu **MWO** powiązania pomiędzy rozkładem jazdy, obsługą obszaru oddziaływania przez linie komunikacyjne i liczbą pasażerów przyjeżdżających i wyjeżdżających z węzła poszczególnymi pojazdami.

Zbiór numerów segmentów **SEG** oznaczono jako:

$$\mathbf{SEG} = \{1, \dots, seg, seg', \dots, |\mathbf{SEG}|\} \quad (3-8)$$

gdzie $|\mathbf{SEG}|$ oznacza liczebność zbioru **SEG**. W dysertacji zbiór numerów segmentów **SEG** został rozdzielony na dwa odrębne podzbiory tj. segmentów źródłowych **SEGZ** i segmentów docelowych **SEGD**.

Każdy segment identyfikowany jest na podstawie zbioru linii komunikacyjnych zapewniających połączenie danego segmentu z węźle przesiadkowym. Przyjęty w modelu **MWO** sposób odwzorowania cech rzeczywistego układu tras linii komunikacyjnych w postaci segmentów dla przykładowej sytuacji przedstawiono na rysunku 3.2. W przykładzie uwzględniono 6 linii komunikacyjnych i wyróżniono jedynie te perony i stanowiska przystankowe, które są rozpatrywane według podejścia przyjętego w rozprawie. Są to segmenty źródłowe w transporcie kolejowym i segmenty docelowe w komunikacji miejskiej.



Rys. 3.2. Przykład odwzorowania cech układu tras linii komunikacyjnych istotnych w proponowanej metodzie synchronizacji
Źródło: opracowanie własne

Przykładowy, schematyczny węzeł przesiadkowy przedstawiony na rysunku 3.2. jest obsługiwany przez 4 linie autobusowe w komunikacji miejskiej, w tym 3 linie wahadłowe o dwóch kierunkach jazdy (linie C-E) oraz jednej linii okrężnej (linia F). Na trasie każdej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy znajduje się jedno stanowisko przystankowe zlokalizowane w węźle przesiadkowym. Podobnie na trasie każdej z relacji w transporcie kolejowym obsługujących węzeł przesiadkowy występuje peron znajdujący się w węźle przesiadkowym. Trasy poszczególnych linii komunikacyjnych obejmują różną liczbę stanowisk przystankowych lub peronów. Dwie linie autobusowe, tj. okrężna (linia F) i wahadłowa (linia C) nie mają wspólnych odcinków tras z pozostałymi liniami komunikacyjnymi, zatem na trasach obu wskazanych linii występuje tylko po jednym segmencie docelowym. W przypadku pozostałych linii komunikacyjnych wyróżnia się fragmenty wspólne z innymi liniami (zaznaczone kolorem czarnym na rysunku 3.2. oraz wydzielone. W związku z tym segmenty związane są zarówno z pojedynczymi liniami jak i zbiorami linii i obejmują różną liczbę stanowisk przystankowych / peronów, determinowaną przez układ tras linii komunikacyjnych.

Dla potrzeb odwzorowania obsługi obszaru oddziaływania węzła przez linie komunikacyjne określone zostały w pracy dwie funkcje. Każda z funkcji odpowiada jednemu z dwóch rozpatrywanych środków transportu. Funkcje opisują zależności pomiędzy segmentami i liniami komunikacyjnymi identyfikując połączenia pomiędzy poszczególnymi segmentami a węzłem. Przyjęte funkcje stosowane są w pracy dla potrzeb szacowania czasu oczekiwania pasażerów podróżujących w poszczególnych relacjach. Funkcja $g1\kappa(seg, j\kappa) \in \{0,1\}$ przyjmuje wartość 1 gdy segment seg ma zapewnione połączenie z węzłem przesiadkowym poprzez $j\kappa$ -tą relację w transporcie kolejowym oraz wartość 0 w przeciwnym wypadku. Natomiast funkcja $g1\alpha(seg, j\alpha) \in \{0,1\}$ przyjmuje wartość 1 gdy segment seg ma zapewnione połączenie z węzłem przesiadkowym poprzez linię komunikacyjną w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w komunikacji miejskiej oraz wartość 0 w przeciwnym wypadku. Zbiór $SEgg1\kappa_{j\kappa}$ segmentów, które mają zapewnione połączenie z węzłem przesiadkowym poprzez $j\kappa$ -tą relację w transporcie kolejowym określono jako:

$$SEgg1\kappa_{j\kappa} = \{seg: g1\kappa(seg, j\kappa) = 1, seg \in SEG\}, j\kappa \in JK \quad (3-9)$$

Natomiast zbiór $SEgg1\alpha_{j\alpha}$ segmentów, które mają zapewnione połączenie z węzłem przesiadkowym poprzez linię autobusową w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w komunikacji miejskiej określono jako:

$$SEgg1\alpha_{j\alpha} = \{seg: g1\alpha(seg, j\alpha) = 1, seg \in SEG\}, j\alpha \in JA \quad (3-10)$$

Zbiór $JKg1\kappa_{seg}$ relacji w transporcie kolejowym zapewniających połączenie segmentu seg z węzłem przesiadkowym określono jako:

$$JKg1\kappa_{seg} = \{j\kappa: g1\kappa(seg, j\kappa) = 1, j\kappa \in JK\}, seg \in SEG \quad (3-11)$$

Natomiast zbiór $JAg1\alpha_{seg}$ linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy, które zapewniają połączenie segmentu seg z węzłem przesiadkowym określono jako:

$$JAg1\alpha_{seg} = \{j\alpha: g1\alpha(seg, j\alpha) = 1, j\alpha \in JA\}, seg \in SEG \quad (3-12)$$

Zbiór kursów w transporcie kolejowym $Kg1_{seg}$ i zbiór kursów w komunikacji miejskiej $Ag1_{seg}$ zapewniających połączenie węzła przesiadkowego odpowiednio z segmentem źródłowym seg i segmentem docelowym seg' określono jako:

$$\begin{aligned} Kg1_{seg} &= \{\kappa: g1\kappa(seg, j\kappa) = 1, \kappa \in Kj_{j\kappa}, j\kappa \in JK\}, seg \in SEGZ \\ Ag1_{seg} &= \{\alpha: g1\alpha(seg, j\alpha) = 1, \alpha \in Aj_{j\alpha}, j\alpha \in JA\}, seg \in SEG D \end{aligned} \quad (3-13)$$

Ponadto, dla potrzeb pracy zdefiniowano zbiór KZ_{seg} połączeń w transporcie kolejowym umożliwiających przyjazd do węzła przesiadkowego pasażerom realizującym podróż do segmentu docelowego seg

Dla potrzeb odwzorowania obsługi potoków pasażerów dla każdego kursu w transporcie kolejowym zdefiniowano zbiór $SEgg1\kappa_{\kappa}$ segmentów źródłowych, których połączenie z węzłem przesiadkowym jest zapewnione przez κ -ty kurs co zapisano w postaci:

$$SEgg1\kappa_{\kappa} = \{seg: g1\kappa(seg, j\kappa) = 1, j\kappa \in JK, seg \in SEGZ\}, \kappa \in Kj_{j\kappa} \quad (3-14)$$

W pracy rozpatrywane są tylko relacje podróży między parami segmentów, pomiędzy którymi nie ma zapewnionych bezpośrednich połączeń transportem zbiorowym. Realizacja podróży w tych relacjach wymaga zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym. W obszarze oddziaływania węzła określono zbiór numerów relacji podróży **REL** w postaci:

$$\mathbf{REL} = \{rel \equiv (seg, seg') : seg \in \mathbf{SEGZ}, seg' \in \mathbf{SEGD}\} \quad (3-15)$$

gdzie $|\mathbf{REL}|$ oznacza liczebność zbioru **REL** o interpretacji liczby relacji podróży w obszarze oddziaływania węzła rozpatrywanej w pracy. Przyjęto równoważne oznaczenie elementów zbioru relacji poprzez numer oraz parę segmentów definiujących miejsce początku i końca podróży. Dla potrzeb pracy każdej relacji podróży przyporządkowana została dokładnie jedna droga przejścia w węźle przesiadkowym. Oznacza to, że pasażerowie podróżujący w rel -tej relacji przemieszczają się w węźle przesiadkowym p -tą drogą przejścia co zapisano jako $p(rel)$.

Drogą przejścia mogą przemieszczać się pasażerowie realizujący podróże w różnych relacjach. Zatem dla potrzeb pracy dla każdej drogi przejścia zdefiniowano zbiór segmentów docelowych **SEGD** p , rozumianych jako segmenty seg , na które docierają pasażerowie, którzy w realizacji podróży ze zmianą środka transportu korzystają z drogi przejścia w węźle przesiadkowym $p(rel \equiv (seg', seg))$.

Zbiór numerów pasażerów zmieniających środek transportu **Π** w węźle przesiadkowym zdefiniowano w postaci:

$$\mathbf{\Pi} = \{1, \dots, \pi, \dots, |\mathbf{\Pi}|\} \quad (3-16)$$

gdzie $|\mathbf{\Pi}|$ oznacza liczebność zbioru **Π** i ma interpretację liczby pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z pociągu na autobus komunikacji miejskiej w okresie funkcjonowania węzła w ciągu doby. Każdy pasażer ma przypisaną określoną relację, w której realizuje podróż $rel(\pi)$.

W dysertacji rozpatrywane są potoki pasażerów w etapach podróży związanych z procesem zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym opisane w postaci zbiorów. W każdym etapie podróży rozpatrywane zbiory obejmują pasażerów zmieniających środek transportu i stanowią podzbiory zbioru **Π** . Zbiór pasażerów $\Phi\mathbf{1}_{rel,\kappa} \equiv \Phi\mathbf{1}_{(seg', seg),\kappa}$ identyfikuje pasażerów przemieszczających się w rel -tej relacji, (tj. pasażerów, dla których spełniony jest warunek $rel(\pi) = rel$) i którzy przyjechali do węzła przesiadkowego pociągiem w κ -tym połączeniu. Liczebność zbioru $\Phi\mathbf{1}_{rel,\kappa}$, oznaczona jako $|\Phi\mathbf{1}_{rel,\kappa}|$ ma interpretację liczby pasażerów przyjeżdżających do węzła κ -tym połączeniem kolejowym i realizujących podróż w rel -tej relacji.

Pasażerowie przyjeżdżający do węzła przesiadkowego pociągami w poszczególnych połączeniach mogą realizować podróż w różnych relacjach. Pozwala to wyróżnić zbiór $\Phi\mathbf{2}_{\kappa, seg}$ w postaci:

$$\Phi\mathbf{2}_{\kappa, seg} = \bigcup_{seg' \in \mathbf{SEGg1}\kappa_{\kappa}} \Phi\mathbf{1}_{(seg', seg),\kappa}, \kappa \in \mathbf{KZ}_{seg}, seg \in \mathbf{SEGD}, \quad (3-17)$$

obejmujący pasażerów, którzy dotarli do węzła przesiadkowego κ -tym połączeniem kolejowym i realizują podróż w relacji kończącej w segmencie docelowym seg , przy czym $|\Phi 2_{\kappa, seg}|$ oznacza liczebność zbioru $\Phi 2_{\kappa, seg}$ i ma interpretację liczby pasażerów opisanych danym zbiorem. Zbiór $\Phi 2_{\kappa, seg}$ stanowi jedyną daną wejściową opisującą w dysertacji wielkość potoku pasażerów. W pracy opis realizacji przemieszczeń z poszczególnych segmentów źródłowych do węzła przesiadkowego, został sprowadzony do określenia liczby pasażerów przyjeżdżających do węzła pociągami w poszczególnych połączeniach w transporcie kolejowym.

Macierz zawierająca zbiory $\Phi 2_{\kappa, seg}$ pasażerów przyjeżdżających poszczególnymi pociągami w połączeniach w transporcie kolejowym do węzła przesiadkowego w okresie funkcjonowania węzła i realizujących podróże w relacjach kończonych w poszczególnych segmentach docelowych określono w postaci:

$$\Phi 2 = [\Phi 2_{\kappa, seg} : \kappa \in \mathcal{K}, seg \in \mathcal{SEG D}] \quad (3-18)$$

W wyniku przeprowadzonej analizy zgłaszanego zapotrzebowania na przewozy pasażerskie w obszarze oddziaływania węzła i realizacji przewozów dla potrzeb opisu procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym kluczowe elementy odwzorowano w modelu $\mathbf{ZP}$ w postaci:

$$\mathbf{ZP} = \langle \mathcal{SEG}, \mathcal{REL}, \Pi \rangle \quad (3-19)$$

Podróże rozpatrywane w ujęciu potoku pasażerów dla potrzeb synchronizacji rozkładów jazdy charakteryzowane są przez zróżnicowanie w czasie liczby pasażerów odwzorowanych w zbiorze Π w poszczególnych relacjach podróży w zbiorze $\mathcal{REL}$. Podróże realizowane są w sieci transportu zbiorowego, której strukturę tras opisano za pomocą zbioru segmentów. Pary segmentów stanowią podstawę identyfikacji relacji podróży.

3.4. Model zależności czasowych

Zbiór numerów kolejnych jednostek czasu stanowiących podstawę opisu procesu zmiany środka transportu przez pasażerów w okresie funkcjonowania węzła określono w postaci:

$$\theta = \{1, \dots, \theta, \dots, |\theta|\} \quad (3-20)$$

gdzie $|\theta|$ oznacza liczebność zbioru θ i ma interpretację liczby jednostek czasu, które przyjęto w dobie do opisu procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym.

W modelu ruch środków transportu i pasażerów rozpatrywany jest w odniesieniu do zbioru jednostek czasu θ przyjętego dla węzła przesiadkowego. Zbiór jednostek czasu θ określono w celu odwzorowania zależności między rzeczywistymi momentami występowania poszczególnych zdarzeń dotyczących procesu zmiany środka transportu. Zbiór θ pozwala odwzorować w modelu upływ czasu i identyfikować następstwo czasowe w ruchu pojazdów i pieszych w węźle przesiadkowym poprzez jednoznaczne przyporządkowanie numerów jednostek czasu, w których:

- na tory przy peronach w węźle przyjeżdżają pociągi,
- autobusy komunikacji miejskiej odjeżdżają ze stanowisk przystankowych w węźle,

- pasażerowie zmieniający środek transportu wchodzą na stanowiska przystankowe w węźle.

Zbiór numerów jednostek czasu θ identyfikuje przedziały czasu o mniejszej długości niż jest to konieczne dla opisu planowanych momentów przyjazdów pociągów i odjazdów autobusów komunikacji miejskiej. Dla potrzeb odwzorowania rozkładu jazdy w modelu **MWO** określono funkcję $g_2(\theta) \in \{0,1\}$, która przyjmuje wartość 1, gdy w jednostce czasu θ mogą być planowane rozkładowe przyjazdy pociągów i odjazdy autobusów komunikacji miejskiej oraz 0 w przeciwnym wypadku. Podzbiór θY zawierający te elementy zbioru jednostek czasu θ , które są niezbędne do opisu rozkładu jazdy określono w postaci:

$$\theta Y = \{\theta: g_2(\theta) = 1, \theta \in \theta\} \quad (3-21)$$

Zbiór jednostek czasu θ a tym samym zbiór jednostek czasu związanych z rozkładem jazdy θY ma interpretację czasu przyjętego w modelu **MWO** do opisu ruchu pojazdów i pasażerów w węźle przesiadkowym. Liczebność zbioru jednostek czasu związanych z rozkładem jazdy θY jest dostosowana do opisu momentów realizacji pierwszego i ostatniego kursu i połączenia kolejowego zapewniających połączenie węzła z segmentami w okresie funkcjonowania węzła.

Na zbiorze kursów $\mathcal{K}$ zadana jest funkcja $\theta Y \mathcal{K}(\kappa) \in \theta Y$, która ma interpretację planowanego momentu przyjazdu pociągu w połączeniu kolejowym κ do węzła przesiadkowego. Natomiast na zbiorze kursów $\mathcal{A}$ zadana jest funkcja $\theta Y \mathcal{A}(\alpha) \in \theta Y$, która ma interpretację planowanego momentu odjazdu autobusu komunikacji miejskiej w kursie α ze stanowiska przystankowego w węźle przesiadkowym.

Rozkład jazdy w węźle przesiadkowym oznaczony jako $\theta Y J$ jednoznacznie identyfikuje planowane momenty przyjazdów wszystkich pociągów na tory przy peronach w węźle oraz zbiór planowanych momentów odjazdów wszystkich autobusów komunikacji miejskiej ze stanowisk przystankowych w węźle. Przez rozkład jazdy w węźle przesiadkowym rozumiana jest suma zbiorów wartości funkcji $\theta Y \mathcal{K}(\kappa)$ i $\theta Y \mathcal{A}(\alpha)$. Rozkład jazdy dla $j\kappa$ -tej relacji w transporcie kolejowym to zbiór wartości funkcji $\theta Y \mathcal{K}(\kappa)$ dla wszystkich elementów należących do zbioru $\mathcal{K} j_{\kappa}$. Natomiast rozkład jazdy dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy to zbiór wartości funkcji $\theta Y \mathcal{A}(\alpha)$ dla wszystkich elementów należących do zbioru $\mathcal{A} j_{\alpha}$ i oznaczony jako $\theta Y \mathcal{A} J(j\alpha)$.

Przypisanie kursów do zbiorów kursów dla linii komunikacyjnych w kierunku jazdy $\mathcal{A} j_{\alpha}$ jest jednoznaczne. Oznacza to, że każdy kurs należy tylko do jednego zbioru $\mathcal{A} j_{\alpha}$. W rozkładzie jazdy dla linii komunikacyjnej każdy kolejny kurs jest realizowany dopiero po odjeździe z węzła przesiadkowego środka transportu w kursie wcześniejszym. Oznacza to, że zbiór kursów dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy $\mathcal{A} j_{\alpha}$ spełnia wymagania sekwencji, determinowanej przez wskazaną funkcję $\theta Y \mathcal{A}(\alpha)$. Na tej podstawie przyjęto w pracy funkcję $N(\alpha) \in \mathbb{N}^+$, która dla każdego kursu w komunikacji miejskiej przyporządkowuje numer tego kursu w sekwencji kursów realizowanych dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy wyznaczony na podstawie momentu realizacji tego kursu w rozkładzie jazdy.

Dla potrzeb budowy modelu **MWO** rozkład jazdy w węźle przesiadkowym dla transportu kolejowego $\theta YJ\mathcal{K}$ określono jako zbiór planowanych momentów przyjazdów pociągów we wszystkich kursach dla połączeń kolejowych obsługujących węzeł przesiadkowy w postaci:

$$\theta YJ\mathcal{K} = \{\theta Y\mathcal{K}(\kappa), \kappa \in \mathcal{K}j_{j\kappa}, j\kappa \in J\mathcal{K}\} \quad (3-22)$$

Natomiast rozkład jazdy w komunikacji miejskiej $\theta YJ\mathcal{A}$ określono jako zbiór planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej we wszystkich kursach dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy i zapisano w postaci:

$$\theta YJ\mathcal{A} = \{\theta Y\mathcal{A}(\alpha), \alpha \in \mathcal{A}j_{j\alpha}, j\alpha \in J\mathcal{A}\} \quad (3-23)$$

W zbiorze $\theta YJ\mathcal{A}$ wyróżniono 2 podzbiory oznaczone jako $\theta YJ\widehat{\mathcal{A}}$ i $\theta YJ\widetilde{\mathcal{A}}$ obejmujące planowane momenty odjazdów autobusów w kursach wszystkich linii komunikacyjnych odpowiednio w modyfikowanych i niemodyfikowanych kierunkach jazdy.

Występujące w systemie transportowym zmiany liczby podróży realizowanych w poszczególnych relacjach powodują zróżnicowanie warunków ruchu w sieci transportowej. Transport zbiorowy jako część systemu transportowego służy zaspokajaniu potrzeb transportowych mieszkańców poprzez dostosowanie linii komunikacyjnych w zakresie układu tras, liczby linii i rozkładu jazdy oraz pozostaje podatny na zmienność warunków ruchu. Determinuje to zróżnicowanie procesu zmiany środka transportu przez pasażerów w ciągu całego okresu funkcjonowania węzła w skali doby. Odzworowane w pracy dobowe zmiany wybranych charakterystyk w węźle przesiadkowym są związane z ruchem środków transportu i pasażerów i obejmują:

- zmiany liczby podróży realizowanych w okresie funkcjonowania węzła w poszczególnych relacjach wynikające z realizacji różnorodnych aktywności i rozproszenia źródeł i celów podróży w obszarze oddziaływania węzła,
- zróżnicowanie liczby linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy, kursów i interwału międzykursowego w poszczególnych relacjach podróży uwzględniające zgłaszane zapotrzebowanie na realizację przewozów przy spełnieniu celów i ograniczeń formułowanych wobec transportu pasażerskiego związanego z węzłem przesiadkowym opisanym modelem **WP**,
- zróżnicowanie warunków ruchu środków transportu w sieci transportowej, której częścią jest węzeł przesiadkowy opisany modelem **WP** wraz z obszarem oddziaływania, powodujące występowanie odchyłek od rozkładu jazdy w transporcie zbiorowym,
- zróżnicowanie czasu przebycia dróg przejścia w węźle przesiadkowym powodowane zmienną intensywnością zgłoszeń pasażerów w określonych relacjach podróży oraz motywacją i terminowością⁴ realizacji podróży.

⁴ terminowość realizacji podróży związana jest z koniecznością dotarcia do celu podróży w ustalonym czasie, motywowaną istotnością skutków niedotrzymania ustalonego terminu. Podróże ściśle terminowe są to przede wszystkim podróże do szkoły i pracy.

W celu odwzorowania w modelu **MWO** wahań wartości wskazanych czynników w całym okresie funkcjonowania węzła przesiadkowego w skali doby wprowadzono pięć okresów tworzących zbiór okresów **O** w postaci:

$$\mathbf{O} = \{1, \dots, o, \dots, 5\} \quad (3-24)$$

Wprowadzony podział okresu funkcjonowania węzła determinuje postępowanie na każdym etapie proponowanej metody, w tym w zakresie grupowania i przetwarzania danych wejściowych. Podział odpowiada odwzorowaniu w modelu zróżnicowanym warunkom ruchu i funkcjonowaniem węzła przesiadkowego w systemie transportowym podczas szczytów komunikacyjnych jak i poza szczytami.

W ramach podziału okresu funkcjonowania węzła dla potrzeb pracy wskazywany jest okres bazowy dla każdej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy. **Okres bazowy** oznaczony symbolem o to okres, w którym przyjęte planowane momenty odjazdów autobusów dla linii komunikacyjnej w określonym kierunku jazdy warunkują dobór planowanych momentów odjazdów autobusów w pozostałych okresach o . Dla każdej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy wskazanie okresu bazowego spośród pięciu okresów dokonywane jest niezależnie od wartości wybranych dla innych linii komunikacyjnych. Szczyty komunikacyjne $02, 04$, okresy pozaszczytowe $01, 03, 05$ charakteryzują się różnymi warunkami ruchu, co zostało odwzorowane w modelu poprzez podział doby na okresy o . Przyjęcie granic określających momenty rozpoczęcia i zakończenia okresów pozwala opisać warunki ruchu występujące w poszczególnych okresach o . Przyjęto dla okresu o stałe wartości parametrów charakteryzujących warunki ruchu pojazdów komunikacji miejskiej i podróży w węźle przesiadkowym i jego obszarze oddziaływania dla potrzeb synchronizacji rozkładów jazdy. W celu odwzorowania w modelu **MWO** granic czasu trwania okresów opisanych charakterystykami zdefiniowano funkcje:

- $\theta b1(o) \in \theta Y$ o interpretacji momentu rozpoczęcia o -tego okresu,
- $\theta b2(o) \in \theta Y$ o interpretacji momentu zakończenia o -tego okresu.

Każdy kurs linii komunikacyjnej w kierunku jazdy jest jednoznacznie przypisany do jednego z pięciu okresów o . Determinuje to czas trwania okresów: pierwszego 01 i piątego 05 , w taki sposób, że okres pierwszy 01 zawiera wszystkie kursy realizowane przed momentem rozpoczęcia okresu drugiego 02 opisanym wartością funkcji $\theta b1(02)$, natomiast okres piąty 05 zawiera wszystkie kursy realizowane po zakończeniu czasu trwania okresu czwartego 04 , opisanego wartością funkcji $\theta b2(04)$.

Jedynie okresy skrajne, tj. okres pierwszy (01) i okres ostatni (05) dla poszczególnych linii komunikacyjnych cechują się różnym czasem trwania. Dlatego dla potrzeb pracy wprowadzono dodatkową funkcję $\theta b1j(01, j\alpha) \in \theta Y$ o interpretacji momentu rozpoczęcia okresu pierwszego 01 dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy. Wartości funkcji $\theta b1j(01, j\alpha)$ zależą od liczby kursów i interwału $h(j\alpha, o)$ opisujących poszczególne linie komunikacyjne w kierunkach jazdy. Moment rozpoczęcia okresu pierwszego 01 jest tożsamy z elementem zbioru momentów związanych z rozkładem jazdy θY o najmniejszej wartości, tj. $\theta b1(01) = \min_{\theta Y \in \theta Y} \{\theta Y\} = \min_{j\alpha \in J\mathcal{A}} \{\theta b1j(01, j\alpha)\}$.

Zbiory kursów dla linii komunikacyjnych w o -tym okresie w transporcie kolejowym $\mathcal{K}o_{jk,o}$ i komunikacji miejskiej $\mathcal{A}o_{j\alpha,o}$ zdefiniowano jako:

$$\mathcal{K}o_{jk,o} = \{\kappa: \theta Y\mathcal{K}(\kappa) \in [\theta b1(o); \theta b2(o)], \kappa \in \mathcal{K}j_{jk}\},$$

$$jk \in J\mathcal{K}, o \in \mathbf{O} \quad (3-25)$$

$$\mathcal{A}o_{j\alpha,o} = \{\alpha: \theta Y\mathcal{A}(\alpha) \in [\theta b1(o); \theta b2(o)], \alpha \in \mathcal{A}j_{j\alpha}\}, j\alpha \in J\mathcal{A}, o \in \mathbf{O}$$

przy czym $|\mathcal{K}o_{jk,o}|$ i $|\mathcal{A}o_{j\alpha,o}|$ oznaczają liczebność zbiorów odpowiednio $\mathcal{K}o_{jk,o}$ i $\mathcal{A}o_{j\alpha,o}$ i mają interpretację odpowiednio liczby połączeń dla jk -tej relacji w transporcie kolejowym w o -tym okresie i liczby kursów linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w o -tym okresie.

Zbiory połączeń w transporcie kolejowym $\mathcal{K}g7_{seg,o}$ i kursów w komunikacji miejskiej $\mathcal{A}g7_{seg',o}$ zapewniających w o -tym okresie połączenie węzła przesiadkowego odpowiednio z segmentem źródłowym seg i segmentem docelowym seg' zdefiniowano jako:

$$\mathcal{K}g7_{seg,o} = \{\kappa: \theta Y\mathcal{K}(\kappa) \in [\theta b1(o); \theta b2(o)], \kappa \in \mathcal{K}g7_{seg}\},$$

$$seg \in \mathbf{SEG}, o \in \mathbf{O} \quad (3-26)$$

$$\mathcal{A}g7_{seg',o} = \{\alpha: \theta Y\mathcal{A}(\alpha) \in [\theta b1(o); \theta b2(o)], \alpha \in \mathcal{A}g7_{seg'}\},$$

$$seg' \in \mathbf{SEG}, o \in \mathbf{O} \quad (3-27)$$

przy czym $|\mathcal{K}g7_{seg,o}|$ i $|\mathcal{A}g7_{seg',o}|$ oznaczają liczebność zbiorów odpowiednio $\mathcal{K}g7_{seg,o}$ i $\mathcal{A}g7_{seg',o}$ i mają interpretację odpowiednio liczby połączeń w transporcie kolejowym obsługujących podróże z segmentu źródłowego seg do węzła przesiadkowego w o -tym okresie i kursów w komunikacji miejskiej zapewniających połączenie węzła przesiadkowego z segmentem docelowym seg' w o -tym okresie.

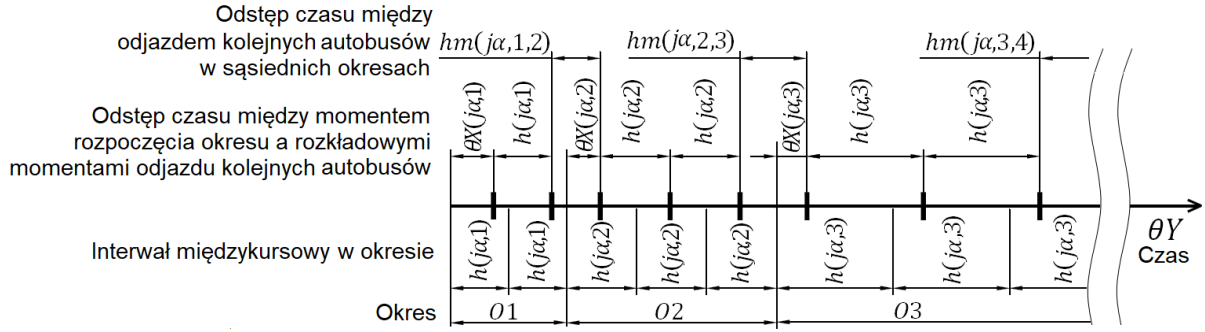
Dla potrzeb odwzorowania w rozprawie rozkładu jazdy:

- charakteryzującego się regularnością odjazdów dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w okresach o ,
- wynikającego z dopasowania ograniczonej liczby środków transportu do zgłaszanego zapotrzebowania na podróże i zmieniającego się w ciągu doby

przyjęto trzy parametry charakteryzujące linię komunikacyjną w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy. Są to:

- interwał międzykursowy w okresie $h(j\alpha, o)$,
- odstęp czasu między odjazdem ze stanowiska przystankowego w węźle przesiadkowym dwóch kolejnych autobusów w kursach realizowanych w sąsiednich okresach $hm(j\alpha, o, o')$,
- planowany moment odjazdu pierwszego autobusu komunikacji miejskiej $j\alpha$ -tego kierunku jazdy w o -tym okresie $\theta X(j\alpha, o)$.

Przyjęcie wartości dla wskazanych parametrów determinuje rozkład jazdy dla określonej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy. Przykład opisu rozkładu jazdy dla kierunku jazdy poprzez 3 przyjęte parametry przedstawiono na rysunku 3.3.



Legenda

■ - Rozkładowy moment odjazdu autobusu w kursie

Rys. 3.3. Przykład opisu rozkładu jazdy dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy z zastosowaniem parametrów przyjętych w pracy

Źródło: opracowanie własne

Przyjęcie w pracy wartości interwału $h(j\alpha, o)$ w okresie o i planowanego momentu realizacji pierwszego kursu w okresie o dla linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy jednoznacznie identyfikuje planowane momenty odjazdów autobusów w kolejnych kursach w tym okresie zgodnie z zależnością:

$$\begin{aligned} \theta Y\mathcal{A}(\alpha') &= \theta Y\mathcal{A}(\alpha) + h(j\alpha, o), \\ N(\alpha) + 1 &= N(\alpha'), \alpha, \alpha' \in \mathcal{A}o_{j\alpha, o}, j\alpha \in \widehat{\mathcal{JA}}, o \in \mathbf{O}, \end{aligned} \quad (3-28)$$

Interwał międzykursowy $h(j\alpha, o)$ określa odstęp czasu między planowanymi momentami odjazdów kolejnych autobusów komunikacji miejskiej w kursach dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy i realizowanych w ustalonym okresie o .

Zastosowany podział doby na okresy o i dobór wartości interwału międzykursowego dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w o -tym okresie $h(j\alpha, o)$ pozwala dostosować momenty odjazdów ze stanowisk przystankowych w węźle do zmiennej intensywności zgłoszeń pasażerów zmieniających środek transportu na stanowiskach przystankowych węźle. W tym zakresie poza zachowaniem zalet interwału $h(j\alpha, o)$ stałego w okresach dokonywany jest dobór odstępu czasu między planowymi momentami odjazdów dwóch kolejnych autobusów dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy $hm(j\alpha, o, o')$ określonego dla pary okresów o, o' jako:

$$\begin{aligned} hm(j\alpha, o, o') &= \theta Y\mathcal{A}(\alpha') - \theta Y\mathcal{A}(\alpha), \\ N(\alpha) + 1 &= N(\alpha'), \alpha \in \mathcal{A}o_{j\alpha, o}, \alpha' \in \mathcal{A}o_{j\alpha, o'}, o + 1 = o', o, o' \in \mathbf{O}, j\alpha \in \widehat{\mathcal{JA}} \end{aligned} \quad (3-29)$$

przy czym każdy z pary kursów realizowany jest w innym okresie.

Przyjęcie w o -tym okresie interwału $h(j\alpha, o)$ powoduje, że planowane momenty odjazdów ze stanowisk przystankowych w węźle autobusów komunikacji miejskiej we wszystkich kursach dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy są ściśle ze sobą powiązane. Wszystkie wartości planowanych momentów odjazdów autobusów $\theta Y\mathcal{A}(\alpha)$ związane są z jedną zmienną $\theta X(j\alpha, o)$ rozumianą jako:

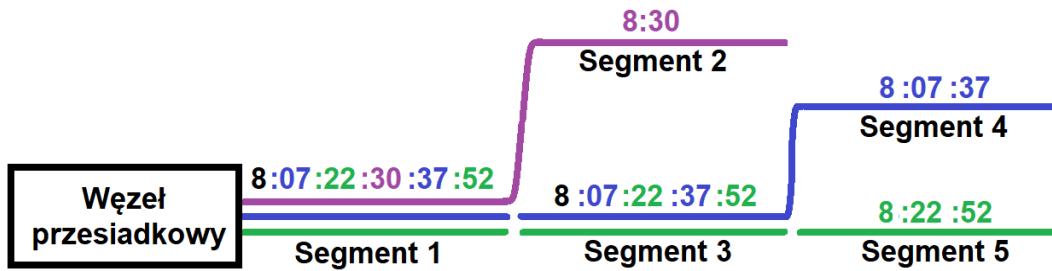
$$\theta X(j\alpha, o) = \begin{cases} \theta Y\mathcal{A}(\alpha) - \theta b1j(o, j\alpha), & \text{gdy } o = 01 \\ \theta Y\mathcal{A}(\alpha) - \theta b1(o), & \text{gdy } o = \{02, 03, 04, 05\} \end{cases} \quad (3-30)$$

$$\theta Y\mathcal{A}(\alpha) = \min_{\alpha' \in \mathcal{A}_{j\alpha, o}} \theta Y\mathcal{A}(\alpha'), o \in \mathbf{O}, j\alpha \in \widehat{J\mathcal{A}}$$

Zmienna $\theta X(j\alpha, o)$ ma interpretację planowanego momentu realizacji pierwszego kursu linii autobusowej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w o -tym okresie i przyjmuje wartości z zakresu $\theta X(j\alpha, o) \in [0; h(j\alpha, o)) \cap \theta X(j\alpha, o) \in \mathbb{N}$. Liczba elementów we wskazanym zakresie, tożsama z wartością interwału $h(j\alpha, o)$ w danym okresie definiuje liczbę możliwych konstrukcji rytmicznego rozkładu jazdy linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w o -tym okresie.

Dobór dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy pięciu wartości (tj. po jednej w każdym okresie o) zmiennej $\theta X(j\alpha, o)$ identyfikującej planowany moment realizacji pierwszego kursu w okresie o , przy zadanych wartościach interwału $h(j\alpha, o)$ w sposób jednoznaczny określa planowane momenty odjazdów wszystkich autobusów komunikacji miejskiej w kursach dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy $\mathcal{A}_{j\alpha}$, co zostało odwzorowane w sposób przykładowy na rysunku 3.3.

Czas oczekiwania wszystkich pasażerów zmieniających środek transportu z pociągów na autobusy komunikacji miejskiej w węźle przesiadkowym jest determinowany przez czas oczekiwania pasażerów przemieszczających się w poszczególnych relacjach podróży. Połączenie węzła przesiadkowego z każdym z segmentów zapewnia różną liczbę kursów. Wynika to zarówno z różnej liczby kursów przypisanych do poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy jak i z układu i wspólnych odcinków tras linii komunikacyjnych. Wpływ układu tras linii komunikacyjnych na częstotliwość obsługi połączenia węzła przesiadkowego z poszczególnymi segmentami docelowymi został dla przykładowej sytuacji przedstawiony na rysunku 3.4., (wartości liczbowe określają momenty odjazdów z węzła przesiadkowego autobusów w kursach zapewniających połączenie z poszczególnymi segmentami, tj. minuty realizacji kursów w wybranej godzinie).



Rys. 3.4. Przykład obszaru oddziaływania węzła przesiadkowego
Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 3.4. przedstawiono przykładowy obszar oddziaływania węzła przesiadkowego obejmujący 5 segmentów docelowych, obsługiwany przez trzy linie komunikacyjne w modyfikowanych kierunkach jazdy oznaczone różnymi kolorami o wspólnych fragmentach tras. Poszczególnym segmentom przypisano czas planowanych momentów odjazdów z węzła przesiadkowego pojazdów pomiędzy 8:00 a 9:00 i odpowiadające kursom, którymi można dojechać do poszczególnych segmentów.

Czas oczekiwania pasażerów realizujących podróż do określonego segmentu docelowego zależy od rozkładu jazdy wszystkich linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy zapewniających połączenie węzła przesiadkowego z danym segmentem. Natomiast rozkład jazdy wybranej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy wpływa na czas oczekiwania wszystkich pasażerów, podróżujących do każdego z segmentów docelowych, które zlokalizowane są na trasie danej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy.

W celu minimalizacji czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z pociągu na autobus w dysertacji modyfikowany jest rozkład jazdy w węźle. Jednocześnie zmiana rozkładu jazdy dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy powoduje zmiany odstępów czasu między planowanymi momentami odjazdów ze stanowisk przystankowych w węźle $\theta Y\mathcal{A}(\alpha)$ pojazdów w kursach α spełniających warunek:

$$\alpha \in \mathcal{Ag}1_{seg}, seg \in \mathcal{SEgg}1\alpha_{j\alpha} \quad (3-31)$$

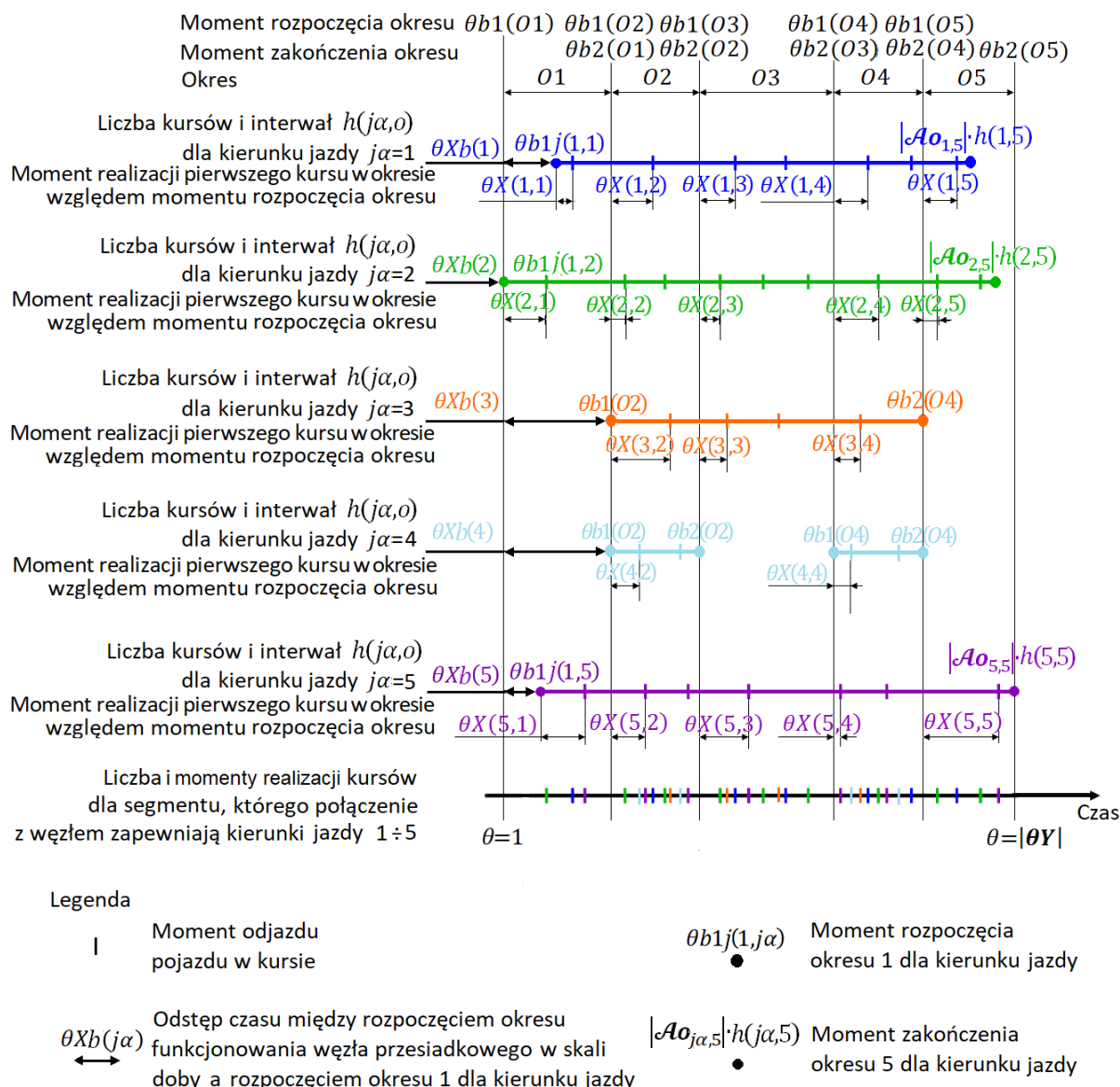
tj. dla wszystkich segmentów docelowych, których połączenie z węzłem zapewnia linia komunikacyjna w rozważanym $j\alpha$ -tym kierunku jazdy. Zmiany rozkładu jazdy dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy mogą wpływać na zmiany czasu oczekiwania pasażerów, którzy realizują podróż do dowolnego spośród segmentów $seg \in \mathcal{SEgg}1\alpha_{j\alpha}$ (segmentów obsługiwanych przez linię komunikacyjną w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy)

Formułowany w synchronizacji rozkładów jazdy dla linii komunikacyjnej postulat dopasowania w kolejnych okresach rytmicznego rozkładu jazdy do różnej wielkości zgłaszanego zapotrzebowania na realizację podróży sprawił, że nie każda kombinacja doboru planowanych momentów realizacji pierwszego kursu w okresie $\theta X(j\alpha, o)$ jest dopuszczalna. W pracy definiowane są alternatywne kryteria określające zasady równoczesnego doboru wartości zmiennych $\theta X(j\alpha, o)$ we wszystkich pięciu okresach odla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy. Przyjęcie określonego planowanego momentu realizacji pierwszego kursu linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w kolejnych okresach $\theta X(j\alpha, o)$ pozwala zapisać odstęp czasu między dwoma kolejnymi odjazdami ze stanowiska przystankowego w węźle autobusów w kursach, z których każdy realizowany jest w innym okresie $hm(j\alpha, o, o')$ w następującej postaci:

$$\begin{aligned} hm(j\alpha, o, o') &= h(j\alpha, o) - \theta X(j\alpha, o) + \theta X(j\alpha, o'), \\ o + 1 &= o', o, o' \in \mathbf{0}, j\alpha \in \widehat{\mathcal{A}} \end{aligned} \quad (3-32)$$

Dobór w pięciu okresach o wartości zmiennych $\theta X(j\alpha, o)$ dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w sposób jednoznaczny wiąże planowane momenty realizacji wszystkich kursów w ramach danej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy. Jednak dobrane dla zbioru linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy $\widehat{\mathcal{A}}$ zestawy pięciu wartości zmiennych $\theta X(j\alpha, o)$ nie są wystarczające, aby w sposób jednoznaczny opisać rozkład jazdy w węźle przesiadkowym. W celu wyrażenia planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej w przyjętych w modelu **MWO** jednostkach czasu związanych z opisem rozkładu jazdy θY należy dodatkowo uwzględnić momenty rozpoczęcia okresu pierwszego dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy $\theta b1j(O1, j\alpha)$. Związki między poszczególnymi zmiennymi i funkcjami zastosowanymi w opisie rozkładów jazdy

dla przykładowej sytuacji wspólnej obsługi jednego segmentu przez pięć linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy przedstawiono na rysunku 3.5.



Rys. 3.5. Graficzna reprezentacja zależności między momentami odjazdów autobusów w kursach dla pięciu linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy a obsługą połączenia węzła z segmentem dla przykładowej sytuacji

Źródło: opracowanie własne

Czas trwania całkowitego okresu funkcjonowania węzła przesiadkowego w skali doby determinowany jest przez okres doby, w którym funkcjonują linie komunikacyjne obsługujące węzeł przesiadkowy. Dla przykładu przedstawionego na rysunku 3.5.:

- rozpoczęcie okresu funkcjonowania węzła w skali doby determinowane jest przez linię komunikacyjną w kierunku jazdy nr 2,
- zakończenie okresu funkcjonowania w skali doby wynika z parametrów rozkładu jazdy dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy nr 5.

Linie komunikacyjne w kierunkach jazdy nr 1, 2 i 5 funkcjonują we wszystkich pięciu okresach. Natomiast linie komunikacyjne w kierunkach jazdy, które nie funkcjonują w przynajmniej jednym z okresów skrajnych planowane są od momentu rozpoczęcia okresu, w którym realizowany jest pierwszy kurs danej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy. Granice czasu trwania okresów dla linii komunikacyjnych są wartościami przyjętymi w modelu **MWO** dla węzła przesiadkowego. Linia komunikacyjna w kierunku jazdy nr 3 funkcjonuje tylko w okresach od 2 do 4, natomiast linia komunikacyjna w kierunku jazdy nr 4 stanowi jedynie uzupełnienie pozostałych linii komunikacyjnych dla potrzeb obsługi największego potoku pasażerów w okresach szczytów 02 i 04.

Aby wyrazić planowane momenty odjazdów autobusów komunikacji miejskiej w kursach dla wszystkich linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy poprzez elementy zbioru momentów czasu związanych z rozkładem jazdy θY wprowadzono dodatkową zmienną $\theta Xb(j\alpha)$ w postaci:

$$\theta Xb(j\alpha) = \theta b1j(01, j\alpha) - \theta b1(01), j\alpha \in \widehat{JA} \quad (3-33)$$

która przyjmuje stałą wartość dla każdej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy i określa odstęp czasu między momentem rozpoczęcia okresu pierwszego 01 a momentem rozpoczęcia okresu pierwszego dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy $\theta b1j(01, j\alpha)$. Przykład zastosowania zmiennej $\theta Xb(j\alpha)$ do opisu rozkładu jazdy dla kilku linii komunikacyjnych zapewniających wspólnie połączenie węzła przesiadkowego z segmentem przedstawiono na rysunku 3.5.

Liczba kursów i odstępy czasu między realizacją kolejnych kursów umożliwiających przemieszczenia między węzłem przesiadkowym a segmentem są wypadkową liczby kursów i interwału $h(j\alpha, o)$ charakteryzujących poszczególne linie komunikacyjne w kierunkach jazdy, zapewniających dane połączenie. W proponowanym podejściu założono, że pasażer w realizacji przemieszczenia między węzłem a segmentem docelowym korzysta z dowolnej linii komunikacyjnej zapewniającej to połączenie. W tym zakresie pasażer wsiada do pierwszego autobusu w kursie, którego odjazd ze stanowiska przystankowego w węźle następuje nie wcześniej niż moment wejścia pasażera na stanowisko przystankowe. Czas oczekiwania pasażera zależy od rozkładu jazdy linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy i wynikowego odstępu czasu między momentami odjazdów kolejnych autobusów w kursach zapewniających połączenie węzła przesiadkowego z segmentem docelowym.

Planowany moment odjazdu autobusu w kursie dla linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy wyrażony w jednostkach czasu związanych z rozkładem jazdy θY jest równy sumie wartości następujących elementów opisanych w modelu **MWO**:

- odstępu czasu między rozpoczęciem okresu 01 dla węzła $\theta b1(01)$ a rozpoczęciem okresu 01 dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy $\theta b1j(01, j\alpha)$ (oznaczonego jako $\theta Xb(j\alpha)$),
- sumy czasu trwania wszystkich okresów wcześniejszych niż rozpatrywany okres $o \sum_{o'=1}^{o-1} |\mathcal{A}o_{j\alpha, o'}| \cdot h(j\alpha, o')$,
- momentu realizacji pierwszego kursu linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w o -tym okresie $\theta X(j\alpha, o)$,

- iloczynu liczby kursów poprzedzających badany kurs w bieżącym okresie i interwału $h(j\alpha, o)$ w bieżącym okresie $(N(\alpha) - 1 - \sum_{o'=1}^{o-1} |\mathcal{A}o_{j\alpha, o'}|) \cdot h(j\alpha, o)$.

i dany jest wzorem:

$$\begin{aligned} \theta Y\mathcal{A}(\alpha) = \theta Xb(j\alpha) + \sum_{o'=1}^{o-1} |\mathcal{A}o_{j\alpha, o'}| \cdot h(j\alpha, o') + \theta X(j\alpha, o) \\ + \left(N(\alpha) - 1 - \sum_{o'=1}^{o-1} |\mathcal{A}o_{j\alpha, o'}| \right) \cdot h(j\alpha, o), \end{aligned} \quad (3-34)$$

$$\alpha \in \mathcal{A}o_{j\alpha, o}, j\alpha \in \widehat{JA}, o, o' \in \mathbf{O}$$

W pracy przyjęto związki między wybranymi zmiennymi a rozkładem jazdy linii komunikacyjnej w kierunku jazdy. Oznacza to, że na podstawie wartości zmiennych $\theta X(j\alpha, o)$ i $\theta Xb(j\alpha)$ możliwe jest określenie planowanych momentów odjazdów wszystkich autobusów w kursach dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy. Dlatego przyjęto w pracy wektor $\theta X(j\alpha)$ w postaci:

$$\begin{aligned} \theta X(j\alpha) \\ = \langle \theta Xb(j\alpha), \theta X(j\alpha, 01), \theta X(j\alpha, 02), \theta X(j\alpha, 03), \theta X(j\alpha, 04), \theta X(j\alpha, 05) \rangle, \end{aligned} \quad (3-35)$$

$$j\alpha \in \widehat{JA}$$

zawierający odstęp czasu między momentem rozpoczęcia okresu pierwszego, przyjętym dla węzła przesiadkowego a momentem rozpoczęcia tego okresu dla rozpatrywanej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy $\theta Xb(j\alpha)$ oraz pięciu wartości zmiennych $\theta X(j\alpha, o)$ określających momenty realizacji pierwszego kursu linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w o -tym okresie dla kolejnych okresów.

Na podstawie analizy obsługi węzła przesiadkowego przez transport zbiorowy zrealizowanej w niniejszym podrozdziale dla potrzeb synchronizacji rozkładów jazdy przyjęto w dysertacji model zależności czasowych obejmujący zbiór jednostek czasu i zbiór charakterystyk czasowych opisujących elementy modelu węzła przesiadkowego i jego otoczenia **MWO**. Strukturę modelu zależności czasowych zapisano w postaci:

$$T = \langle \theta, ft \rangle \quad (3-36)$$

gdzie:

- θ – zbiór numerów kolejnych jednostek czasu stanowiących podstawę opisu procesu zmiany środka transportu przez pasażerów w okresie funkcjonowania węzła,
- ft – zbiór funkcji określających momenty obsługi węzła przesiadkowego przez środki transportu zbiorowego oraz momenty wystąpienia zdarzeń związanych z realizacją procesu zmiany środka transportu i istotnych w zakresie budowy rozkładu jazdy. Zależności czasowe stanowią podstawę charakterystyki funkcjonowania komunikacji miejskiej w poszczególnych okresach o i identyfikacji zależności pomiędzy kursami poszczególnych linii komunikacyjnych realizowanych w kolejnych okresach o . Przyjęty zbiór funkcji stanowi podstawę szacowania czasu trwania realizacji poszczególnych etapów podróży dla poszczególnych pasażerów i charakteryzujących wybrane elementy modelu węzła przesiadkowego i jego otoczenia **MWO**.

3.5. Czynniki o charakterze stochastycznym w ruchu środków transportu i pasażerów

W praktyce czas oczekiwania pasażera podczas zmiany środka transportu zależy nie tylko od rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym, ale również od czynników o charakterze stochastycznym, spośród których w pracy rozpatrywano następujące trzy:

- odchyłki od planowanych momentów przyjazdów pociągów na tory przy peronach w węźle przesiadkowym,
- zróżnicowanie czasu przebycia drogi przejścia przez różnych pasażerów,
- odchyłki od planowanych momentów odjazdów ze stanowisk przystankowych w węźle przesiadkowym autobusów komunikacji miejskiej.

Proces zmiany środka transportu przez pasażerów jest w pracy rozpatrywany w ujęciu stochastycznym dla potoków pasażerów. Przyjęto zatem, że proces ten jest charakteryzowany poprzez zbiór pojedynczych realizacji, stanowiąc podstawę wyznaczenia czasów oczekiwania poszczególnych pasażerów i średniego czasu oczekiwania w węźle przesiadkowym odniesionego do jednego pasażera, charakteryzujących się dyspersją ze względu na ujęcie stochastyczne. Na rozłożenie macierzy potoków pasażerów w węźle przesiadkowym na kursy wpływa losowość w procesach ruchu środków transportu i pasażerów. Zbiór **ZS** pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu dla węzła przesiadkowego zapisano w postaci:

$$\mathbf{ZS} = \{1, \dots, zs, \dots, |\mathbf{ZS}|\} \quad (3-37)$$

gdzie $|\mathbf{ZS}|$ oznacza liczebność zbioru **ZS** i ma interpretację liczby pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu stosowanych do oceny rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym. Dla każdego elementu zbioru **ZS** wyznaczana jest w modelu **MWO** niezależna wartość wybranych charakterystyk opisujących proces zmiany środka transportu. Przyjęte w rozprawie podejście pozwala na odwzorowanie losowości w modelu **MWO**.

Pojedyncza realizacja procesu zmiany środka transportu opisuje:

- ruch pojazdów w kursach zapewniających połączenie segmentów z węzłem przesiadkowym,
- pieszych zmieniających środek transportu w okresie funkcjonowania węzła.

Pojedyncza realizacja procesu zmiany środka transportu zawiera informacje o rzeczywistych momentach przyjazdów pociągów i odjazdów autobusów komunikacji miejskiej oraz momentach wejścia poszczególnych pasażerów na stanowiska przystankowe rozpoczynających oczekiwanie na odjazd z węzła.

W pracy odchyłka od rozkładu jazdy traktowana jest jako niezależna zmienna losowa, wpływająca na czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym oraz niedająca się opisać i uwzględnić w sposób deterministyczny w rozkładzie jazdy. Określone dla każdego z elementów zs zbioru **ZS** odchyłki od planowanych momentów:

- przyjazdów pociągów w połączeniach $\kappa \in \mathcal{K}$ w transporcie kolejowym oznaczone jako $td\mathcal{K}(\kappa, zs)$,

- odjazdów autobusów w kursach $\alpha \in \mathcal{A}$ w komunikacji miejskiej oznaczone jako $td\mathcal{A}(\alpha, zs)$

zostały opisane rozkładami prawdopodobieństwa. W dysertacji przyjęto różne rozkłady prawdopodobieństwa dla wyróżnionych podsystemów transportu. W każdym okresie o dla każdej linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy i $j\kappa$ -tej relacji w transporcie kolejowym przyjęto niezależne wartości parametrów rozkładu prawdopodobieństwa. Rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągu w kursie dla $j\kappa$ -tej relacji w transporcie kolejowym w o -tym okresie został oznaczony jako $\mathcal{Popp}(j\kappa, o)$, natomiast rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłki od planowanego momentu odjazdu autobusu komunikacji miejskiej w kursie jako $\mathcal{Popo}(j\alpha, o)$.

W kursach i połączeniach kolejowych realizowanych w o -tym okresie i należących do poszczególnych linii komunikacyjnych odchyłki od rozkładu jazdy przydzielane są niezależnie na podstawie rozkładu prawdopodobieństwa o określonych wartościach parametrów zgodnie ze wzorami:

$$\forall \kappa \in \mathcal{K}_{j\kappa, o} \quad td\mathcal{K}(\kappa, zs) \sim \mathcal{Popp}(j\kappa, o): o \in \mathbf{O}, j\kappa \in \mathbf{JK}, zs \in \mathbf{ZS} \quad (3-38)$$

$$\forall \alpha \in \mathcal{A}_{j\alpha, o} \quad td\mathcal{A}(\alpha, zs) \sim \mathcal{Popo}(j\alpha, o): o \in \mathbf{O}, j\alpha \in \mathbf{JA}, zs \in \mathbf{ZS} \quad (3-39)$$

Wartości parametrów charakteryzują rozkłady prawdopodobieństwa $\mathcal{Popp}(j\kappa, o)$ i $\mathcal{Popo}(j\alpha, o)$. Rzeczywiste momenty przyjazdów pociągów w kursach na tory przy peronach w węźle $\theta\mathcal{K}(\kappa, zs)$ oraz odjazdów autobusów ze stanowisk przystankowych w węźle w kursach $\theta\mathcal{A}(\alpha, zs)$ wyznaczono na podstawie zależności:

$$\theta\mathcal{K}(\kappa, zs) = \theta Y\mathcal{K}(\kappa) + td\mathcal{K}(\kappa, zs) \wedge \theta\mathcal{K}(\kappa) \in \boldsymbol{\theta}, \kappa \in \mathbf{K}, zs \in \mathbf{ZS} \quad (3-40)$$

$$\theta\mathcal{A}(\alpha, zs) = \theta Y\mathcal{A}(\alpha) + td\mathcal{A}(\alpha, zs) \wedge \theta\mathcal{A}(\alpha) \in \boldsymbol{\theta}, \alpha \in \mathbf{A}, zs \in \mathbf{ZS} \quad (3-41)$$

Dla zbiorów pasażerów zróżnicowany czas przebycia p -tej drogi przejścia wpływa na rozłożenie macierzy pasażerów pomiędzy kursy, którymi będą kontynuowane podróże. W pracy przyjęto jeden typ rozkładu prawdopodobieństwa do opisu dyspersji czasu przebycia dróg przejścia przez poszczególnych pasażerów. Zastosowano niezależne wartości parametrów dla każdej drogi przejścia p w poszczególnych okresach o . Rozkład prawdopodobieństwa czasu przebycia w okresie o , p -tej drogi przejścia w węźle przesiadkowym odpowiadającej rel -tej relacji podróży został oznaczony jako $\mathcal{Ptp}(p, o)$ i stanowił podstawę przypisania czasu przejścia w węźle przesiadkowym każdemu pasażerowi, który w ramach realizowanej podróży dociera do węzła w okresie o i przemieszcza się p -tą drogą przejścia co zapisano w postaci:

$$\begin{aligned} \forall \pi \in \Phi_{\kappa, seg} \quad tp(\pi, zs) &\sim \mathcal{Ptp}(p, o): \\ p(rel \equiv (seg', seg)) &= \\ p \wedge \theta Y\mathcal{K}(\kappa) \in [\theta b1(o); \theta b2(o)], \kappa &\in \mathcal{KZ}_{seg} \cap \mathcal{Kg}1_{seg'}, \\ \pi \in \Pi, zs \in \mathbf{ZS}, seg' \in \mathbf{SEGZ}, seg \in \mathbf{SEGD}, p \in \mathbf{P}, o \in \mathbf{O} \end{aligned} \quad (3-42)$$

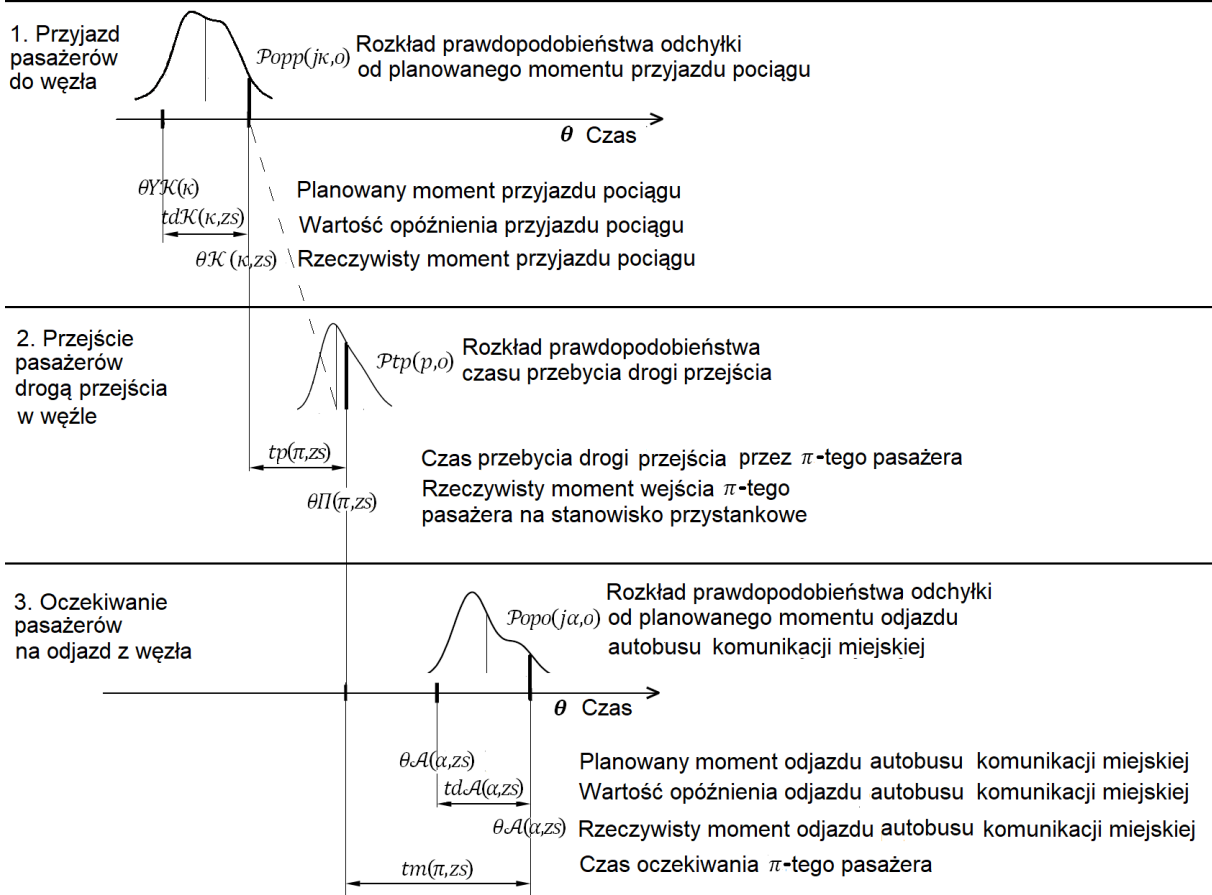
przy czym każdemu pasażerowi przypisuje się niezależnie czas przebycia drogi przejścia $tp(\pi, zs)$ wylosowane na podstawie przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa. Rzeczywiste momenty wejścia na stanowiska przystankowe w węźle pasażerów zmieniających środek

transportu $\theta\pi(\pi, zs)$ dla pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu wyznaczono na podstawie zależności:

$$\theta\pi(\pi, zs) = \theta\mathcal{K}(\kappa, zs) + tp(\pi, zs) \wedge \theta\pi(\pi, zs) \in \theta, \quad \pi \in \Pi, \kappa \in \mathcal{K}, zs \in \mathcal{ZS} \quad (3-43)$$

Przykład przyjętego w rozprawie sposobu odwzorowania pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym w ujęciu stochastycznym dla pojedynczego pasażera przedstawiono na rysunku 3.6. Schemat odwzorowuje fragment danych zawarty w pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu dla potoków pasażerów w węźle przesiadkowym $zs \in \mathcal{ZS}$.

Rozpatrywane w pracy etapy realizacji podróży związane z procesem zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym



Rys. 3.6. Charakterystyka procesu zmiany środka transportu w ujęciu stochastycznym dla pojedynczego pasażera dla przykładowej sytuacji opisującej wyniki badań własnych

Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 3.6. dla wybranego pasażera odwzorowano zależności czasowe w realizowanych w węźle etapach podróży i opisane dla pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu. Na osi czasu przedstawiono planowane i rzeczywiste momenty wystąpienia zdarzeń istotne w opisie procesu zmiany środka transportu w węźle. Pociąg przyjechał na tor przy peronie w węźle z opóźnieniem względem rozkładu jazdy. Zmiana środka transportu w węźle wiązało się dla pasażera z przebyciem drogi przejścia i oczekiwaniem na odjazd

autobusem komunikacji miejskiej ze stanowiska przystankowego znajdującego się w węźle przesiadkowym. Odjazd nastąpił z opóźnieniem względem rozkładu jazdy.

Analiza wpływu uwzględnienia czynników o charakterze stochastycznym podczas synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym na czas oczekiwania pasażerów podczas zmiany środka transportu stanowi kluczowy element rozprawy. W związku z tym w przyjętym pracy modelu opisującym czynniki o charakterze stochastycznym **DR**, który zapisano w postaci:

$$\mathbf{DR} = \langle \mathbf{ZS}, \theta\mathbf{\Pi}(\pi, zs), \theta\mathcal{A}(\alpha, zs) \rangle \quad (3-44)$$

uwzględniono zróżnicowane wartości charakterystyk związanych z realizacją przewozów i przemieszczeń w węźle pomiędzy pojedynczymi realizacjami procesu zmiany środka transportu rozpatrywanym dla potoków w ujęciu stochastycznym odwzorowanymi w zbiorze **ZS**. Zróżnicowane ze względu na oddziaływanie czynników o charakterze stochastycznym rzeczywiste momenty wejścia pasażerów na stanowiska przystankowe w węźle i zależne ponadto od rozkładu jazdy rzeczywiste momenty odjazdu autobusów komunikacji miejskiej z stanowisk przystankowych w węźle stanowiły podstawę doboru rozkładu jazdy w komunikacji miejskiej zorientowanego na minimalizację czasu oczekiwania pasażerów podczas zmiany środka transportu.

3.6. Rozłożenie czasowe macierzy potoków pasażerów w węźle przesiadkowym

Wspólna analiza zasobów dostępnych w węźle opisanym modelem **WP** oraz zgłaszanego zapotrzebowania na podróż ze zmianą środka transportu w węźle przesiadkowym i realizacji przewozów **ZP** pozwala podejmować decyzje dotyczące wyboru rozkładu jazdy dla linii związanych z węźlem. Optymalne rozłożenie macierzy potoków ruchu na kursy w węźle przesiadkowym **Φ** jest wynikiem rozwiązywania zadania optymalizacyjnego, spełniającego zdefiniowane ograniczenia, dla przyjętego kryterium oceny rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym. Na funkcjonowanie węzła przesiadkowego wpływają także czynniki o charakterze stochastycznym **DP**, powodujące rozbieżności między planowaną i rzeczywistą realizacją procesu zmiany środka transportu.

Dla potrzeb opisu procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym w ujęciu stochastycznym dla potoków pasażerów związki między rozkładem jazdy, zmiennymi losowymi a rzeczywistymi momentami przyjazdów pociągów na tory przy peronach i odjazdów autobusów komunikacji miejskiej ze stanowisk przystankowych zapisano w postaci:

$$\begin{aligned} tm(\pi, zs) &= \theta\mathcal{A}(\alpha^*(\pi, zs), zs) - \theta\mathbf{\Pi}(\pi, zs) \wedge tm(\pi, zs) \in \mathbb{N}, \\ \alpha^*(\pi, zs) &= \min_{\alpha \in \mathbf{Ag}_{seg}^7} \{ \theta\mathcal{A}(\alpha, zs) : \\ \theta\mathcal{A}(\alpha, zs) &\geq \theta\mathbf{\Pi}(\pi, zs) \wedge rel(\pi) = rel \equiv (seg', seg) \}, \\ seg' &\in \mathbf{SEGZ}, seg \in \mathbf{SEGD}, zs \in \mathbf{ZS}, \pi \in \mathbf{\Pi} \end{aligned} \quad (3-45)$$

Realizowana w pracy synchronizacja rozkładów jazdy koncentruje się na analizie zależności między rzeczywistymi momentami odjazdów autobusów komunikacji miejskiej $\theta\mathcal{A}(\alpha, zs)$ i momentami wejścia pasażerów na stanowiska przystankowe, na których rozpoczynają oczekiwanie na kontynuowanie podróży $\theta\mathbf{\Pi}(\pi, zs)$ dla każdej pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu zs . Kluczowe w przyjętym podejściu są trzy zdefiniowane zbiory:

1. kursów dla linii komunikacji miejskiej obsługujących węzeł przesiadkowy $\mathcal{A}$,
2. pasażerów zmieniających środek transportu Π ,
3. segmentów docelowych, których połączenie z węzłem zapewnia linia komunikacyjna w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy $SEg1\alpha_{j\alpha}$ wraz z powiązаныmi atrybutami.

Ważna jest również identyfikacja pasażerów wchodzących w skład poszczególnych zbiorów pasażerów przyjeżdżających do węzła przesiadkowego pociągami w poszczególnych połączeniach i przemieszczających się do poszczególnych segmentów docelowych $\Phi2_{\kappa,seg}$, czyli przyporządkowanie pasażerów do zbioru i relacji podróży. Wskazane zbiory wiążą się z czasem oczekiwania pasażerów w węźle przesiadkowym podczas zmiany środka transportu. Oznacza to, że na czas oczekiwania pasażerów wpływa rozkład jazdy wszystkich linii komunikacyjnych zapewniających połączenie węzła z segmentem docelowym.

W przyjętym modelu **MWO** pasażerowie minimalizują czas spędzony w węźle przesiadkowym i akceptują wszystkie linie komunikacyjne w kierunkach jazdy, którymi mogą dotrzeć do miejsca docelowego podróży. Pasażerowie wsiadają do pierwszego autobusu w kursie $\alpha^*(\pi, zs) \in \mathcal{A}$, zapewniającego połączenie węzła przesiadkowego z segmentem docelowym seg , którego rzeczywisty moment odjazdu z węzła następuje nie wcześniej niż moment wejścia pasażerów na stanowisko przystankowe.

Zbiór $\Phi3_{seg,\alpha,zs}$ obejmuje pasażerów, którzy odjeżdżają z węzła autobusem komunikacji miejskiej w α -tym kursie zapewniającym połączenie węzła z segmentem docelowym w postaci:

$$\begin{aligned} \Phi3_{seg,\alpha} &= \{\pi: \theta Y\mathcal{A}(\alpha', zs) < \theta \Pi(\pi, zs) \leq \theta Y\mathcal{A}(\alpha, zs) \wedge rel(\pi) \\ &= (seg', seg), \}, \\ \theta Y\mathcal{A}(\alpha, zs) - \theta Y\mathcal{A}(\alpha', zs) &\rightarrow \min \wedge \theta Y\mathcal{A}(\alpha, zs) > \theta Y\mathcal{A}(\alpha', zs), \\ \pi &\in \Pi, \alpha, \alpha' \in \mathcal{Ag}1_{seg}, seg' \in \mathbf{SEGZ}, seg \in \mathbf{EGD}, zs \in \mathbf{ZS} \end{aligned} \quad (3-46)$$

gdzie $\Phi3_{seg,\alpha,zs}$ oznacza liczebność zbioru $\Phi3_{seg,\alpha,zs}$ i ma interpretację liczby pasażerów odjeżdżających z węzła pasażerów autobusem komunikacji miejskiej w α -tym kursie zapewniającym połączenie węzła z segmentem docelowym seg .

Ponieważ rozłożenie macierzy potoków pasażerów pomiędzy poszczególne kursy dla linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy jest wynikiem wzajemnego oddziaływania wszystkich pozostałych, omówionych wcześniej w niniejszym rozdziale elementów wpływających na funkcjonowanie węzła przesiadkowego, dany model Φ zapisano w postaci:

$$\Phi = \langle \Phi3_{seg,\alpha,zs}, \theta \mathcal{A}(\alpha^*(\pi, zs), zs), tm(\pi, zs) \rangle \quad (3-47)$$

Rozłożenie czasowe macierzy potoków pasażerów przyjeżdżających do węzła przesiadkowego pociągami w połączeniach kolejowych i realizujących podróż ze zmianą środka transportu w określonych relacjach odwzorowuje liczbę pasażerów, którzy opuszczają węzeł poszczególnymi autobusami w kursach dla linii komunikacyjnych zapewniających połączenia poszczególnych segmentów docelowych z węzłem przesiadkowym. Rozłożenie macierzy potoków pasażerów zależy od rozkładu jazdy i oddziaływania czynników o charakterze stochastycznym, dlatego jest różne w pojedynczych realizacjach procesu zmiany środka transportu w ujęciu potoku pasażerów. Podczas synchronizacji rozkładów jazdy każda zmiana rozkładu jazdy wymaga określenia zmian w rozłożeniu czasowym macierzy potoków pasażerów wpływającym na czas oczekiwania pasażerów podczas zmiany środka transportu.

4. Zadanie optymalizacyjne synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym

4.1. Założenia do budowy zadania optymalizacyjnego

Przedmiotem pracy jest opracowanie metody synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym umożliwiającej minimalizację średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągów na autobusy komunikacji miejskiej. Dla potrzeb problemu podejmowanego w rozprawie skonstruowano zadanie optymalizacyjne, którego podstawą jest model węzła przesiadkowego i jego otoczenia przedstawiony w rozdziale 3. W celu jednoznacznego zdefiniowania zadania optymalizacyjnego, zakresu badań oraz organizacji i warunków funkcjonowania węzła przesiadkowego oraz obsługujących go linii komunikacyjnych przyjęto następujące założenia definiujące ruch pojazdów i pieszych w węźle przesiadkowym:

- 1) Podstawę kształtowania transportu zbiorowego stanowi transport kolejowy, do którego organizacyjnie i przestrzennie dostosowywane są przewozy realizowane w ramach komunikacji miejskiej. Zadania realizowane przez komunikację miejską wykraczają poza rolę dowozowo-odwozową. W związku z tym w dysertacji uwzględniani są pasażerowie przesiadający się z transportu kolejowego na autobusową komunikację miejską.
- 2) Linie komunikacyjne posiadają wspólne fragmenty tras. Każda linia komunikacyjna obsługuje wszystkie segmenty określone na trasie danej linii. Wszystkie kursy dla linii komunikacyjnej w okresie funkcjonowania węzła realizują podstawowy wariant trasy.
- 3) Linie komunikacyjne w kierunkach jazdy ma cechować interwał $h(j\alpha, o)$ stały w okresach.
- 4) Odstępy czasu między odjazdem kolejnych autobusów w kursach dla linii komunikacyjnej, w których każdy realizowany jest w innym okresie zależą od interwałów $h(j\alpha, o)$ przyjętych w danych okresach i wynikają z przypisanego stanu atrybutu dotyczącego sposobów łączenia taktów. Planowane momenty realizacji kursów dobrane dla danej linii komunikacyjnej nie ograniczają doboru planowanych momentów realizacji kursów dla innych linii komunikacyjnych.
- 5) W konstrukcji rozkładu jazdy w komunikacji miejskiej nie stosuje się buforowania czasu zatrzymania na stanowiskach przystankowych i wstrzymywania odjazdu w celu gwarantowania realizacji zmiany środka transportu, także w przypadku opóźnień przyjazdów pociągów.
- 6) Rozkład macierzy potoków pasażerów w węźle Φ_2 w poszczególnych jednostkach czasu jest zdeterminowany i pozostaje niezmienny w trakcie badań.
- 7) Liczba pasażerów, którzy przyjeżdżają do węzła przesiadkowego w danym kursie nie zależy od odchyłki od planowanego momentu przyjazdu do węzła przesiadkowego pociągu w danym kursie.

- 8) Każdy pasażer w dotarciu do *seg*-tego segmentu docelowego zaakceptuje pierwszy z pojazdów w kursach realizowanych w ramach dowolnej z linii komunikacyjnych w kierunku jazdy, przy czym jest to jednocześnie pojazd, który odjeżdża ze stanowiska przystankowego nie wcześniej niż w momencie wejścia pasażera na dane stanowisko przystankowe, tj. zgodnie z zależnością 3-45 a ruch autobusów w węźle przesiadkowym spełnia założenie nr 5.
- 9) Rozkłady prawdopodobieństwa trzech zmiennych losowych tj. odchyłki od rozkładu jazdy w transporcie kolejowym i komunikacji miejskiej oraz dyspersji czasu przebycia drogi przejścia pozostają niezależne.
- 10) Wszystkie kursy realizowane dla linii komunikacyjnej w danym okresie, tj. $\mathcal{A}o_{j\alpha,o}$ i $\mathcal{K}o_{jk,o}$ charakteryzowane są przez rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłek od rozkładu jazdy o określonych parametrach.
- 11) Odchyłki od rozkładu jazdy dla poszczególnych pojazdów w kursach i połączeniach kolejowych są niezależne.
- 12) Czas przebycia *p*-tej drogi przejścia w *o*-tym okresie pozostaje niezależny od planowanych i rzeczywistych momentów: przyjazdów pociągów i odjazdów autobusów związanych z rozważaną relacją podróży.
- 13) Na czas przejścia pasażerów przesiadających się w badanych relacjach nie oddziałują inne, konfliktowe potoki pasażerów przemieszczających się lub oczekujących w węźle, tj. potoki niezwiązane z kursami rozpatrywanymi w realizacji procesu zmiany środka transportu między parą kursów.

4.2. Dane wejściowe i zmienna decyzyjna

Dane wejściowe przyjęte w zadaniu optymalizacyjnym to:

- układ tras linii komunikacyjnych,
- liczba i układ peronów i stanowisk przystankowych w węźle przesiadkowym,
- drogi przejścia w węźle przesiadkowym,
- liczba kursów odrębnie dla poszczególnych kierunków jazdy,
- rozkład jazdy dla zbioru linii komunikacyjnych w niemodyfikowanych kierunkach,
- macierz potoków pasażerów w poszczególnych jednostkach czasu
- parametry opisujące rozkłady prawdopodobieństwa zmiennych o charakterze stochastycznym.

Wskazane elementy charakteryzują węzeł przesiadkowy i obsługujące go linie komunikacyjne oraz pozostają stałe podczas synchronizacji.

Dla pojedynczej linii komunikacyjnej w *ja*-tym kierunku jazdy zgodnie ze wzorem 3-34 momenty odjazdów wszystkich autobusów komunikacji miejskiej w kursach są jednoznacznie wyznaczone w funkcji wartości przypisanych elementom wektora $\theta X(j\alpha)$. Zgodnie z założeniami przedstawionymi w punktach nr 3-5. momenty realizacji kursów w poszczególnych okresach *o* są ze sobą powiązane, zależą od wartości stałych interwałów $h(j\alpha, o)$ w okresach i odstępów czasu między realizacją kolejnych kursów, z których każdy realizowany jest w innym okresie $hm(j\alpha, o, o')$. Dlatego przyjęto zbiór $\mathbf{WAR}_{j\alpha}$ numerów

rozwiązań opisujących rozkład jazdy dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w postaci:

$$\mathbf{WAR}_{j\alpha} = \{1, \dots, war_{j\alpha}, \dots, |\mathbf{WAR}_{j\alpha}| \}, j\alpha \in \widehat{\mathcal{JA}} \quad (4-1)$$

gdzie $|\mathbf{WAR}_{j\alpha}|$ oznacza liczebność zbioru $\mathbf{WAR}_{j\alpha}$. Zbiór $\mathbf{WAR}_{j\alpha}$ definiuje wszystkie możliwe konstrukcje rytmicznego rozkładu jazdy dla zadanej liczby kursów i interwału $h(j\alpha, o)$ we wszystkich okresach dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy. Jest to zbiór dopuszczalnych kombinacji momentów realizacji pierwszego kursu w o -tym okresie względem momentu rozpoczęcia o -tego okresu $\theta X(j\alpha, o)$. Każdy element $war_{j\alpha}$ zbioru jednoznacznie określa wartości przydzielone elementom wektora $\theta X(j\alpha)$ poprzez zależność funkcyjną postaci:

$$\theta X(j\alpha) = \mathbf{FW}(j\alpha) \cdot war_{j\alpha}, j\alpha \in \widehat{\mathcal{JA}} \quad (4-2)$$

gdzie $\mathbf{FW}(j\alpha)$ oznacza funkcję, która dla każdego numeru rozwiązania określa wartości przydzielone elementom wektora $\theta X(j\alpha)$, które opisują momenty realizacji pierwszego kursu linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w każdym z okresów o .

Zmienna decyzyjna odwzorowuje rozkład jazdy dla linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy. Dla potrzeb pracy przyjęto w tym celu wektor $\mathbf{war}$ w postaci:

$$\mathbf{war} = \langle war_{j\alpha} : j\alpha \in \widehat{\mathcal{JA}} \rangle \quad (4-3)$$

zawierający numery aktualnie wybranych rozwiązań $war_{j\alpha}$, tj. rozkładów jazdy dla wszystkich linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy określone przez wartości zmiennych $war_{j\alpha}$.

Zbiór dopuszczalnych rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym obejmujący wszystkie dopuszczalne kombinacje wartości elementów $war_{j\alpha}$ wektora $\mathbf{war}$ oznaczono jako $\mathbf{WAR}$, którego liczebność jest równa iloczynowi liczebności wszystkich dopuszczalnych rozkładów jazdy dla linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy i wynosi:

$$|\mathbf{WAR}| = \prod_{j\alpha \in \widehat{\mathcal{JA}}} |\mathbf{WAR}_{j\alpha}| \quad (4-4)$$

Liczebność zbioru dopuszczalnych rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym $\mathbf{WAR}$ zależy od:

- liczby linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy,
- interwału $h(j\alpha, o)$ dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w poszczególnych okresach,
- przyjętego sposobu łączenia taktów.

Przyjęty sposób opisu rozkładu jazdy sprawia, że rozdzielona została kontrola spełnienia ograniczeń nałożonych na rozkład jazdy od przeszukiwania zbioru rozwiązań dopuszczalnych w ramach synchronizacji rozkładu jazdy. Dla potrzeb pracy w zakresie przeszukiwania rozwiązań podczas synchronizacji rozkładów jazdy wartości wybranych zmiennych zależą

od wartości elementów wektora opisującego zmienną decyzyjną **war**. W tym celu dla wybranych elementów modelu rozszerzono zbiór argumentów o wektor **war**. Są to następujące elementy przedstawione z uzupełnioną listą argumentów:

- wektor opisujący planowane momenty realizacji pierwszych kursów w kolejnych okresach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy $\theta X(j\alpha, \mathbf{war})$, przy czym elementy wektora oznaczono jako $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$,
- zbiór planowanych momentów realizacji wszystkich kursów dla linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy $\theta YAJ(\mathbf{war}_{j\alpha})$ wraz z elementami zbioru $\theta YA(\alpha, \mathbf{war})$,
- rozkład jazdy w węźle przesiadkowym $\theta YJ(\mathbf{war})$ i rozkład jazdy w komunikacji miejskiej w zakresie linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy $\theta YJA(\mathbf{war})$,
- odstęp czasu między kolejnymi kursami, z których każdy realizowany jest w innym okresie $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$,
- czas oczekiwania pasażera w pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu $tm(\pi, \mathbf{war}, zs)$.

Przykład zastosowania przyjętego w pracy sposobu doboru rozkładu jazdy dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy na podstawie wektora **war** i związków między momentami realizacji pierwszych kursów w poszczególnych okresach przedstawiono na rysunku 4.1.

Nazwa zmiennej	Oznaczenie	Graficzna reprezentacja	Nazwa zbioru elementów/wartości	Oznaczenie
Planowany moment odjazdu autobusu w kursie	$\theta YA(\alpha, \mathbf{war})$		Rozkład jazdy dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w funkcji rozwiązania dopuszczalnego	$\theta YAJ(j\alpha, \mathbf{war})$
Moment realizacji pierwszego kursu w okresie względem początku okresu	$\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$		Liczba dopuszczalnych momentów realizacji pierwszego kursu w okresie	$h(j\alpha, o)$
Numer dopuszczalnego rozkładu jazdy - zmienna decyzyjna	war		Zbiór rozwiązań dopuszczalnych	WAR

Legenda

| bieżąca wartość przyjmowana przez zmienną

{ } zbiór dopuszczalnych wartości zmiennej

• jedna wartość dopuszczalna ze zbioru wartości dopuszczalnych dla zmiennej

Rys. 4.1. Przykład zastosowania przyjętego w pracy sposobu doboru rozkładu jazdy dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy na podstawie wektora **war** ze wskazaniem funkcji zależnych od zmiennej decyzyjnej

Źródło: opracowanie własne

W przykładzie przedstawionym na rysunku 4.1. przyjęto, że wektor **war** jest jednoelementowy, tzn. opisuje rozkład jazdy dla jednej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy. Rozwiązanie opisane wektorem **war** dobrane ze zbioru rozwiązań dopuszczalnych **WAR** na podstawie zależności opisanej wzorem 4-2, determinuje dla ustalonych momentów rozpoczęcia funkcjonowania linii komunikacyjnych w dobie momenty realizacji pierwszego kursu w każdym z pięciu okresów o . W związku z przyjęciem stałego interwału $h(j\alpha, o)$ dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w okresie o moment realizacji pierwszego kursu w okresie o może przyjmować jedną wartość spośród $h(j\alpha, o)$ wartości. Jednocześnie na podstawie zależności danej wzorem 3-34 przyjęcie wartości zmiennej $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$ i $h(j\alpha, o)$ determinuje momenty realizacji pozostałych kursów w o -tym okresie. Wartości

zmiennej $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$ przyjęte w poszczególnych okresach o są od siebie wzajemnie zależne. Ma to miejsce dla każdej kombinacji wartości elementów wektora $\theta X(j\alpha, \mathbf{war})$. Dzięki temu wektor $\mathbf{war}$ determinuje rozkład jazdy linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w całym okresie funkcjonowania węzła.

Dla potrzeb synchronizacji rozkładów jazdy przyjęto funkcję $g3(\mathbf{war}_{j\alpha}, \mathbf{war}_{j\alpha}') \in \{0,1\}$, która określa czy dwa rozwiązania, tj. rozkłady jazdy dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy są rozwiązaniami sąsiednimi. Za rozwiązania sąsiednie uważa się tę parę rozwiązań według których zbudowane rozkłady jazdy spełniają warunek:

$$\sum_{o \in O} |\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war}) - \theta X(j\alpha, o, \mathbf{war}')| \rightarrow \min, \quad (4-5)$$

$$\mathbf{war}, \mathbf{war}' \in \mathbf{WAR}, j\alpha \in \widehat{JA}$$

czyli pomiędzy parą elementów $\mathbf{war}_{j\alpha}$ i $\mathbf{war}_{j\alpha}'$ opisujących rozkład jazdy dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy i przypisanych do wektora zmiennej decyzyjnej $\mathbf{war}$. momenty realizacji pierwszych kursów w okresach różnią się możliwie jak najmniej, tj. o możliwie najmniejszą liczbę jednostek czasu θY , jaka jest dopuszczalna ze względu na ograniczenia konstrukcji rozkładu jazdy.

Przeszukiwanie lokalne w zakresie rozkładu jazdy rozumiane jest w pracy jako zastępowanie rozwiązania przez rozwiązanie sąsiednie. Podstawę przeszukiwania zbioru rozwiązań dopuszczalnych w synchronizacji rozkładu jazdy stanowi zbiór $\mathbf{WS}(\mathbf{war}_{j\alpha})$ o elementach zdefiniowanych w postaci:

$$\mathbf{WS}(\mathbf{war}_{j\alpha}) = \{\mathbf{war}_{j\alpha}': g14(\mathbf{war}_{j\alpha}, \mathbf{war}_{j\alpha}') = 1\}, \quad (4-6)$$

$$\mathbf{war}_{j\alpha}, \mathbf{war}_{j\alpha}' \in \mathbf{WAR}_{j\alpha}, j\alpha \in \widehat{JA}$$

który ma interpretację zbioru rozwiązań sąsiednich dla rozwiązania $\mathbf{war}_{j\alpha}$.

Rozkład jazdy dla wszystkich linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy $\theta Y \widehat{JA}(\mathbf{war})$ jest definiowany jednoznacznie poprzez wartości przypisane elementów wektora $\mathbf{war}$ jako zbiór planowanych momentów odjazdów wszystkich autobusów komunikacji miejskiej w kursach dla linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy i został określony w postaci:

$$\theta Y \widehat{JA}(\mathbf{war}) = \bigcup_{j\alpha \in \widehat{JA}} \theta Y \mathbf{AJ}(\mathbf{war}_{j\alpha}), \mathbf{war} \in \mathbf{WAR} \quad (4-7)$$

Rozkład jazdy w węźle przesiadkowym $\theta Y \mathbf{J}(\mathbf{war})$ określono w postaci:

$$\theta Y \mathbf{J}(\mathbf{war}) = \theta Y \mathbf{JK} \cup \theta Y \widehat{JA} \cup \theta Y \widehat{JA}(\mathbf{war}) \quad (4-8)$$

i opisuje planowane momenty przyjazdu środków transportu we wszystkich połączeniach dla relacji w transporcie kolejowym oraz planowanych momentów odjazdu wszystkich autobusów komunikacji miejskiej w kursach dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy. W konstruowanym zadaniu optymalizacyjnym rozkład jazdy w węźle przesiadkowym jest determinowany przez elementy wektora $\mathbf{war}$. Rozkład jazdy w transporcie kolejowym

oraz rozkłady jazdy dla linii komunikacyjnych w niemodyfikowanych kierunkach jazdy w komunikacji miejskiej stanowią daną wejściową. Natomiast rozkład jazdy dla wszystkich linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy budowany jest w sposób iteracyjny w wyniku poszukiwania najkorzystniejszej konfiguracji wartości elementów wektora **war** w wyniku przeszukiwania zbiorów **WAR_{jα}**.

Dla każdego rozwiązania dla węzła przesiadkowego **war** identyfikowane są rozwiązania sąsiednie opisane w postaci zbiorów: **WARS(war)** i **WARD(war, seg)** w postaci:

$$\begin{aligned} \mathbf{WARS}(\mathbf{war}) = \{ \mathbf{war}' : & !\exists_{j\alpha} \mathbf{war}_{j\alpha} \neq \mathbf{war}'_{j\alpha} \wedge \\ & \mathbf{war}'_{j\alpha} \in \mathbf{WS}(\mathbf{war}_{j\alpha}), \mathbf{war}_{j\alpha} \in \mathbf{war}, \mathbf{war}'_{j\alpha} \in \mathbf{war}'_{j\alpha} \in \widehat{\mathcal{JA}} \} \end{aligned} \quad (4-9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{WARD}(\mathbf{war}, \mathbf{seg}) = \{ \mathbf{war}' : & !\exists_{j\alpha} \mathbf{war}_{j\alpha} \neq \mathbf{war}'_{j\alpha} \wedge \\ & \mathbf{war}'_{j\alpha} \in \mathbf{WS}(\mathbf{war}_{j\alpha}), \mathbf{war}_{j\alpha} \in \mathbf{war}, \mathbf{war}'_{j\alpha} \in \mathbf{war}'_{j\alpha} \in \widehat{\mathcal{JA}} \cap \mathbf{JA}g7_{seg}, \mathbf{seg} \in \mathbf{SEGD} \} \end{aligned} \quad (4-10)$$

gdzie $\mathbf{war}_{j\alpha}$ definiuje rozkład jazdy dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy przyjęty w rozwiązaniu **war** a $\mathbf{war}'_{j\alpha}$ rozkład jazdy przyjęty dla tej samej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w rozwiązaniu **war'**. Za rozwiązania sąsiednie uważa się każdą parę rozwiązań **war**, **war'** wtedy i tylko wtedy, gdy spośród wszystkich linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy tylko jeden będzie opisany w obu rozwiązaniach dwoma różnymi rozkładami jazdy.

Zbiór rozwiązań sąsiednich **WARS(war)** zawiera wszystkie rozwiązania sąsiednie względem bieżącego rozwiązania **war**. Natomiast zbiór rozwiązań sąsiednich **WARD(war, seg)** stanowi podzbiór zbioru **WARS(war)** i zawiera wszystkie rozwiązania sąsiednie tylko dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy zapewniających połączenie węzła przesiadkowego z segmentem docelowym **seg**.

4.3. Odwzorowanie ograniczeń nałożonych na zadanie optymalizacyjne

Rolą formułowanych w zadaniu optymalizacyjnym ograniczeń jest zapewnienie, aby zsynchronizowany rozkład jazdy spełniał warunki i założenia zdefiniowane na etapie identyfikacji problemu badawczego. Przyjęte w pracy ograniczenia dla pojedynczych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy dotyczą doboru:

- 1) liczby kursów dla linii komunikacyjnej w kierunku w okresie o ,
- 2) odstępów czasu między realizacją kolejnych kursów, z których każdy realizowany jest w innym okresie o w poszczególnych sposobach łączenia taktów slt ,

i stanowią tym samym podstawę określeniu zbioru rozwiązań dopuszczalnych.

1) Ograniczenia w doborze liczby kursów dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w okresie o

Ostateczny dobór czasu trwania każdego z okresów o oraz liczby realizowanych w tym czasie kursów i interwału dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy dokonywany jest w taki sposób, aby spełniona została równość między czasem trwania okresu o a iloczynem wartości przyjętego interwału $h(j\alpha, o)$ i liczby kursów realizowanych w danym okresie $\mathcal{A}o_{j\alpha, o}$:

$$\forall_{j\alpha \in \widehat{\mathcal{JA}}} h(j\alpha, o) \cdot |\mathcal{A}o_{j\alpha, o}| = \begin{cases} \theta b2(02) - \theta b1j(01, j\alpha), o = 01 \\ \theta b2(o) - \theta b1(o), o \in \{02, 03, 04\} \\ \theta b2j(05, j\alpha) - \theta b1(04), o = 05 \end{cases} \quad (4-11)$$

Spełnienie tego warunku zapewnia regularność odjazdu pojazdów w o -tym okresie.

2) Ograniczenia doboru odstępów czasu między realizacją kolejnych kursów, z których każdy realizowany jest w innym okresie, w poszczególnych sposobach łączenia taktów

Ograniczenia dotyczą doboru planowanych momentów odjazdów pierwszego pojazdu w kolejnych okresach $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$ dopuszczonych do stosowania w synchronizacji rozkładów jazdy, tzn. spełniających założenia przyjętego sposobu łączenia taktów. Dopuszczalne są tylko wybrane (pięcioelementowe) kombinacje planowanych momentów odjazdów pierwszego pojazdu w kolejnych okresach $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$ determinujące łącznie rozkład jazdy dla linii komunikacyjnych w kierunku jazdy w okresie funkcjonowania węzła. Warunkiem doboru planowanego momentu odjazdu pierwszego pojazdu w okresie $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$ jest zapewnienie płynnej zmiany momentów realizacji kursów pomiędzy interwałami $h(j\alpha, o)$ przyjętymi w sąsiednich okresach. Dla każdej linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy zbiór rozwiązań dopuszczalnych $\mathbf{WAR}_{j\alpha}$ jest dobierany niezależnie od zbiorów rozwiązań dopuszczalnych dobranych dla pozostałych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy.

Ograniczenie nałożone na zbiór rozwiązań dopuszczalnych dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy $\mathbf{war}_{j\alpha}$ dotyczy zapewnienia w każdym rozwiązaniu proporcjonalności pomiędzy planowanymi momentami odjazdu pierwszego pojazdu w okresie $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$. W pracy spełniono ograniczenie poprzez uzależnienie odstępu czasu między dwoma kolejnymi kursami, z których każdy realizowany jest w innym okresie $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$ od interwałów $h(j\alpha, o)$ danej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy przyjętych w dwóch sąsiednich okresach. Oznacza to, że rozwiązania dopuszczalne dla każdej linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy determinują rozkłady jazdy, które spełniają ograniczenia: regularności odjazdów w okresach i proporcjonalności pomiędzy wartościami planowanych momentów odjazdów pierwszego pojazdu w okresie $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$ dla poszczególnych okresów o .

W pracy rozważano 4 różne sposoby łączenia taktów slt dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy określające sposób doboru odstępów czasu między kolejnymi kursami, z których każdy realizowany jest w innym okresie $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$:

- *SLT1*, w którym zmienna $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$ może przyjmować różne wartości z przedziału określonego przez interwały $h(j\alpha, o)$ w sąsiednich okresach. Okres o , dla którego przypisano największy interwał $h(j\alpha, o)$, przyjmowany jest jako bazowy.
- *SLT2*, w którym zmienna $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$ może przyjmować różne wartości z przedziału określonego przez interwały $h(j\alpha, o)$ w sąsiednich okresach. Okres o , dla którego przypisano najmniejszy interwał $h(j\alpha, o)$, przyjmowany jest jako bazowy.
- *SLT3*, w którym zmienna $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$ przyjmuje stałą wartość zależną od interwałów $h(j\alpha, o)$ w sąsiednich okresach a niezależną od rozwiązania $\mathbf{war}$. Okres o , dla którego przypisano najmniejszy interwał $h(j\alpha, o)$, przyjmowany jest jako bazowy.
- *SLT4*, w którym zmienna $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$ przyjmuje tylko kilka ściśle określonych wartości zależnych od interwałów $h(j\alpha, o)$, a liczba wyznaczanych rozkładów jazdy zależy od liczby kombinacji par planowanych momentów odjazdu pierwszego pojazdu $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$ dobranych w sąsiednich okresach o .

Wprowadzone sposoby łączenia taktów stanowią praktyczną realizację ograniczeń na dobór wartości zmiennych $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$.

W sposobach łączenia taktów oznaczonych jako *SLT1* i *SLT2* momenty odjazdu pierwszego autobusu w kolejnych okresach $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$ muszą spełniać warunek:

$$\frac{\theta X(j\alpha, o', \mathbf{war})}{\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})} = \frac{h(j\alpha, o')}{h(j\alpha, o)}, \quad (4-12)$$

$$o + 1 = o', j\alpha \in \widehat{JA}, o, o' \in O$$

Planowane momenty odjazdów pierwszego autobusu w okresie $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$ są proporcjonalne do interwałów $h(j\alpha, o)$ w rozpatrywanych okresach. Wartość zmiennej $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$ jest modyfikowana proporcjonalnie do zmian planowanych momentów odjazdów pierwszego autobusu w sąsiednich okresach (zgodnie ze wzorem 4-12 i zależy od proporcji między interwałami $h(j\alpha, o)$). Oznacza to, że zmienna $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$ przyjmuje wartości z przedziału:

$$hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war}) \in [\min(h(j\alpha, o); h(j\alpha, o')), \max(h(j\alpha, o); h(j\alpha, o'))] \quad (4-13)$$

$$j\alpha \in \widehat{JA}, o, o' \in O, hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war}) \in \mathbb{N}^+$$

zależne od przyjętej wartości jednej ze zmiennych $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$ w rozpatrywanej parze okresów sąsiednich (o, o') .

Liczebność zbioru rozwiązań dopuszczalnych dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy $\mathbf{WAR}_{j\alpha}$ bezpośrednio związana jest z interwałem $h(j\alpha, oz)$, tzn. przyjętym w okresie bazowymoz:

- w przypadku sposobu łączenia taktów *SLT1* zależnością:

$$|\mathbf{WAR}_{j\alpha}| = \max_{o' \in O} (h(j\alpha, o')), j\alpha \in \widehat{JA} \quad (4-14)$$

$$oz \equiv o: \forall_{o' \neq o} h(j\alpha, o') \leq h(j\alpha, o), o, o' \in O, j\alpha \in \widehat{JA}$$

- w przypadku sposobu łączenia taktów *SLT2* zależnością:

$$|WAR_{j\alpha}| = \min_{o' \in O} (h(j\alpha, o')), j\alpha \in \widehat{JA} \quad (4-15)$$

$$oz \equiv o: \forall_{o' \neq o} h(j\alpha, o') \geq h(j\alpha, o), o, o' \in O, j\alpha \in \widehat{JA}$$

Założenie o stałości odstepu czasu między realizacją dwóch kolejnych kursów, z których każdy realizowany jest w innym okresie $hm(j\alpha, o, o', war)$ podczas doboru rozkładów jazdy dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy niezależnie od numeru rozwiązania $war_{j\alpha}$ i wartości elementów wektora planowanych momentów odjazdów pierwszych autobusów w okresach $\theta X(j\alpha, war)$ stanowią podstawę definicji dwóch kolejnych **sposobów łączenia taktów oznaczonych jako *SLT3* i *SLT4***. W obu sposobach łączenia taktów dopuszczalne kombinacje planowanych momentów odjazdów pierwszego autobusu w okresach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy $\theta X(j\alpha, o, war)$ spełniają zależność:

$$\theta X(j\alpha, o', war) - \theta X(j\alpha, o, war) = hm(j\alpha, o, o', war) - h(j\alpha, o), \quad (4-16)$$

$$o + 1 = o', j\alpha \in \widehat{JA}, o, o' \in O$$

Różnica między wskazanymi sposobami łączenia taktów dotyczy zasad doboru wartości zmiennej $hm(j\alpha, o, o', war)$ w opracowaniu rozkładu jazdy. W **sposobie łączenia taktów *SLT3***, wartość zmiennej $hm(j\alpha, o, o', war)$ wyznaczana jest jako średnia arytmetyczna z interwałów $h(j\alpha, o)$ w sąsiednich okresach:

$$hm(j\alpha, o, o', war) = \frac{h(j\alpha, o) + h(j\alpha, o')}{2}, j\alpha \in \widehat{JA}, o, o' \in O \quad (4-17)$$

Okres bazowy *oz* przyjmowany jest zgodnie z zależnością 4-15, tak samo jak dla sposobu łączenia taktów *SLT2* najmniejszy interwał z wartości przyjętych w okresach *o*.

Najbardziej złożona postać ograniczeń w doborze planowanych momentów odjazdów pierwszych autobusów w okresach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy $\theta X(j\alpha, o, war)$ występuje w sposobie łączenia taktów *SLT4*. Wynika to z przyjętego sposobu doboru wartości miary $hm(j\alpha, o, o', war)$. Celem postępowania jest, aby zbudowany rozkład jazdy w skali doby dla danej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy spełniał wymagania stałej wartości minut dla momentów odjazdów w kolejnych godzinach w całym okresie funkcjonowania węzła. Kluczowym elementem postępowania jest zdefiniowanie zbioru ***hm4***($j\alpha, o, o', war$) dopuszczalnych wartości odstepu czasu między realizacją dwóch kolejnych kursów, z których każdy realizowany jest w innym okresie wyznaczonych według zależności:

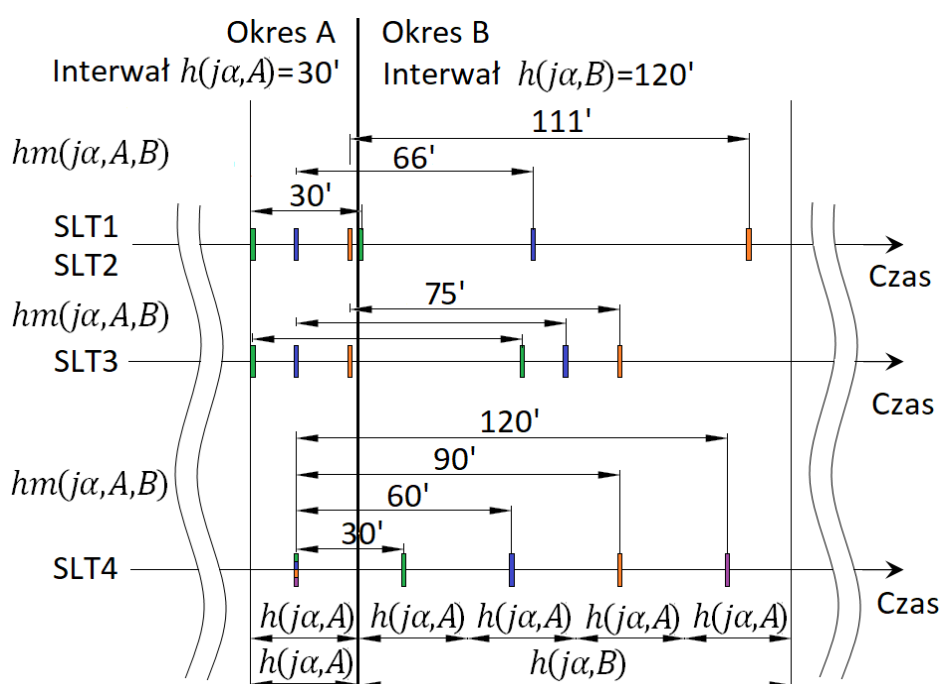
$$hm4(j\alpha, o, o', war) = \left\{ \begin{array}{l} h(j\alpha, o) \\ i \cdot h(j\alpha, o), i \in \left\{ 2, \dots, \frac{h(j\alpha, o')}{h(j\alpha, o)} - 1 \right\}, \text{ gdy } h(j\alpha, o) \leq h(j\alpha, o') \\ i \cdot h(j\alpha, o'), i \in \left\{ 2, \dots, \frac{h(j\alpha, o)}{h(j\alpha, o')} - 1 \right\}, \text{ gdy } h(j\alpha, o') \leq h(j\alpha, o) \end{array} \right\} \quad (4-18)$$

$$j\alpha \in \widehat{JA}, o, o' \in O$$

z którego w sposobie łączenia taktów *SLT4* wybiera się w proponowanej metodzie element determinujący wartość miary $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$. Zapewnia to, że odstęp czasu między realizacją kolejnych kursów, z których każdy realizowany jest w innym okresie przyjmuje wartości interwału $h(j\alpha, o)$ z obu rozpatrywanych okresów oraz ich kolejne wielokrotności. Dzięki temu zmiana częstotliwości realizacji kursów pozostaje słabiej związana z przyjętymi granicami okresów.

Zbiór wszystkich dopuszczalnych rozwiązań dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy dla sposobu łączenia taktów *SLT4* wyznaczany jest na podstawie wszystkich kombinacji doboru planowanych momentów realizacji pierwszego kursu w okresach i miary $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$, które spełniają warunek 4-16.

Przykład zastosowania przyjętych w pracy ograniczeń na dobór odstępów czasu między dwoma kolejnymi kursami, z których każdy realizowany jest w innym okresie przedstawiono na rysunku 4.2. (kolory wskazują na alternatywne momenty realizacji par kursów)



Rys. 4.2. Przykład doboru wartości miary $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$ spełniających zdefiniowane w pracy ograniczenia dla różnych sposobów łączenia taktów

Źródło: opracowanie własne

Na rysunku przedstawiono fragment osi czasu prezentującej momenty realizacji kursów. Widoczna jest granica pomiędzy dwoma okresami oznaczonymi jako A i B wraz z fragmentem osi wskazującym przedział czasu, w którym jest realizowany ostatni kurs linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w okresie A i pierwszy kurs w okresie B. W okresie A interwał rozważanej linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy wynosi 30 min a w okresie B wynosi 120 min. Zgodnie z zależnościami opisanymi wzorami 4-12, 4-17 i 4-18 odstęp czasu między kolejnymi kursami, z których każdy realizowany jest w innym okresie oznaczonego jako $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$ zależy od momentów realizacji pierwszego

kursu w każdym z okresów w rozważanej parze $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$ i przyjętych interwałów $h(j\alpha, o)$. Przyjęty dla rozważanej linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy stały interwał $h(j\alpha, o)$ wiążący momenty realizacji kursów w okresie o , powoduje, że w zaprezentowanych na rysunku 4.2. dwóch przedziałach czasu odpowiednio o długości $h(j\alpha, A)=30$ min w okresie A i $h(j\alpha, B)=120$ min w okresie B będzie realizowanych tylko po jednym kursie. Wskazane na rysunku różnymi kolorami momenty realizacji kursów odwzorowują przykłady alternatywnych momentów realizacji kursów spełniających przyjęte w dysertacji ograniczenia i wynikają z przyjętych w rozważanym rozwiązaniu $\mathbf{war}_{j\alpha}$ planowanych momentów realizacji pierwszego kursu w rozważanej parze okresów A i B.

W przypadku sposobów łączenia taktów $SLT1$ i $SLT2$ zasady postępowania podczas doboru wartości zmiennej $hm(j\alpha, A, B)$ są takie same. Różna jest jedynie liczba badanych przypadków, co wynika z przyjęcia innych okresów bazowych zgodnie ze wzorami 4-14 i 4-15. Odstęp czasu między dwoma kolejnymi kursami, z których każdy realizowany jest w innym okresie oznaczony jako $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$ składa się z dwóch części:

- jednej w okresie A tj. między momentem realizacji ostatniego kursu w tym okresie a momentem końca okresu A,
- jednej w okresie B o długości równej odstępowi czasu między momentem rozpoczęcia okresu B i momentem realizacji pierwszego kursu linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w okresie B.

W sposobach łączenia taktów $SLT1$ i $SLT2$ wskazana wzorem 4-12 proporcjonalność między zmiennymi powoduje, że im mniejsza jest wartość proporcji $\frac{\theta X(j\alpha, A, \mathbf{war})}{h(j\alpha, A)}$ tym wartość zmiennej $hm(j\alpha, A, B)$ jest bliższa wartości zmiennej $h(j\alpha, A)$. Na rysunku 4.2. odwzorowuje to para kursów oznaczonych kolorem zielonym. Im większa jest wartość zmiennej $\theta X(j\alpha, A, \mathbf{war})$, tym wartość zmiennej $hm(j\alpha, A, B)$ bliższa jest wartości zmiennej $h(j\alpha, B)$. Odwzorowuje to para kursów oznaczonych kolorem pomarańczowym.

W przypadku sposobu łączenia taktów $SLT3$ zmienna $hm(j\alpha, A, B)$ przyjmuje jedną wartość, zależną od wartości interwałów $h(j\alpha, o)$ przyjętych w dwóch sąsiednich okresach według zależności 4-13 lecz niezależnych od wartości zmiennych $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$. Zostało to odwzorowane na rysunku 4.2., na którym odstęp czasu między momentem realizacji dwóch kolejnych kursów jest taki sam, dla trzech przykładowych, rozważanych momentów realizacji par kursów oznaczonych różnymi kolorami.

W przypadku sposobu łączenia taktów $SLT4$ jednej wartości planowanego momentu realizacji pierwszego kursu w okresie o , w którym przyjęto mniejszy interwał $h(j\alpha, o)$ odpowiada więcej niż jeden moment realizacji pierwszego kursu w okresie $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$, w którym przyjęto większy interwał $h(j\alpha, o')$. Wskazana zależność została przedstawiona na rysunku 4.2., na którym w okresie B wskazano różnymi kolorami cztery alternatywne momenty realizacji pierwszego kursu w okresie o . Powoduje to, że w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych uwzględnione będą cztery alternatywne konfiguracje momentów realizacji kursów w okresie B odpowiadające momentom realizacji kursów w okresie A. Przyjęte

w sposobie łączenia taktów $SLT4$ wartości zmiennej $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$ zwiększają rytmiczność realizacji kursów w komunikacji miejskiej w całym okresie funkcjonowania węzła. Zmniejsza to bezpośrednie powiązania interwału $h(j\alpha, o)$ z granicami okresu o . W przypadku $SLT4$ zbiór rozwiązań dopuszczalnych dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy zawiera rozwiązania, dla których moment realizacji pierwszego kursu w okresie A (oznaczony jako $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$) przyjmuje każdą wartość z przedziału $[0; h(j\alpha, A)]$. Każdej ze wskazanych 30 wartości odpowiadają 4 alternatywne momenty realizacji kursów w okresie B .

4.4. Funkcja kryterium

Zdefiniowana w pracy funkcja kryterium określa średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej w okresie funkcjonowania węzła przy oddziaływaniu czynników o charakterze stochastycznym. Średni czas oczekiwania wyznaczany jest jako wartość średnia z czasów oczekiwania poszczególnych pasażerów w poszczególnych realizacjach procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym.

Funkcja kryterium dana jest wzorem:

$$FC(\mathbf{war}) = \frac{1}{|ZS| \cdot |\Pi|} \sum_{zs \in ZS} \sum_{\pi \in \Pi} tm(\pi, \mathbf{war}, zs) \rightarrow \min \quad (4-19)$$

Czas oczekiwania pasażera π w węźle przesiadkowym w pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu zs i dla przyjętej wartości zmiennej decyzyjnej $\mathbf{war}$ wyznaczany jest jako różnica między momentem odjazdu pasażera autobusem komunikacji miejskiej ze stanowiska przystankowego w węźle przesiadkowym a momentem wejścia danego pasażera na stanowisko przystankowe co odwzorowano wzorem:

$$\begin{aligned} tm(\pi, \mathbf{war}, zs) &= \theta \mathcal{A}(\alpha^*(\pi, \mathbf{war}, zs), zs) - \theta \Pi(\pi, zs) \wedge \\ &tm(\pi, \mathbf{war}, zs) \in \mathbb{N}, \\ \alpha^*(\pi, \mathbf{war}, zs) &= \min_{\alpha \in \mathcal{A}g_{seg}^7} \{ \theta \mathcal{A}(\alpha, \mathbf{war}, zs) : \\ \theta \mathcal{A}(\alpha, \mathbf{war}, zs) &\geq \theta \Pi(\pi, zs) \wedge rel(\pi) = rel \equiv (seg', seg) \}, \\ seg' &\in \mathbf{SEGZ}, seg \in \mathbf{SEGD}, zs \in \mathbf{ZS}, \pi \in \Pi \end{aligned} \quad (4-20)$$

gdzie $\theta \mathcal{A}(\alpha^*(\pi, \mathbf{war}, zs), zs)$ oznacza rzeczywisty moment odjazdu autobusu komunikacji miejskiej w kursie α , którym w pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu zs pasażer π opuści węzeł przesiadkowy. Kurs $\alpha^*(\pi, \mathbf{war}, zs)$ realizowany jest dla rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym $\mathbf{war}$ i zapewnia połączenie węzła przesiadkowego z segmentem docelowym, na którym zakończy podróż pasażer π .

Czas oczekiwania poszczególnych pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym zależy w sformułowanym w pracy zadaniu od:

- liczby linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy i liczby kursów zapewniających połączenie w danej relacji podróży,

- liczby pasażerów przyjeżdżających do węzła danym pociągiem w tym przemieszczających się daną drogą przejścia,
- rozkładu jazdy wszystkich linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy zapewniających połączenie w danej relacji tj. pierwszych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej ze stanowisk przystankowych w węźle przesiadkowym w kursach należących do wskazanych kierunków jazdy,
- stochastycznego charakteru ruchu pojazdów i pieszych w węźle przesiadkowym.

W ocenie każdego rozwiązania brany jest pod uwagę zbiór pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu. Pojedyncze realizacje procesu zmiany środka transportu wyznaczone są niezależnie, tak, że każdą charakteryzują odchyłki od rozkładu jazdy i czasów przebycia przez pasażerów dróg przejścia wyznaczone na podstawie rozkładów prawdopodobieństwa $\mathcal{P}opo(j\alpha, o)$, $\mathcal{P}opp(j\kappa, o)$ i $\mathcal{P}tp(p, o)$.

Celem optymalizacji jest skrócenie średniego czasu oczekiwania pasażerów w skali całego węzła. Dopuszcza się zatem zarówno zwiększanie wartości jak i zwiększanie zróżnicowania średniego czasu oczekiwania poszczególnych potoków pasażerów jeśli te działania powodują podczas synchronizacji zmniejszenie wartości funkcji kryterium danej wzorem 4-19.

Na wartość funkcji kryterium w synchronizacji rozkładów jazdy wpływają planowane momenty przyjazdów pociągów i odjazdów autobusów komunikacji miejskiej w poszczególnych kursach $\theta Y\mathcal{K}(\kappa)$ i $\theta Y\mathcal{A}(\alpha, \mathbf{war})$ oraz stochastyczny charakter procesów ruchu pojazdów i pieszych w węźle odwzorowany za pomocą trzech czynników o charakterze stochastycznym, opisanych rozkładami prawdopodobieństwa: $\mathcal{P}opp(j\kappa, o)$, $\mathcal{P}opo(j\alpha, o)$ i $\mathcal{P}tp(p, o)$.

Funkcja kryterium ważona jest istotnością poszczególnych relacji podróży, opisaną w zadaniu wielkością potoków pasażerów $\Phi_{2,seg}$. Podczas wyznaczania wartości funkcji kryterium dla wybranego rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym $\mathbf{war}$ uwzględniane jest prawdopodobieństwo wystąpienia określonych wartości trzech czynników o charakterze stochastycznym. Na podstawie rozkładów prawdopodobieństwa w poszczególnych realizacjach procesu zmiany środka transportu $\mathbf{ZS}$ w zbiorze $\mathbf{ZS}$ dobierane są wartości czynników o charakterze stochastycznym. Rozwiązanie dopasowywane jest zatem do potrzeb pasażerów. W pracy poszukiwany jest najkorzystniejszy rozkład jazdy w węźle przesiadkowym $\mathbf{war}^*$, który spełnia warunek:

$$\mathbf{war}^* = \min_{\mathbf{war} \in \mathbf{WAR}} \{FC(\mathbf{war})\} \quad (4-21)$$

Wektor $\mathbf{war}$ opisujący dopuszczalne rozkłady jazdy dla linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy, dla którego funkcja kryterium $FC(\mathbf{war})$ przyjmuje wartość minimalną spośród wszystkich zbadanych dotychczas rozwiązań, traktowany jest w pracy jako rozwiązanie optymalne i został oznaczony jako $\mathbf{war}^*$.

4.5. Jednokryterialne zadanie optymalizacyjne synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym

Zadanie optymalizacyjne synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym przy oddziaływaniu czynników o charakterze stochastycznym, rozpatrywane w aspekcie czasu podróży pasażerów zmieniających środek transportu w ciągu doby z transportu kolejowego na autobusową komunikację miejską sformułowano w następującej postaci:

Dla zadanych

- zbioru numerów segmentów stanowiących miejsca początku i końca realizacji podróży realizowanych ze zmianą środka transportu w węźle przesiadkowym

$$SEG = \{1, \dots, seg, \dots, |SEG|\} \quad (4-22)$$

- zbioru numerów relacji w transporcie kolejowym obsługujących węzeł przesiadkowy

$$JK = \{1, \dots, jk, \dots, |JK|\} \quad (4-23)$$

- zbioru numerów linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w autobusowej komunikacji miejskiej obsługujących węzeł przesiadkowy

$$JA = \{1, \dots, ja, \dots, |JA|\} \quad (4-24)$$

- zbioru numerów połączeń w transporcie kolejowym obsługujących węzeł przesiadkowy

$$K = \{1, \dots, \kappa, \dots, |K|\} \quad (4-25)$$

- zbioru kursów w komunikacji miejskiej dla linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy

$$A = \{1, \dots, \alpha, \dots, |A|\} \quad (4-26)$$

- zbioru numerów relacji podróży identyfikujących segmenty początkowe, na których rozpoczynane są podróże i segmenty docelowe będących miejscami kończenia podróży

$$REL = \{rel \equiv (seg, seg'): seg \in SEGZ, seg' \in SEGD\} \quad (4-27)$$

- zbioru numerów dróg przejścia w węźle przesiadkowym

$$P = \{p \equiv (sp\kappa, sp\alpha): sp\kappa \in SPK, sp\alpha \in SPA\} \quad (4-28)$$

gdzie $sp\kappa$ i $sp\alpha$ oznaczają wchodzące w skład węzła przesiadkowego odpowiednio peron i stanowisko przystankowe, pomiędzy którymi realizowane są przejścia w węźle. Zmienne odwzorowują miejsca wymiany pasażerskiej w węźle przesiadkowym.

- zbioru numerów pasażerów przyjeżdżających do węzła pociągami w poszczególnych połączeniach $\kappa \in K$ w ramach relacji w transporcie kolejowym, chcących dotrzeć do poszczególnych segmentów docelowych $seg \in SEGD$ i wyrażone w postaci macierzy odwzorowującej zgłaszane zapotrzebowanie na podróże w relacjach.

$$\Phi 2 = \{\Phi 2_{\kappa, seg}: \kappa \in K, seg \in SEGD\} \quad (4-29)$$

- podziału okresu funkcjonowania węzła w skali doby na okresy

$$\mathbf{O} = \{1, \dots, o, \dots, 5\} \quad (4-30)$$

- rozkładów prawdopodobieństwa opisujących czynniki o charakterze stochastycznym:

- opisujących prawdopodobieństwo wystąpienia odrębnie dla każdej linii komunikacyjnej w kolejnych okresach odchyłek od rozkładu jazdy dla poszczególnych pojazdów w kursach/połączeniach

$$\begin{aligned} \forall_{\kappa \in \mathcal{K}_{j\kappa,o}} \quad td\mathcal{K}(\kappa, zs) &\sim \mathcal{Popp}(j\kappa, o): o \in \mathbf{O}, j\kappa \in \mathbf{JK}, zs \in \mathbf{ZS} \\ \forall_{\alpha \in \mathcal{A}_{j\alpha,o}} \quad td\mathcal{A}(\alpha, zs) &\sim \mathcal{Popo}(j\alpha, o): o \in \mathbf{O}, j\alpha \in \mathbf{JA}, zs \in \mathbf{ZS} \end{aligned} \quad (4-31)$$

- opisujących rozkład czasu przebycia poszczególnych dróg przejściapw węźle przesiadkowym w kolejnych okresach o :

$$\begin{aligned} \forall_{\pi \in \Phi_{\kappa,seg}^2} \quad tp(\pi, zs) &\sim \mathcal{Ptp}(p, o): \\ p(rel \equiv (seg', seg)) &= p \wedge \\ \theta Y\mathcal{K}(\kappa) &\in [\theta b1(o); \theta b2(o)), \kappa \in \mathcal{KZ}_{seg} \cap \mathcal{K}g\mathbf{7}_{seg'}, \\ \pi \in \mathbf{\Pi}, zs \in \mathbf{ZS}, seg' \in \mathbf{SEGZ}, seg \in \mathbf{SEGD}, p \in \mathbf{P}, o \in \mathbf{O} \end{aligned} \quad (4-32)$$

Każdy potok pasażerów jest przydzielony do okresu o , w którym zgodnie z rozkładem jazdy następuje przyjazd do węzła przesiadkowego pociągu, którym pasażerowie dotarli do węzła przesiadkowego.

należy wyznaczyć wartości liczbowe zmiennej decyzyjnej

- dla każdej linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy dobrać rozkład jazdy

$$\mathbf{war} = \langle war_{j\alpha} \rangle, j\alpha \in \widehat{\mathbf{JA}} \quad (4-33)$$

gdzie $war_{j\alpha}$ oznacza element wektora determinujący rozkład jazdy wszystkich kursów linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy. Zmienna decyzyjna opisana w postaci wektora w największym stopniu kształtuje rozłożenie macierzy potoków pasażerów przemieszczających się do segmentów docelowych seg , na kursy α w węźle przesiadkowym w poszczególnych realizacjach procesu zmiany środka transportu zs :

$$\Phi\mathbf{3} = \{\Phi\mathbf{3}_{seg,\alpha,zs}\}, \alpha \in \mathcal{A}g\mathbf{1}_{seg}, seg \in \mathbf{SEGD}, zs \in \mathbf{ZS} \quad (4-34)$$

przy spełnieniu

- ograniczeń wynikających z zasad konstrukcji rozkładu jazdy zapewniających regularność odjazdów, przy braku stosowania czasów buforowych w węźle przesiadkowym obejmujących:

- stały interwał pomiędzy odjazdami kolejnych pojazdów komunikacji miejskiej w kursach odrębnie dla każdego kierunku jazdy w okresie o

$$\begin{aligned} \theta Y\mathcal{A}(\alpha, \mathbf{war}) - \theta Y\mathcal{A}(\alpha', \mathbf{war}) &= h(j\alpha, o) \\ \alpha' + 1 &= \alpha, \alpha, \alpha' \in \mathcal{AO}_{j\alpha, o}, j\alpha \in \widehat{JA}, o \in \mathbf{O}, \mathbf{war} \in \mathbf{WAR} \end{aligned} \quad (4-35)$$

- dobór liczby kursów dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w okresie

$$\begin{aligned} \theta b2(o) - \theta b1(o) &= h(j\alpha, o) \cdot |\mathcal{AO}_{j\alpha, o}|, \\ j\alpha &\in \widehat{JA}, o \in \mathbf{O} \end{aligned} \quad (4-36)$$

- dobór odstępów czasu między realizacją kolejnych kursów, z których każdy realizowany jest w innym okresie $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$ w poszczególnych sposobach łączenia taktów na podstawie zależności między planowanymi momentami realizacji pierwszego kursu $\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})$ i stałego interwału $h(j\alpha, o)$ w rozważanych parach sąsiednich okresów:

- dla sposobów łączenia taktów $SLT1$ i $SLT2$:

$$\begin{aligned} \frac{\theta X(j\alpha, o', \mathbf{war})}{\theta X(j\alpha, o, \mathbf{war})} &= \frac{h(j\alpha, o')}{h(j\alpha, o)}, \\ \theta X(j\alpha, o', \mathbf{war}) &\in [0, h(j\alpha, o')), \theta X(j\alpha, o, \mathbf{war}) \in [0, h(j\alpha, o)) \\ o + 1 &= o', j\alpha \in \widehat{JA}, o, o' \in \mathbf{O}, \mathbf{war} \in \mathbf{WAR} \end{aligned} \quad (4-37)$$

- dla sposobów łączenia taktów $SLT3$ i $SLT4$:

$$\begin{aligned} \theta X(j\alpha, o', \mathbf{war}) - \theta X(j\alpha, o, \mathbf{war}) &= hm(j\alpha, o, o') - h(j\alpha, o), \\ \theta X(j\alpha, o', \mathbf{war}) &\in [0, h(j\alpha, o')), \theta X(j\alpha, o, \mathbf{war}) \in [0, h(j\alpha, o)) \\ o + 1 &= o', j\alpha \in \widehat{JA}, o, o' \in \mathbf{O}, \mathbf{war} \in \mathbf{WAR} \end{aligned} \quad (4-38)$$

- warunków wynikających z organizacji węzła przesiadkowego i funkcjonowania linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy,

- warunków funkcjonowania węzła opisanego niezależnymi rozkładami prawdopodobieństwa,

- warunków wynikających z charakterystyki zgłaszanego zapotrzebowania na przewozy oraz zachowań i cech pasażerów związanych z procesem zmiany środka transportu,

dla których funkcja kryterium przedstawiona wyrażeniem:

$$FC(\mathbf{war}) = \frac{1}{|ZS| \cdot |\Pi|} \sum_{zs \in ZS} \sum_{\pi \in \Pi} tm(\pi, \mathbf{war}, zs) \rightarrow \min \quad (4-39)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} tm(\pi, \mathbf{war}, zs) &= \theta \mathcal{A}(\alpha^*(\pi, \mathbf{war}, zs), \mathbf{war}, zs) - \theta \Pi(\pi, zs) \wedge \\ &tm(\pi, \mathbf{war}, zs) \in \mathbb{N}, \end{aligned} \quad (4-40)$$

$$\alpha^*(\pi, \mathbf{war}, zs) = \min_{\alpha \in \mathcal{Ag}_{seg}^7} \{\theta \mathcal{A}(\alpha, \mathbf{war}, zs):$$

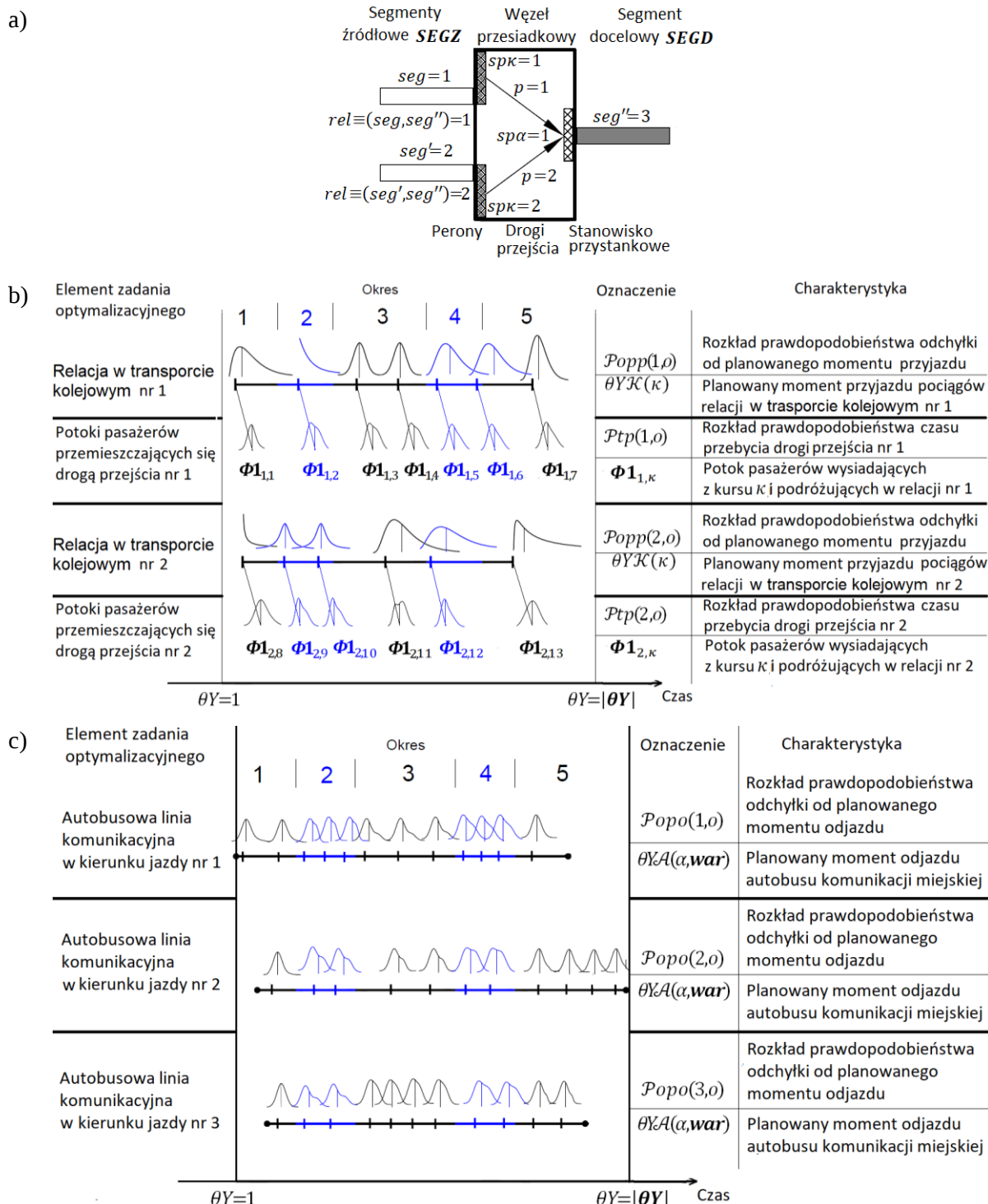
$$\theta \mathcal{A}(\alpha, \mathbf{war}, zs) \geq \theta \Pi(\pi, zs) \wedge rel(\pi) = rel \equiv (seg', seg)\},$$

$$seg' \in \mathbf{SEGZ}, seg \in \mathbf{SEGD}, zs \in \mathbf{ZS}, \pi \in \mathbf{\Pi}, \mathbf{war} \in \mathbf{WAR}$$

funkcja FC o interpretacji ważonej wielkością potoków pasażerów średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus w węźle przesiadkowym w okresie funkcjonowania węzła przy oddziaływaniu czynników o charakterze stochastycznym **osiąga wartość minimalną**.

Przykład zastosowania sformułowanego w pracy zadania optymalizacyjnego do opisu procesu zmiany środka transportu przez pasażerów w węźle przesiadkowym przedstawiono na rysunku 4.3. W przykładzie rozważane są podróże realizowane w całym okresie funkcjonowania węzła w dwóch relacjach podróży determinowanych przez dwa segmenty źródłowe i jeden segment docelowy. Każdej z dwóch relacji podróży odpowiada w węźle inna droga przejścia. Każda z dwóch rozpatrywanych w przykładzie relacji dla jednej linii komunikacyjnej w transporcie kolejowym samodzielnie zapewnia połączenie węzła z jednym segmentem źródłowym. Połączenie węzła z jednym rozpatrywanym segmentem docelowym zapewniają trzy autobusowe linie komunikacyjne w kierunkach jazdy o wspólnych trasach. W przykładzie proces zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym (przedstawionym na rysunku 4.3.a) rozpatrywany jest w ujęciu potoków pasażerów w całym okresie funkcjonowania węzła i podzielony został dla potrzeb omówienia na dwie fazy. Każdej z faz odpowiada jeden z rysunków 4.3.b) i 4.3.c).

Podział elementów rozpatrywanych w pracy według kryterium zmian, modyfikacji w synchronizacji rozkładów jazdy stanowił podstawę wyróżnienia rysunków 4.3.b) i 4.3.c). Na rysunku 4.3.a) przedstawiono elementy determinujące proces zgłoszeń pasażerów na stanowiskach przystankowych w węźle przesiadkowym, obsługiwanych przez autobusy w kursach, zapewniających połączenia w pożądanых relacjach podróży. Momenty zgłoszeń pasażerów na stanowisku przystankowym rozpoczynają czas oczekiwania i wynikają z rzeczywistych momentów przyjazdów pasażerów do węzłów i czasu przejścia przez pasażerów w węźle pomiędzy peronem a stanowiskiem przystankowym. Przedstawiona w części c) rysunku druga faza procesu obejmuje odwzorowanie zmiennej decyzyjnej, tzn. opisuje obsługę węzła przez autobusową komunikację miejską, tj. rzeczywiste momenty odjazdów ze stanowiska przystankowego w węźle autobusów trzech linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy. Momenty odjazdów pasażerów autobusami komunikacji miejskiej kończą oczekiwanie pasażerów w węźle. Synchronizacja realizowana jest poprzez zmiany planowanych momentów odjazdów. Jednak obsługa pasażerów wynika z rzeczywistych momentów odjazdów, na które poza rozkładem jazdy wpływają odchyłki od rozkładu jazdy.



Rys. 4.3. Przykład opisu procesu zmiany środka transportu w węźle jako zadanie optymalizacyjne: a) geometria węzła i segmenty; b) zgłoszenia na stanowisku przystankowym pasażerów przesiadających się; c) obsługa węzła przez trzy linie komunikacyjne

Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 4.3. różnymi kolorami oznaczono fragmenty osi czasu, które opisują kolejne okresy o , w celu wyróżnienia granic pomiędzy okresami o . W każdym okresie o każda linia komunikacyjna odpowiednio dla kierunku jazdy i relacji w transporcie kolejowym a także każda droga przejścia p charakteryzowana jest przez inne wartości parametrów, co również w sposób schematyczny zostało przedstawione na schemacie, w postaci kształtu i koloru

rozkładów prawdopodobieństwa. Każdy z rozważanych w pracy czynników o charakterze stochastycznym opisany jest rozkładem prawdopodobieństwa. Obejmuje to odchyłki od planowanych momentów przyjazdów pociągów, odchyłki od planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej i zróżnicowanie czasu przebycia dróg przejścia.

Na rysunku 4.3.a) zaznaczono planowane momenty przyjazdów pociągów $\theta Y\mathcal{K}(\kappa)$ oraz w sposób symboliczny, poprzez rozkład prawdopodobieństwa czasu przebycia dróg przejścia wskazano na związany z każdym połączeniem potok pasażerów przyjeżdżających do węzła przesiadkowego pociągiem i przemieszczający się drogą przejścia w celu realizacji zmiany środka transportu. Na schemacie 4.3.b) odwzorowano charakterystyki związane z przyjętymi w zadaniu optymalizacyjnym założeniami i ograniczeniami dotyczącymi konstrukcji rozkładu jazdy w autobusowej komunikacji miejskiej. Wskazano wartości stałego interwału $h(j\alpha, o)$ i liczbę kursów realizowanych odrębnie dla każdej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w każdym okresie $\mathcal{A}o_{j\alpha, o}$ oraz odstępy czasu między dwoma kolejnymi kursami, z których każdy realizowany jest w innym okresie $hm(j\alpha, o, o', \mathbf{war})$. Różny okres funkcjonowania w skali doby dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy jest rezultatem dostosowania ograniczonych zasobów środków transportu do zgłaszanego zapotrzebowania na realizację podróży. Jest to widoczne w liczbie kursów i wartościach interwału $h(j\alpha, o)$ dla poszczególnych autobusowych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w okresach skrajnych 01, 05.

Na rysunku 4.3.b) na osiach czasu zaznaczono planowane momenty odjazdów autobusów komunikacji miejskiej $\theta Y\mathcal{A}(\alpha, \mathbf{war})$ dla przykładowego rozkładu jazdy $\theta Y\mathcal{J}\mathcal{A}(\mathbf{war})$. W przykładzie rozpatrywane są trzy autobusowe linie komunikacyjne w modyfikowanych kierunkach jazdy. Oznacza to, że zmienną decyzyjną jest trzejelementowy wektor $\mathbf{war}$ opisujący rozkład jazdy w komunikacji miejskiej. Elementy wektora $\mathbf{war}$ przyjmują wartości ze zbioru rozwiązań dopuszczalnych $\mathbf{WAR}$ identyfikującego wszystkie możliwe rozkłady jazdy w węźle spełniające założenia i ograniczenia zdefiniowane w zadaniu optymalizacyjnym. Rozkład jazdy w autobusowej komunikacji miejskiej poddawany jest modyfikacjom w trakcie synchronizacji rozkładów jazdy.

W sformułowanym zadaniu optymalizacyjnym poprzez dobór wartości dla elementów wektora $\mathbf{war}$ kształtowana jest synchronizacja rozkładów jazdy, wpływając na czas oczekiwania pasażerów w procesie zmiany środka transportu. Realizowanym w pracy zadaniem jest dobór wartości elementów $\mathbf{war}_{j\alpha}$ wektora $\mathbf{war}$. Zmiana wartości wskazanych zmiennych powoduje zmiany planowanych momentów realizacji kursów autobusowej linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy. Celem działania jest minimalizacja średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej. Jest to zagadnienie tym trudniejsze, że równocześnie dokonywane są zmiany momentów odjazdów dla wielu kursów, a na czas oczekiwania wpływają czynniki o charakterze stochastycznym. Powoduje to, że w poszczególnych rozpatrywanych pojedynczych realizacjach procesu zmiany środka transportu rzeczywiste momenty wystąpienia zdarzeń nie odpowiadają planowanym momentom. Stopień niezgodności, niedopasowania jest różny, opisany rozkładami prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłek od rozkładu jazdy.

5. Metoda synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym

5.1. Założenia i ogólny schemat metody

W proponowanej metodzie realizowane jest systematyczne przeszukiwanie rozwiązań dopuszczalnych opisanych zbiorem **WAR**. W procedurze w wyniku przeglądu sąsiedztwa bieżącego rozwiązania **WARS(war*)** wybierane jest rozwiązanie, które zapewnia najkrótszy średni czas oczekiwania pasażerów na odjazd autobusem komunikacji miejskiej ze stanowiska przystankowego w węźle przesiadkowym. W proponowanej metodzie zastosowano opracowany model węzła przesiadkowego i jego otoczenia oraz zadanie optymalizacyjne synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym.

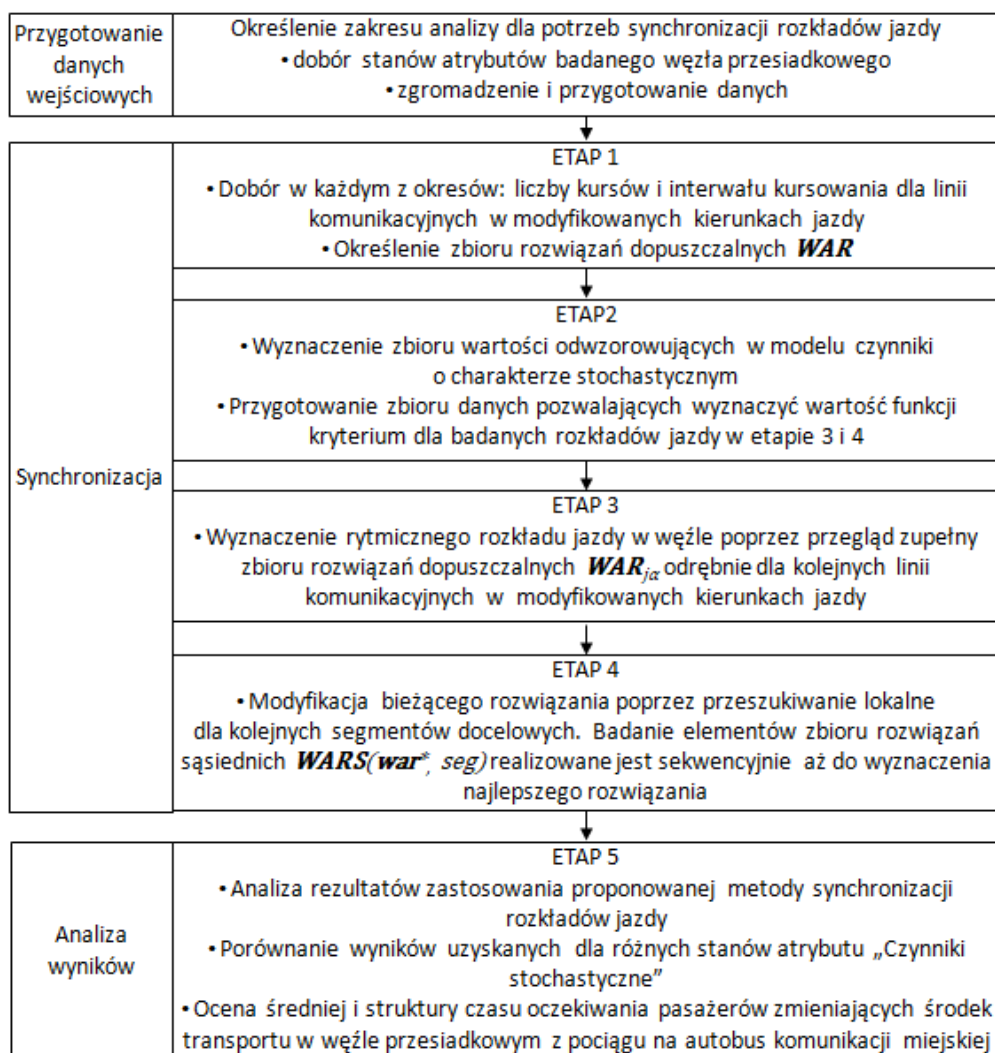
W celu jednoznacznego określenia przyjętych w pracy zasad rozwiązania zadania optymalizacyjnego oraz spełnienia warunków funkcjonowania węzła przesiadkowego i obsługujących go linii komunikacyjnych przez wyznaczone rozwiązanie przyjęto następujące założenia dotyczące sposobu i warunków synchronizacji rozkładów jazdy realizowanej proponowaną metodą:

- 1) procedura przeznaczona jest do stosowania w pojedynczych węzłach przesiadkowych,
- 2) synchronizacja obejmuje budowę rozkładów jazdy w całym okresie funkcjonowania węzła, poprzez dostosowywanie do czasoprzestrzennej struktury zgłaszanego zapotrzebowania na realizację podróży,
- 3) najmniejszy dopuszczalny interwał $h(j\alpha, o)$ dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w okresie o wynosi 30 min, zgodnie z zaleceniami dotyczącymi roli i zapewnienia synchronizacji rozkładów jazdy przyjętymi m.in. w pracach [215, 217].
- 4) synchronizacja rozkładów jazdy i dobór wartości charakterystyk dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy realizowane są z perspektywy pasażera. Kluczowy jest wynikowy rozkład jazdy wszystkich linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy, które zapewniają połączenie węzła przesiadkowego z poszczególnymi segmentami, zamiast rozkładu jazdy dla linii komunikacyjnej,
- 5) rozkład jazdy dla linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy ma spełniać wymagania regularności odjazdów pojazdów w okresach o
- 6) synchronizacja realizowana jest w aspekcie czasu podróży pasażerów i zależy od liczby i charakterystyki linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy zapewniających połączenie węzła przesiadkowego z segmentami,
- 7) rzeczywiste momenty odjazdów poszczególnych autobusów w kursach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy nie zależą od liczby i prędkości pasażerów przemieszczających się w tym czasie drogami przejścia,
- 8) minimalizacja średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu realizowana jest wyłącznie poprzez zmiany w rozkładzie jazdy linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy,
- 9) liczba linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy zapewniających połączenie węzła przesiadkowego z segmentami, liczba kursów, interwał $h(j\alpha, o)$ w poszczególnych

okresach σ , układ tras linii pozostają stałe podczas synchronizacji rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym,

- 10) synchronizacja rozkładów jazdy realizowana jest z uwzględnieniem danych wejściowych: układ tras, liczba linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy, liczba kursów i przyjętych dla nich wartości w zastosowaniu metody do opisu rozważanego węzła przesiadkowego.
- 11) zastosowanie metody w istniejących węzłach przesiadkowych do synchronizacji dotychczasowego rozkładu jazdy ma zapewnić dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy regularność odjazdów autobusów przy minimalnych zmianach w dotychczasowej liczbie kursów.

Synchronizacja rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym w zakresie czasu podróży pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na pojazd komunikacji miejskiej realizowana jest w metodzie w pięciu etapach następujących po sobie zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Schemat metody synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym w aspekcie czasu podróży pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej

Źródło: opracowanie własne

W proponowanej metodzie synchronizację poprzedzają następujące, niezbędne działania przygotowawcze:

- zgromadzenie i odpowiednie przygotowanie danych wejściowych, stosowanych w kolejnych etapach analizy rozkładów jazdy,
- analizę dotychczasowego rozkładu jazdy oraz dobór sposobu łączenia taktów i wartości parametrów dla linii komunikacyjnych zapewniających rytmiczność rozkładu jazdy w okresach σ ,
- identyfikację zbioru rozwiązań dopuszczalnych **WAR** i zbioru rozwiązań sąsiednich **WARD(war, seg)**,
- przygotowywanie zbioru pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej **ZS** rozpatrywanego dla potoku pasażerów w węźle przesiadkowym w ujęciu stochastycznym (Etap 2, rysunek 5.1.) stanowiącego podstawowe dane wejściowe dla potrzeb zastosowania metody Monte Carlo przyjętej w pracy do oceny wartości funkcji kryterium charakteryzującej kolejne rozwiązania rozważane w ramach realizacji algorytmu przeszukiwania lokalnego w ramach synchronizacji rozkładów jazdy.

Synchronizacja rozkładów jazdy realizowana jest w dwóch etapach (etap 3 i etap 4, rys. 5.1.). Podstawą oszacowania czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu oraz wyboru najlepszego rozwiązania są dane zawarte w zbiorze **ZS**. Najpierw do zadanego rozkładu jazdy w transporcie kolejowym i zgłaszanego zapotrzebowania na realizację podróży dobierane są kolejno rozkłady jazdy dla linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy poprzez przeszukiwanie zupełne elementów zbiorów **WAR_{j α}** . Dla każdej linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy wyznaczany jest rozkład jazdy, zapewniający najkrótszy czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu. Dopiero w momencie zakończenia etapu 3 wraz ze zbadaniem ostatniej linii komunikacyjnej bieżące rozwiązanie **war*** zawiera rozkład jazdy dla wszystkich linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy, stanowiące punkt wyjścia dla dalszej modyfikacji. W etapie 4 realizowane są równoczesne zmiany rozkładów jazdy dla linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy. W procedurze zastosowano metodę przeszukiwania z tabu w połączeniu z modelowaniem symulacyjnym. Dla kolejnych segmentów badane są skutki modyfikacji rozkładów jazdy dla wszystkich linii komunikacyjnych **JA** zapewniających połączenie węzła z badanym segmentem.

Po wyznaczeniu najlepszego rozwiązania w etapie 5 dokonywana jest ocena wpływu zmian rozkładu jazdy wynikających z zastosowania proponowanej metody i uwzględnianych czynników na wartości przyjętej w rozprawie funkcji kryterium. Ocenie i analizie porównawczej poddawane są rozkłady jazdy wyznaczone dla różnych węzłów przesiadkowych, opisanych różnymi wartościami charakterystyk związanych z funkcjonowaniem transportu zbiorowego i obsługi pasażerów. W tym celu w sposób niezależny od synchronizacji rozkładów jazdy realizowanej we wcześniejszych etapach w etapie 5 zastosowano te same procedury bazujące na modelowaniu symulacyjnym do oceny wyznaczonych wcześniej rozkładów jazdy.

Zakres danych wejściowych wykorzystywany w poszczególnych etapach procedury obliczeniowej przedstawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Zestawienie zakresu zastosowania danych wejściowych w realizacji działań w kolejnych etapach procedury obliczeniowej

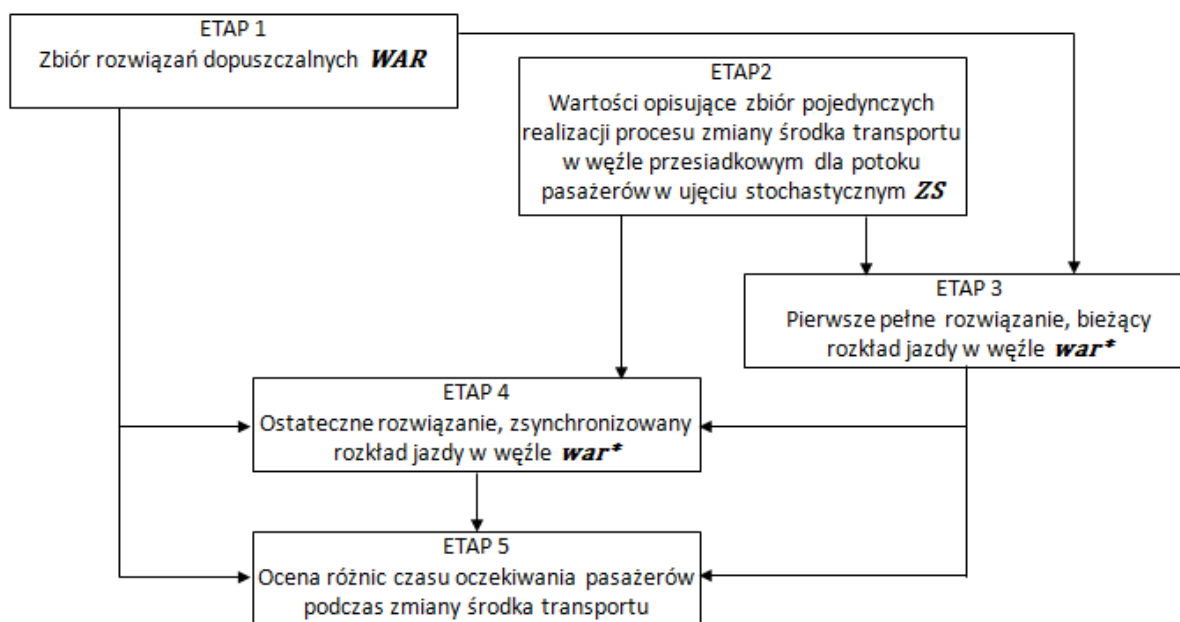
Działania realizowane w etapach	Etap				
	1	2	3	4	5
	Dobór liczby kursów i interwałów dla kierunków jazdy w okresach	Odwzorowanie wpływu czynników stochastycznych na proces zmiany środka transportu przez pasażerów w węźle przesiadkowym	Przeszukiwanie pełnego zbioru rozwiązań dopuszczalnych WAR_{je} dla poszczególnych modyfikowanych kierunków jazdy $\mathcal{A}$	Poprawianie bieżącego rozwiązania war^* poprzez przeszukiwanie lokalne oceniane przy pomocy modelowania symulacyjnego	Ocena wpływu zastosowania metody synchronizacji rozkładów jazdy na czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu
Dane wejściowe					
Dotychczasowy rozkład jazdy w węźle przesiadkowym dla zbioru modyfikowanych kierunków jazdy $\mathcal{A}$	×				×
Układ segmentów			×	×	×
Wielkość potoków pasażerów przemieszczających się w określonych relacjach		×	×		×
Rozkłady prawdopodobieństwa badanych zmiennych stochastycznych		×	×		×
Rozkłady jazdy dla relacji w transporcie kolejowym $\mathcal{JK}$			×		×

Źródło: opracowanie własne

Dane wejściowe do proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy gromadzone są na podstawie analizy organizacji i funkcjonowania węzła przesiadkowego w systemie transportowym. Zadania węzła przesiadkowego i wielkość potoków pasażerów determinowane są przez rozkład jazdy dla linii komunikacyjnych i obszar oddziaływania węzła przesiadkowego, w którym rozpatrywane są segmenty. Zidentyfikowane elementy, wskazane w tabeli 5.1. stanowią podstawę opisu etapów podróży pasażerów związanych z węzłem przesiadkowym i wpływają na wyniki uzyskiwane przy pomocy proponowanej metody. Dane wejściowe stanowią ważny element analizy nie tylko we wstępie, w celu doboru parametrów w zadaniu optymalizacyjnym, ale opisują funkcjonowanie węzła przesiadkowego i bezpośrednio rozpatrywane są w kolejnych etapach metody. Poszczególne dane wejściowe w różnym stopniu stosowane są w proponowanej metodzie. Kluczowe znaczenie w realizacji algorytmu mają segmenty, rozkład jazdy w transporcie kolejowym i rozkład jazdy dla linii komunikacyjnych w niemodyfikowanych kierunkach jazdy.

Wyznaczenie parametrów dla rozkładów prawdopodobieństwa służy odwzorowaniu w metodzie stochastycznego charakteru procesu zmiany środka transportu w postaci zbioru $\mathbf{ZS}$. W związku z wykonywaną oceną czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z pociągu na autobus komunikacji miejskiej w etapach 4

i 5 stosowany jest zbiór danych wejściowych (tabela 5.1) w celu oceny funkcjonowania węzła przesiadkowego. Jest to spowodowane realizacją synchronizacji w całym okresie funkcjonowania węzła oraz łącznie dla wszystkich rozpatrywanych segmentów docelowych. Oszacowanie wartości funkcji kryterium realizowane jest nie tylko podczas synchronizacji (etap 3 i 4) ale również podczas oceny wyznaczonych rozwiązań (etap 5). Dlatego w sposób niezależny od synchronizacji rozkładów jazdy realizowanej we wcześniejszych etapach w etapie 5 zastosowano identyczne procedury bazujące na modelowaniu symulacyjnym do oceny wyznaczonych rozkładów jazdy i uwzględniono ten sam zakres danych wejściowych. Powiązania rezultatów poszczególnych etapów postępowania podczas synchronizacji rozkładów jazdy przedstawiono na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Rezultaty etapów metody ze wskazaniem zakresu zastosowania wyników częściowych w dalszych działaniach w metodzie synchronizacji rozkładów jazdy

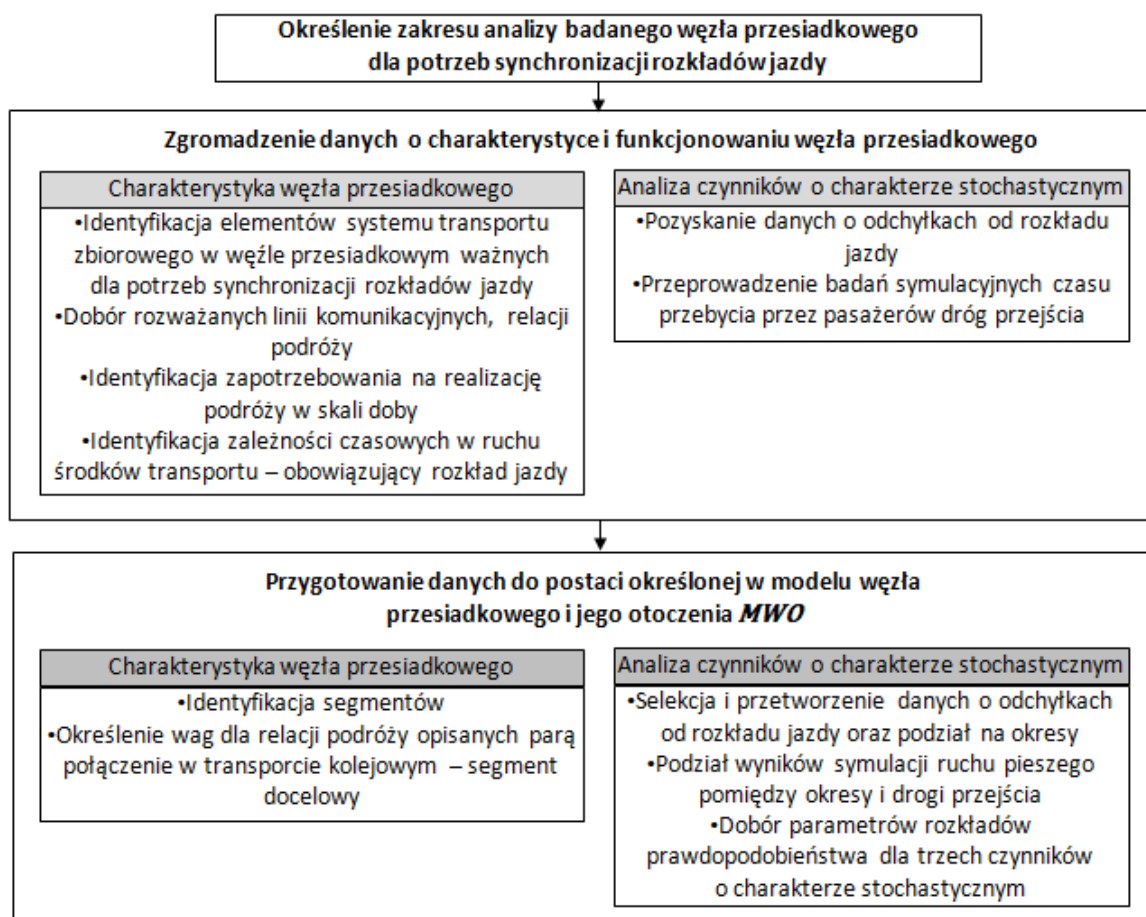
Źródło: opracowanie własne

Etapy 1 i 2 mają charakter działań przygotowawczych. Dobrane liczby kursów w okresach o determinują elementy wyznaczanego w etapie 1 zbioru dopuszczalnych rozkładów jazdy stosowanego przez cały czas realizacji metody. Dobrana liczba kursów wpływa na czas oczekiwania pasażerów realizujących podróż w poszczególnych relacjach. Najwięcej danych wyznaczonych w kolejnych etapach analizy znajduje zastosowanie w etapie 4, w trakcie którego wyznaczany jest wynikowy rozkład jazdy tzn. zsynchronizowany z zastosowaniem proponowanej metody, spełniający przyjęte założenia i uwzględniający wymagane czynniki.

W etapie 5 w znacznie mniejszym zakresie niż we wcześniejszych etapach zastosowano rezultaty wcześniejszych prac w ramach metody. Podstawę analizy stanowiły jedynie wyznaczone, zsynchronizowane rozkłady jazdy **war*** poddane ocenie w etapie 5. W tym celu zastosowano wyznaczony w etapie 2 zbiór pojedynczych realizacji zmiany środka transportu zastosowanych do oszacowania wartości średnich czasu oczekiwania badanego zbioru przypadków testowych.

5.2. Przygotowanie danych wejściowych

Zastosowanie proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy wymaga zapewnienia danych o organizacji i funkcjonowaniu węzła przesiadkowego zarówno w zakresie systemu transportu zbiorowego, wielkości i charakterystyk potoków pasażerów, jak i skutków oddziaływania zakłóceń w sieci transportu drogowego w otoczeniu węzła przesiadkowego na ruch pojazdów transportu zbiorowego skutkującego odchyłkami od rozkładu jazdy. Sposób postępowania podczas przygotowywania danych wejściowych przedstawiono na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Schemat ogólny sposobu przygotowania danych wejściowych do proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy

Źródło: opracowanie własne

Działania w ramach przygotowywania danych wejściowych realizowane są w trzech krokach:

- 1) określenia zakresu niezbędnych danych,
- 2) zgromadzenia danych charakteryzujących funkcjonowanie węzła przesiadkowego w aspekcie realizacji podróży,
- 3) przygotowanie danych do postaci zgodnej z opracowanym zadaniem optymalizacyjnym.

Analiza węzła musi być prowadzona w taki sposób, aby zgromadzone dane odpowiadały zakresowi i strukturze modelu zdefiniowanemu w rozdziale trzecim. Ze względu na złożoność

zagadnienia podczas przygotowywania i analizy danych wejściowych oddzielnie rozważano charakterystykę węzła przesiadkowego i jego otoczenia oraz czynniki o charakterze stochastycznym. Czynniki o charakterze stochastycznym należy opisać poprzez wyznaczone wartości parametrów rozkładu prawdopodobieństwa cechującymi regularne warunki ruchu. Charakterystyka węzła powinna odwzorowywać sposób realizacji zmiany środka transportu przez pasażerów. Zakres danych wejściowych wynika z potrzeby, dla której stosowana jest w danym węźle przesiadkowym proponowana metoda synchronizacji rozkładów jazdy.

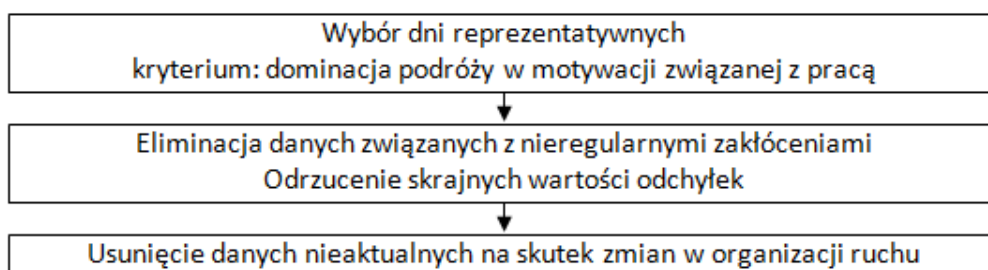
Charakterystyka węzła przesiadkowego

Przed zastosowaniem metody synchronizacji rozkładów jazdy konieczne jest określenie zakresu oraz wskazanie relacji podróży, w których w węźle przesiadkowym ma być zapewniony zsynchronizowany rozkład jazdy. W proponowanej metodzie rozkład jazdy dostosowywany jest do potrzeb pasażerów wyrażonych m.in. wielkością potoków pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym i liczbą pasażerów chcących dotrzeć do poszczególnych segmentów docelowych. Przed rozpoczęciem prac należy wskazać jako daną wejściową: liczbę linii komunikacyjnych w modyfikowanych i niemodyfikowanych kierunkach jazdy, liczbę relacji podróży, liczbę segmentów oraz zbiory kierunków jazdy obsługujących poszczególne segmenty, wyznaczone na podstawie układu tras linii komunikacyjnych.

Analiza czynników o charakterze stochastycznym

W celu zastosowania opracowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy niezbędne są dane charakteryzujące przyjęte w pracy czynniki o charakterze stochastycznym. Analizie należy poddać w tym zakresie **dane o odchyłkach od rozkładu jazdy** rejestrowane w badanym węźle przesiadkowym a następnie przygotować i sprowadzić do postaci umożliwiającej bezpośrednie zastosowanie w opracowanym narzędziu wspomagającym realizację opracowanego algorytmu.

W synchronizacji rozkładów jazdy uwzględniane są regularne odchyłki od rozkładu jazdy wyznaczone w rezultacie selekcji danych realizowanej w trzech krokach przedstawionych na rysunku 5.4. Działania realizowane są odrębnie dla każdego kierunku jazdy w kolejnych okresach o.



Rys. 5.4. Schemat procedury selekcji odchyłek od rozkładu jazdy rejestrowanych na peronach i stanowiskach przystankowych wchodzących w skład węzła

Źródło: opracowanie własne

Celem eliminacji realizowanej w pierwszym kroku jest odrzucenie danych związanych ze zmianami udziału ruchu o różnym charakterze będących skutkiem zmian aktywności

i motywacji realizacji podróży. Podstawę identyfikacji stanowi kalendarz powszechny oraz organizacja roku szkolnego. Rezultatem działań jest usunięcie wszystkich danych dla tygodni, w których wystąpił dzień ustawowo wolny od pracy.

Podstawą działania w kroku 2 jest założenie, że obserwowany, nietypowy poziom odchyłek od rozkładu jazdy wywoływany jest przez czasowe zmiany w warunkach ruchu powodowane przez czynniki zewnętrzne m.in. skutki kolizji i awarii, tymczasową organizację ruchu, okazjonalne imprezy masowe. W kroku trzecim przyjmuje się jako okres referencyjny miesiąc charakteryzujący się aktualnymi, regularnymi warunkami ruchu w sieci transportowej, w których w najbliższej przyszłości funkcjonować będzie węzeł przesiadkowy. Eliminacja obejmuje zbiory danych, które cechuje istotnie różny poziom odchyłek od rozkładu jazdy. Wskazane zróżnicowanie związane jest z długoterminowymi zmianami:

- organizacji ruchu na skutek m.in. inwestycji infrastrukturalnych oraz
- realizacji zadań transportowych w transporcie pasażerskim, w tym tras i rozkładu jazdy.

Przyjęty schemat postępowania zastosowano zarówno do analiz danych o odjazdach pojazdów w komunikacji miejskiej jak i danych o przyjazdach pociągów w transporcie kolejowym.

Rozkład czasu przebycia każdej drogi przejścia w poszczególnych okresach o w węźle przesiadkowym wyznaczany jest z zastosowaniem modeli symulacyjnych ruchu pieszych skonstruowanych przy użyciu dedykowanego środowiska, specjalizowanego we wskazanych zagadnieniach modelowania.

Zastosowanie narzędzia pozwala odwzorować w analizie proces zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym obejmującym wysiadanie pasażerów z pociągów, opuszczenia węzła przesiadkowego przez pasażerów kończących podróż oraz przemieszczania pasażerów drogami przejścia podczas zmiany środka transportu. Ważnym, ściśle powiązanym zagadnieniem jest analiza wzajemnych oddziaływań pasażerów przemieszczających się w potoku mających wpływ na zmiany w prędkości przemieszczania się potoku zależnie od struktury pasażerów wchodzących w skład potoku, cech geometrycznych dróg przejścia i zachowania poszczególnych podróżnych.

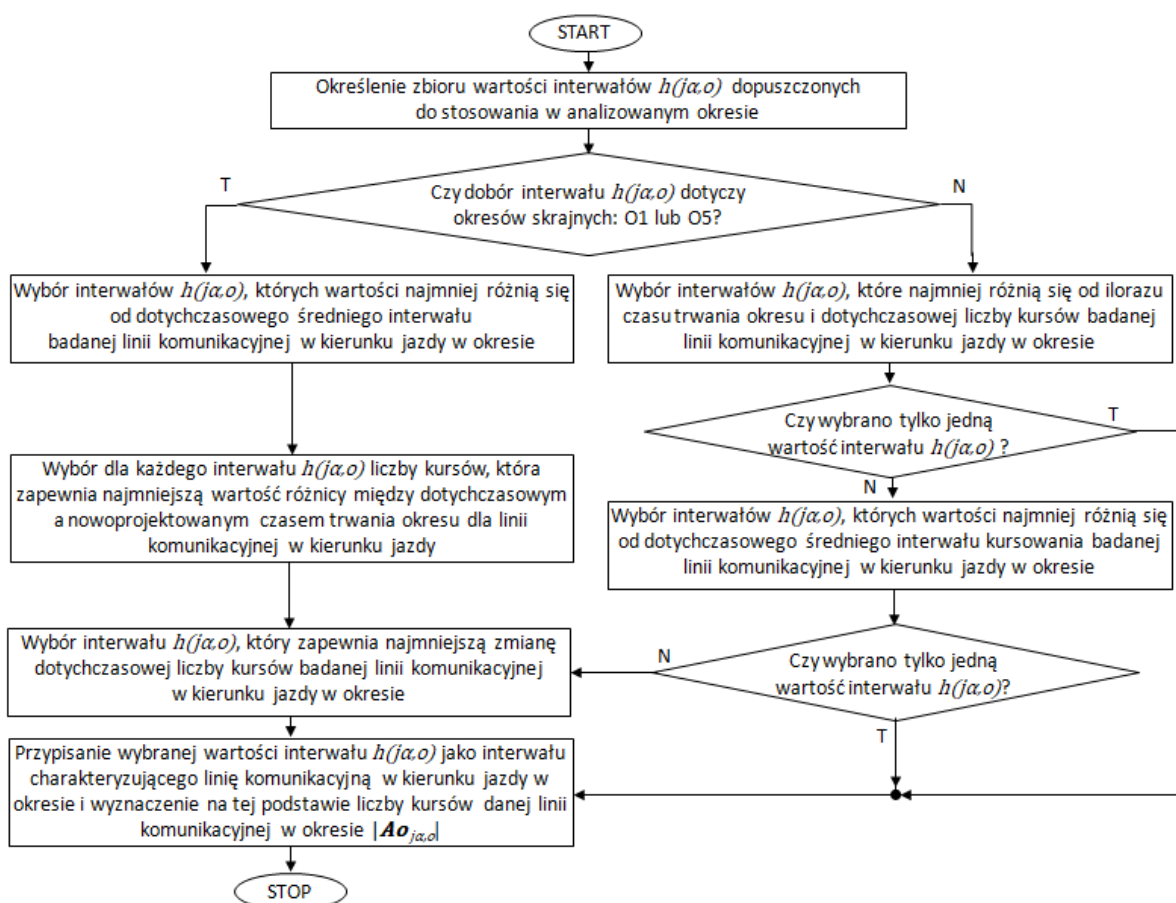
5.3. Etap 1 – działania prowadzące do wyznaczenia zbioru rozwiązań dopuszczalnych

Zadaniem etapu 1 jest spełnienie wymagań regularności odjazdów przy uwzględnieniu wielkości zgłaszanego zapotrzebowania na przewozy transportem pasażerskim w węźle przesiadkowym i dostępnych zasobów środków transportu. Rozkład jazdy obowiązujący w węźle przesiadkowym charakteryzują nieregularny interwał między odjazdem ze stanowisk przystankowych kolejnych autobusów komunikacji miejskiej. Podstawą analizy i zmian rozkładu jazdy jest dotychczasowy rozkład jazdy obowiązujący w węźle. Celem procedury w etapie 1 jest wybór takiego stałego interwału $h(ja, o)$ ze zbioru dopuszczalnych wartości, który zapewni wprowadzenie jak najmniejszych zmian w liczbie kursów i odstępach czasu między odjazdami kolejnych autobusów komunikacji miejskiej względem dotychczasowego

rozkładu jazdy. Dopuszczalne wartości interwału $h(j\alpha, o)$ należy wskazywać odrębnie dla każdego okresu o .

Realizacja działań w etapie 1 jest rozpoczynana od jednoznacznego przypisania każdego kursu realizowanego według aktualnie obowiązującego rozkładu jazdy do okresu o . Liczba kursów realizowanych w dotychczasowym rozkładzie jazdy i wartości średniego odstępu czasu między odjazdami kolejnych autobusów komunikacji miejskiej określana jest osobno dla każdej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w okresie o . Dobór parametrów dla linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy determinuje elementy zbioru rozwiązań dopuszczalnych **WAR** spełniających zdefiniowane w podrozdziale 4.3 ograniczenia w zakresie budowy rozkładu jazdy.

Procedura wyboru stałego interwału $h(j\alpha, o)$ dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w okresie o realizowana jest z zastosowaniem maksymalnie trzech punktów decyzyjnych i została przedstawiona na rysunku 5.5.



Rys. 5.5. Schemat ogólny algorytmu doboru stałego interwału w kursach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w okresach $h(j\alpha, o)$

Źródło: opracowanie własne

Procedura postępowania w zakresie doboru stałego interwału $h(j\alpha, o)$ w etapie 1 rozpoczyna się od zdefiniowania ogólnego zbioru różnych stałych interwałów $h(j\alpha, o)$

autobusów komunikacji miejskiej, dopuszczanych do stosowania w metodzie. Następnie procedura przedstawiona na rysunku 5.5. realizowana jest niezależnie dla każdej linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy w okresie o . Procedura polega na eliminowaniu ze zbioru dopuszczalnych stałych interwałów $h(j\alpha, o)$, które nie spełniają zbioru reguł rozszerzanego w kolejnych krokach. Procedura wymaga maksymalnie trzech punktów decyzyjnych by w zbiorze dopuszczanych interwałów pozostała tylko jedna wartość przyjmowana jako stały interwał $h(j\alpha, o)$ autobusów komunikacji miejskiej dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w o -tym okresie stanowiący kluczowy parametr przyjmowany w kolejnych etapach metody synchronizacji rozkładów jazdy.

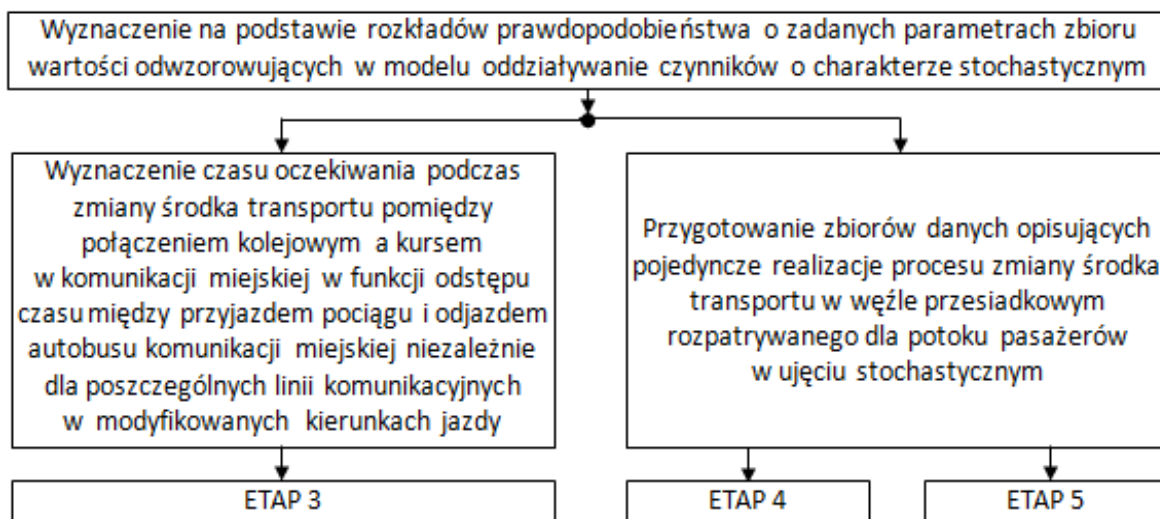
W zależności od tego, czy algorytm jest stosowany w analizie okresów skrajnych $01, 05$ czy w okresach od szczytu porannego 02 do popołudniowego 04 występuje różnica w kolejności i sposobie zastosowania poszczególnych punktów decyzyjnych. W przedstawionej na rysunku 5.5. procedurze realizowanej w okresie pierwszym 01 i piątym 05 dokonywany jest najpierw wybór interwału $h(j\alpha, o)$, do którego dobierana jest liczba kursów, tak aby zapewnić najmniejszą różnicę czasu trwania rozpatrywanego okresu względem aktualnie obowiązującego rozkładu jazdy.

Procedura realizowana dla okresów od drugiego 02 do czwartego 04 (Rys. 5.5.) w większym stopniu niż w okresach skrajnych 01 i 05 koncentruje się na dotychczasowym odstępach między odjazdami kolejnych autobusów w kursach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w okresie o . Podstawą działań jest wybór tych wartości ze zbioru dopuszczalnych interwałów $h(j\alpha, o)$, które cechuje najmniejsza różnica względem ilorazu czasu trwania okresu o i liczby kursów realizowanych w danym okresie. W dalszej kolejności dobierane są stałe interwały $h(j\alpha, o)$, które najmniej różnią się względem dotychczasowego średniego odstępu między odjazdami kolejnych autobusów komunikacji miejskiej. W trzecim kroku, tj. ostateczny wybór interwału $h(j\alpha, o)$ dokonywany jest w taki sposób, aby zapewnić najmniejszą zmianę względem dotychczasowej liczby kursów realizowanych w okresie o . Po dokonaniu doboru dla każdej linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy w okresie o stałego interwału i liczby kursów wyznaczany jest zbiór rozwiązań dopuszczalnych na podstawie zależności i ograniczeń danych wzorami 4-14, 4-15 i 4-16 dla poszczególnych sposobów łączenia taktów.

5.4. Etap 2 – Odzworowanie wpływu czynników o charakterze stochastycznym

Złożoność rozpatrywanego w pracy zagadnienia wynika z oddziaływania na proces zmiany środka transportu przez pasażerów w węźle przesiadkowym czynników o charakterze stochastycznym. W rezultacie poszczególne pojedyncze realizacje procesu zmiany środka transportu zs cechuje odmiennoczas oczekiwania pasażerów $tm(\pi, \mathbf{war}, zs)$. W ramach etapu 2 dla każdej pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu wyznaczane są zbiory wartości charakteryzujących rzeczywiste momenty wystąpienia kluczowych zdarzeń w okresie funkcjonowania węzła stosowane w etapach 3 i 4 do oceny kolejnych rozwiązań podczas synchronizacji rozkładów jazdy i niezależnie w etapie 5 do analizy porównawczej i weryfikacji wyników. W pracy czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym wyznaczany jest z zastosowaniem metody Monte Carlo,

dla której dane wejściowe wyznaczone są właśnie w wyniku realizacji etapu 2 proponowanej metody. Zakres działań realizowanych w ramach etapu 2 przedstawiono na rysunku 5.6.



Rys. 5.6. Schemat sposobu odwzorowania w proponowanej metodzie oddziaływania czynników o charakterze stochastycznym na funkcjonowanie węzła przesiadkowego
Źródło: opracowanie własne

W etapie 2 na podstawie przyjętych jako dane wejściowe rozkładów prawdopodobieństwa:

- wystąpienia odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów $j\kappa$ -tej relacji w transporcie kolejowym w o -tym okresie $Popp(j\kappa, o)$,
- wystąpienia rzeczywistych odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w o -tym okresie $Popo(j\alpha, o)$,
- czasu przebycia p -tej drogi przejścia w o -tym okresie $Ptp(p, o)$,

wyznaczany jest zbiór wartości stosowanych w synchronizacji rozkładów jazdy do szacowania średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym, determinowanego przez rozkład jazdy w węźle, z uwzględnieniem oddziaływania czynników o charakterze stochastycznym na funkcjonowanie węzła.

Analiza w etapie 2 obejmuje zarówno pojedyncze pary połączenie kolejowe – kurs w komunikacji miejskiej jak i cały okres funkcjonowania węzła. W obu podejściach podstawą analizy są rozkłady prawdopodobieństwa charakteryzujące rozpatrywane w dysertacji czynniki o charakterze stochastycznym. Dla par: relacja w transporcie kolejowym, linia komunikacyjna w kierunku jazdy wyznaczone są w okresie o wartości średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym w funkcji odstępu czasu między planowanym momentem przyjazdu pociągu na tor przy peronie i odjazdu autobusu ze stanowiska przystankowego w węźle oraz interwału $h(j\alpha, o)$. Przyjęty sposób analizy bazujący na szacowaniu czasu oczekiwania dla pary połączenie kolejowe, kurs

komunikacji miejskiej powoduje, że raz przygotowane dane mogą być stosowane wielokrotnie w etapie 3, jeśli tylko przyjęte wartości parametrów rozkładów prawdopodobieństwa będą pozostawać aktualne. Realizacja w etapie 2 analizy w ujęciu całego okresu funkcjonowania węzła obejmuje zastosowanie:

- wyznaczonych wartości odwzorowujących oddziaływanie czynników o charakterze stochastycznym,
- bieżącego rozwiązania $\mathbf{war}^*$,

dla potrzeb wyznaczenia wartości:

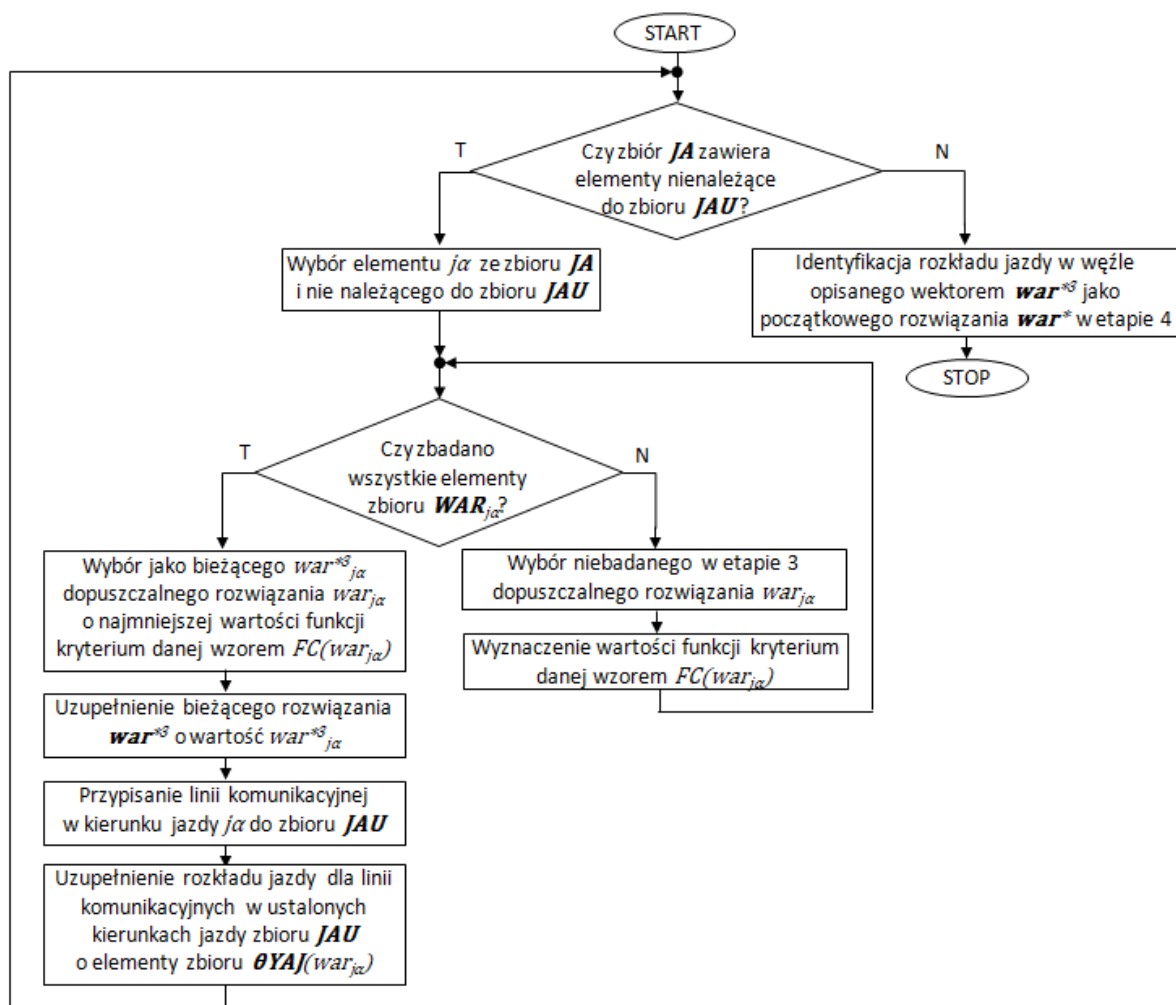
- rzeczywistych momentów wejścia pasażerów na stanowiska przystankowe $\theta\Pi(\pi, zs)$,
- rzeczywistych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej $\theta\mathcal{A}(\alpha, \mathbf{war}^*, zs)$.

W realizowanych działaniach odwzorowano zależności pomiędzy ruchem pieszych i pojazdów w węźle przesiadkowym opisane wzorami 3-43 i 3-45. W rezultacie uzyskiwane są zbiory danych służące charakterystyce pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym rozpatrywanego dla potoku pasażerów, w ujęciu stochastycznym. Ocena czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu dokonywana jest od razu w odniesieniu do rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym, tj. z uwzględnieniem wszystkich kursów dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy.

Wyznaczone w rezultacie etapu 2 zbiory czasów wejścia pasażerów zmieniających środek transportu na stanowisko przystankowe w węźle przesiadkowym $\theta\Pi(\pi, zs)$ oraz wyznaczone w okresach odła par: połączenie kolejowe, kurs w komunikacji miejskiej charakterystyki czasu oczekiwania pasażerów podczas zmiany środka transportu wyrażone w funkcji odstępu czasu między przyjazdem pociągu i odjazdem autobusu oraz interwału $h(j\alpha, o)$ pozostają niezmiennie w kolejnym etapie metody. Natomiast zbiór rzeczywistych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej $\theta\mathcal{A}(\alpha, \mathbf{war}^*, zs)$ jest modyfikowany w trakcie realizacji etapu 4 metody.

5.5. Etap 3 – przeszukiwanie zupełne dla poszczególnych modyfikowanych kierunków jazdy

W ramach etapu 3 dokonywany jest przegląd zupełny zbioru rozwiązań dopuszczalnych $\mathbf{WAR}_{j\alpha}$ dla kolejnych linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy $\widehat{JA}$, zgodnie z procedurą przedstawioną na rysunku 5.7. Celem etapu 3 jest wyznaczenie bieżącego rozwiązania $\mathbf{war}^{*3}$ czyli pierwszego rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym, rozważanego w metodzie, rytmicznego w okresach $h(j\alpha, o)$, spełniającego założenia i ograniczenia przyjęte w pracy.



Rys. 5.7. Schemat budowy bieżącego rozwiązania war^{*3} w etapie 3 proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy
Źródło: opracowanie własne

Procedura etapu 3 rozpoczyna się od wyznaczenia czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środki transportu w węźle przesiadkowym z uwzględnieniem rozkładu jazdy tylko dla transportu kolejowego θYJK i linii komunikacyjnych w niemodyfikowanych kierunkach jazdy θYJA . Na początku etapu 3 do zbioru linii komunikacyjnych w ustalonych kierunkach jazdy JAU należą wyłącznie linie komunikacyjne w niemodyfikowanych kierunkach jazdy JA . W miarę postępowania działań w etapie 3 dodawane do zbioru JAU są kolejne, przeanalizowane linie komunikacyjne w modyfikowanych kierunkach jazdy. Rozkład jazdy linii komunikacyjnych w ustalonych kierunkach jazdy jest niezmienny w dalszej realizacji etapu 3.

W każdej iteracji procedury etapu 3 przedstawionej na rysunku 5.7. planowane momenty odjazdów autobusów komunikacji miejskiej dla linii komunikacyjnych w ustalonych kierunkach jazdy zapewniających połączenie węzła przesiadkowego z segmentem są uzupełniane o planowane momenty odjazdów autobusów komunikacji miejskiej należących

do aktualnie badanego rozkładu jazdy $war_{j\alpha}$ linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy. Stanowi to podstawę oszacowania czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym. Podstawą dokonywanej oceny są:

- odstęp czasu między planowanym momentem przyjazdu pociągu i planowanym momentem odjazdu autobusu komunikacji miejskiej,
- interwał $h(j\alpha, o)$,
- oddziaływanie czynników o charakterze stochastycznym w procesie zmiany środka transportu rozpatrywanego w ujęciu potoku pasażerów.

W etapie 3 podstawą wyznaczenia całkowitego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus w węźle przesiadkowym jest analiza poszczególnych połączeń kolejowych. Dla każdego połączenia wyznaczany jest czas oczekiwania wszystkich pasażerów wysiadających z pociągu w rozważanym połączeniu i kontynuujących podróżę w relacjach komunikacją miejską. Dobór rozkładów jazdy zależy m.in. od liczby linii komunikacyjnych, rozkładu jazdy w transporcie kolejowym, interwałów $h(j\alpha, o)$ linii komunikacyjnych w okresach, układu segmentów i struktury zgłaszanego zapotrzebowania na realizację podróży ze zmianą środka transportu w węźle przesiadkowym. Realizacja przeglądu zupełnego dla badanych linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy pozwala określić wpływ doboru rozkładu jazdy kolejnych kierunków jazdy dodawanych do zbioru $J\mathcal{AU}$ na zmiany czasu oczekiwania.

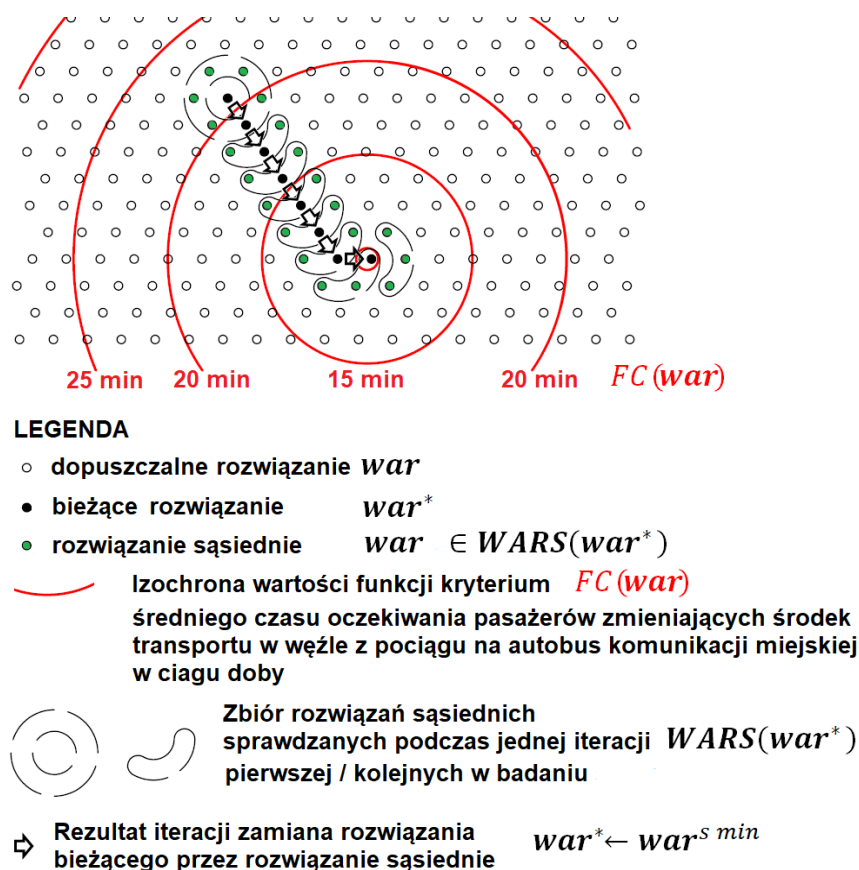
Dla każdego rozwiązania dla linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy $war_{j\alpha}$ ze zbioru $WAR_{j\alpha}$ rozwiązań dopuszczalnych dokonywana jest ocena czasu oczekiwania wszystkich pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym, którzy w realizacji podróży mogą skorzystać m.in. z badanej linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy. Wybierany jest rozkład jazdy $war_{j\alpha}^{*3}$ zapewniający najkrótszy czas oczekiwania. Zbadana linia komunikacyjna w modyfikowanym kierunku jazdy $j\alpha \in \widehat{J\mathcal{A}}$ zostaje zaliczona do zbioru linii komunikacyjnych w ustalonych kierunkach jazdy $J\mathcal{AU}$, zbiór kursów $\mathcal{A}_{j\alpha}$ aktualnie zbadanej linii komunikacyjnej $j\alpha \in \widehat{J\mathcal{A}}$ zostaje dołączony do zbioru kursów ustalonych w komunikacji miejskiej $\mathcal{AU}$ a wybrany rozkład jazdy $war_{j\alpha}^{*3}$ wpływa na obsługę pasażerów i ocenę rozkładów jazdy kolejnych badanych linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy. Oznacza to, że aktualnie badana linia komunikacyjna w modyfikowanym kierunku jazdy obsługuje tylko tych pasażerów, względem których pojazdy w kursach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy zapewniają krótszy czas oczekiwania niż wynika to z obsługi węzła przesiadkowego przez pojazdy w kursach dla linii komunikacyjnych w ustalonych kierunkach jazdy. W proponowanej metodzie synchronizacji rozkładów jazdy dopiero w momencie zakończenia etapu 3 dla każdej linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy dobrane jest rozwiązanie $war_{j\alpha}^{*3}$, wchodzące w skład bieżącego rozwiązania war^{*3} determinującego rozkład jazdy w węźle przesiadkowym.

5.6. Etap 4 – poprawianie bieżącego rozwiązania poprzez przeszukiwanie lokalne

Założenia i ogólne zasady postępowania w procedurze etapu 4

W ramach etapu 4 dokonuje się sprawdzenia czy zmiany rozkładów jazdy realizowane równocześnie dla różnych linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy umożliwiają wyznaczenie rozkładu jazdy zapewniającego krótszy średni czas oczekiwania niż bieżące rozwiązanie, wyznaczone w etapie trzecim war^{*3} i stanowiące punkt wyjścia w niniejszej procedurze.

Do realizacji synchronizacji rozkładów jazdy zastosowano metodę przeszukiwania lokalnego. Podstawą postępowania jest iteracyjne przeszukiwanie zbioru rozwiązań sąsiednich $WARS(war^*)$ dla kolejnych wybieranych bieżących rozkładów jazdy war^* , co w sposób schematyczny przedstawiono na rysunku 5.8.



Rys. 5.8. Schemat zastosowania w pracy metody przeszukiwania lokalnego w synchronizacji rozkładów jazdy w etapie 4

Źródło: opracowanie własne

Procedura realizowana jest w sposób iteracyjny.

- 1) W pierwszym kroku iteracji dla aktualnie wybranego bieżącego rozwiązania oznaczonego w etapie 4 jako war^* identyfikowany jest zbiór rozwiązań sąsiednich $WARS(war^*)$ zdefiniowany zgodnie ze wzorem 4-9 i zawierający te rozwiązania, które

względem wektora **war**^{*} różnią się wartością zmiennej $war_{j\alpha}$ tylko dla jednej linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy.

- 2) W drugim kroku dla tych wskazanych rozwiązań ze zbioru **WARS**(**war**^{*}), które nie były analizowane we wcześniejszych iteracjach wyznaczane są wartości funkcji kryterium.
- 3) W trzecim kroku na podstawie wyznaczonych wartości funkcji kryterium dla rozwiązań zbadanych w bieżącej iteracji identyfikowane jest rozwiązanie, które zapewnia najmniejszy średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym.
- 4) W czwartym, ostatnim kroku wybrane najkorzystniejsze rozwiązanie ze zbioru zbadanych rozwiązań sąsiednich jest definiowane jako nowe bieżące rozwiązanie **war**^{*} i stanowi wejście do kolejnej iteracji, w której rozważany jest zbiór rozwiązań sąsiednich dla wybranego rozkładu jazdy.

W ramach realizacji przeszukiwania lokalnego wykonywana jest skończona liczba iteracji, a w każdej z nich badany jest wpływ zmian rozkładu jazdy dla poszczególnych linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy $\widehat{ja}$ na wartości funkcji kryterium. Dokładna liczba iteracji zależy od zmian wartości funkcji kryterium wyznaczanych dla kolejnych bieżących rozwiązań **war**^{*}. Procedura przeszukiwania lokalnego kończy się w sytuacji, gdy dla wszystkich elementów ze zbioru sąsiednich rozwiązań wartość funkcji kryterium jest większa od wartości funkcji kryterium charakteryzującej bieżące rozwiązanie **war**^{*}. Wtedy przegląd rozwiązań sąsiednich realizowany jest z zastosowaniem metody przeszukiwania z tabu. Dokładna charakterystyka przyjętego sposobu realizacji przeszukiwania lokalnego została przedstawiona w dalszej części podrozdziału, gdzie omawiana jest całość algorytmu zastosowanego w etapie 4.

Podsumowując przyjęty sposób realizacji przeszukiwania lokalnego zastosowany w algorytmie etapu 4 należy wskazać, że liczba:

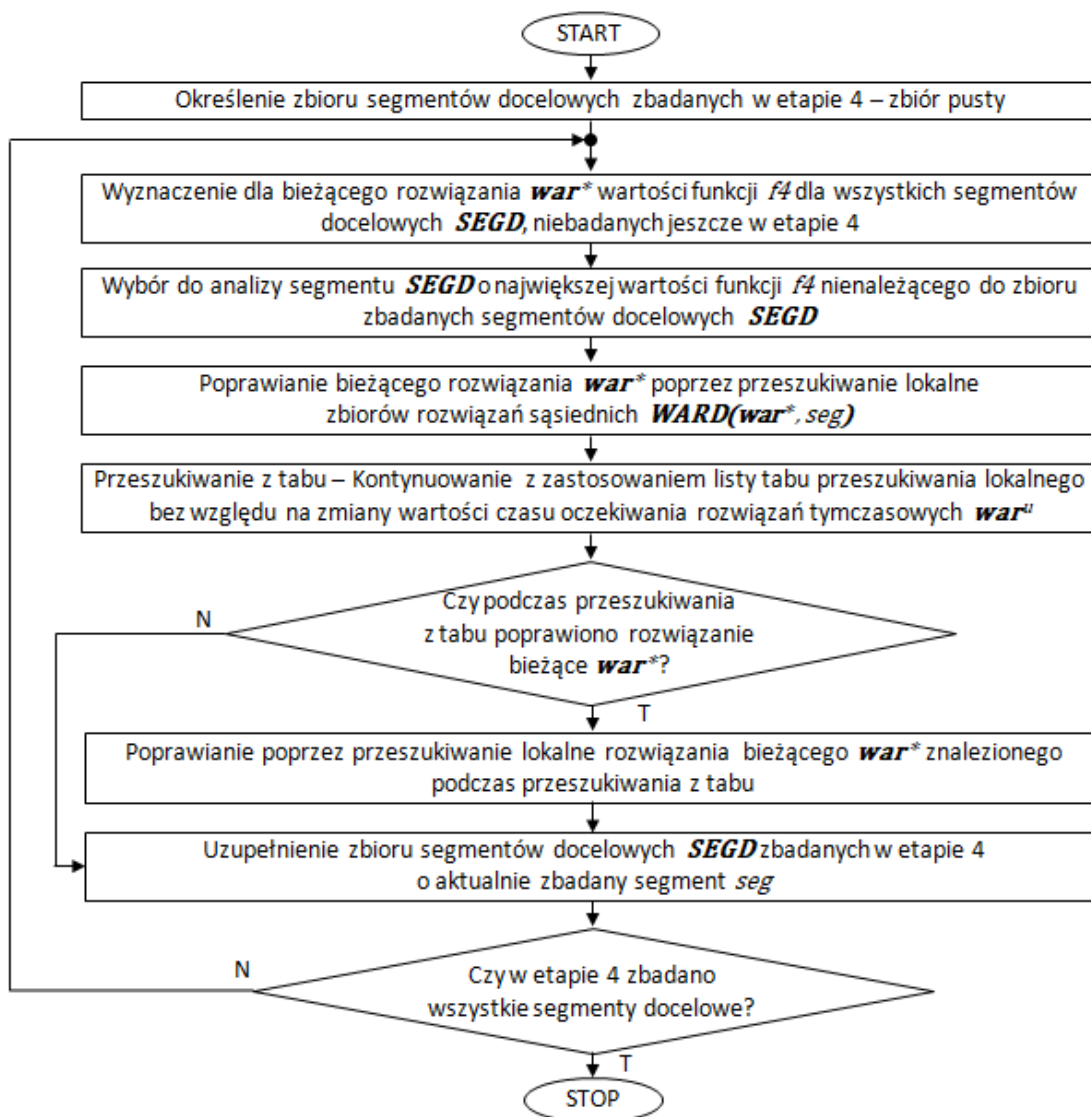
- zmian bieżącego rozwiązania **war**^{*} jest równa liczbie iteracji,
- wszystkich zbadanych rozwiązań jest sumą liczby sąsiednich rozwiązań badanych w każdej iteracji,
- zmian najlepszego ze zbadanych rozwiązań, którym na początku procedury jest bieżące rozwiązanie **war**^{*} jest co najwyżej równa liczbie iteracji, bo zmiana rozwiązania traktowanego jako optymalne⁵ następuje tylko na końcu iteracji, gdy wyznaczone rozwiązanie bieżące cechuje mniejsza wartość funkcji kryterium niż dotychczas zidentyfikowany optymalny rozkład jazdy.

Ideą postępowania w ramach przeszukiwania lokalnego w etapie 4 jest równoczesne rozważanie planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej w kursach dla wszystkich linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy, które wzajemnie się uzupełniają w obsłudze zapotrzebowania na przewozy. Jest to realizowane poprzez dostosowanie

⁵ tzn. rozwiązanie, które w danym momencie realizacji algorytmu determinuje najmniejszą wartość funkcji kryterium spośród wszystkich zbadanych rozwiązań tj. najkrótszy średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu ze wszystkich zbadanych dotychczas rozkładów jazdy.

do rozkładu jazdy w transporcie kolejowym momentów odjazdów autobusów w kursach wszystkich linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy zapewniających połączenie w poszczególnych, rozważanych relacjach. Celem działań jest jak najlepsze rozłożenie w czasie planowanych momentów realizacji wszystkich kursów dla linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy, obsługujących rozważany segment. Oznacza to, że podczas synchronizacji poszukiwany jest rozkład jazdy zapewniający najmniejszy ze zbadanych czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym i realizujących podróż w rozważanej relacji.

Schemat algorytmu stosowanego w etapie 4 przedstawiono na rysunku 5.9.



Rys. 5.9. Schemat przeszukiwania rozwiązań sąsiednich obejmującego modyfikację rozkładów jazdy dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy realizowanego w etapie 4

Źródło: opracowanie własne

W celu znalezienia rozwiązania zapewniającego najkrótszy czas oczekiwania podczas zmiany środka transportu, poprzez iteracyjne poszukiwanie możliwości poprawy rozwiązania wyznaczonego w etapie 3 zastosowano procedurę wielokrotnych startów. Za każdym razem

od nowa rozpoczynana i realizowana jest proponowana procedura przeszukiwania lokalnego. Punktem wyjścia dla procedury przeszukiwania lokalnego jest najlepsze, wyznaczone dotychczas rozwiązanie **war*** (w tym w rezultacie wcześniejszych iteracji etapu 4). Oznacza to, że przeszukiwanie zbioru rozwiązań dopuszczalnych **WAR** wykonywane jest kolejno, dla każdego segmentu należącego do zbioru segmentów docelowych **SEGD**, które obsługiwane są przez co najmniej jedną z linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy $\widehat{ja}$.

Zmiany rozkładu jazdy realizowane podczas synchronizacji, dla poszczególnych segmentów docelowych, w każdej iteracji, dla wszystkich kierunków jazdy skutkują zmianami czasu oczekiwania także dla pasażerów podróżujących do innych segmentów docelowych. Problem ten został scharakteryzowany w punkcie 3.4. Dlatego w ramach etapu 4, podczas przeszukiwania zbioru rozwiązań dopuszczalnych, ocena wpływu zmian rozkładu jazdy na czas oczekiwania pasażerów uwzględnia wszystkie segmenty powiązane z badanym segmentem.

Ze względu na realizację przeszukiwania zbioru sąsiednich rozwiązań, z których każde obejmuje zmianę rozkładu jazdy innej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy, czyli dotyczy zmian rozkładów jazdy na innych segmentach (obsługiwanych) przyjęto w analizie odrębną funkcję pomocniczą $f4(seg, \mathbf{war})$ zdefiniowaną w postaci:

$$f4(seg, \mathbf{war}) = \sum_{\kappa \in \mathcal{KZ}_{seg}} \sum_{\pi \in \Phi_{2\kappa, seg}} \sum_{zs \in \mathcal{ZS}} tm(\pi, \mathbf{war}, zs) \quad (5-1)$$

$seg \in \mathbf{SEGD}, \mathbf{war} \in \mathbf{WAR}$

pozwalającą określić czas oczekiwania odrębnie na segmencie seg dla aktualnie badanego rozwiązania **war**. Dzięki temu w ramach badania skutków zmian rozkładów jazdy dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy obsługujących rozważany segment seg oceniane są zmiany wartości funkcji $f4(seg, \mathbf{war})$ tylko dla tych segmentów docelowych, które są obsługiwane przez aktualnie badaną linię komunikacyjną w kierunku jazdy.

Charakterystyka procedury przeszukiwania lokalnego

Kolejne iteracje procedury rozpoczynają się od wyznaczenia całkowitego czasu oczekiwania wszystkich pasażerów zgodnie z funkcją $f4(seg, \mathbf{war}_v)$, dla każdego, niebadanego jeszcze w etapie 4 segmentu docelowego. Następnie do analizy wybierany jest ten segment docelowy spośród dotychczas nie badanych w etapie 4, którego cechuje największa wartość funkcji $f4$. Działania w etapie 4 rozpoczynają się zatem od segmentów umożliwiających potencjalnie największe skrócenie czasu oczekiwania.

Po dokonaniu wyboru segmentu docelowego seg linie komunikacyjne w modyfikowanych kierunkach jazdy zapewniających połączenie danego segmentu docelowego z węzłem przesiadkowym $\mathbf{JAg1}\alpha_{seg}$ poddawane są analizie możliwości skrócenia czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle poprzez badanie wartości funkcji $f4$ dla rozwiązań sąsiednich $\mathbf{WARD}(\mathbf{war}_{ja}^*, seg)$.

W kolejnych iteracjach dla każdego rozwiązania sąsiedniego względem bieżącego rozwiązania $\mathbf{war}^*$ wyznaczana jest wartość funkcji kryterium. Poszukiwana jest taka zmiana rozwiązania bieżącego na rozwiązanie sąsiednie oznaczone jako $\mathbf{war}^{s\min}$, dla którego wartość funkcji kryterium przyjmuje wartość najmniejszą, spośród wartości charakteryzujących rozwiązania sąsiednie w bieżącej iteracji. Jeśli w danej iteracji znaleziono rozwiązanie lepsze od bieżącego rozwiązania $\mathbf{war}^*$ to staje się ono nowym rozwiązaniem bieżącym zgodnie z zależnością:

$$\mathbf{war}^{s\min} = \min_{\mathbf{war} \in \mathbf{WARD}(\mathbf{war}^*, \text{seg})} \{FC(\mathbf{war})\} \quad (5-2)$$

$$FC(\mathbf{war}^{s\min}) < FC(\mathbf{war}^*) \Rightarrow \mathbf{war}^* \leftarrow \mathbf{war}^{s\min}$$

gdzie $\mathbf{war}^* \leftarrow \mathbf{war}^{s\min}$ oznacza, że znalezione w danej iteracji rozwiązanie $\mathbf{war}^{s\min}$ o najmniejszej wartości funkcji kryterium zastępuje dotychczasowe rozwiązanie bieżące $\mathbf{war}^*$. Jeśli warunek dany wzorem 5-2 nie jest spełniony, tzn.:

$$FC(\mathbf{war}^{s\min}) \geq FC(\mathbf{war}^*) \quad (5-3)$$

rozpoczynana jest analiza zbioru rozwiązań sąsiednich metodą przeszukiwania z tabu o ustalonej liczbie iteracji.

Przeszukiwanie z tabu

Przeszukiwanie z tabu zastosowano w rozprawie w celu sprawdzenia czy po osiągnięciu lokalnego minimum w przeszukiwaniu rozwiązań sąsiednich dalsze modyfikacje rozwiązania pozwolą skrócić średni czas oczekiwania. Liczba iteracji przeszukiwania z tabu jest równa podwojonej liczbie linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy, które zapewniają połączenie badanego segmentu z węzłem przesiadkowym.

W przypadku zdefiniowanych sposobów łączenia taktów konstruowana jest lista tabu zabraniająca powtórzenia ostatnich ruchów w liczbie równej podwojonej liczbie modyfikowanych kierunków jazdy, które zapewniają połączenie badanego segmentu z węzłem przesiadkowym. W momencie rozpoczynania przeszukiwania z tabu lista tabu jest pusta i jest uzupełniana w trakcie realizacji badania. Za ruch uważane jest w pracy zastąpienie rozkładu jazdy jednej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy $\mathbf{war}_{j\alpha}$ rozwiązaniem sąsiednim. Wykonanie danego ruchu powoduje jednocześnie wpisanie na listę tabu ruchu przeciwnego, czyli powrotu, zmiany bieżącego rozwiązania do rozwiązania analizowanego we wcześniejszej iteracji. Dzięki temu podczas przeszukiwania analizowane są kolejne dopuszczalne rozkłady jazdy zapobiegając występowaniu problemów wynikających z lokalnego optimum.

Działanie w procedurze przeszukiwania z tabu dla danego segmentu docelowego rozpoczyna się od utworzenia tymczasowego rozwiązania oznaczonego jako $\mathbf{war}^u$, tj. skopiowania bieżącego rozwiązania $\mathbf{war}^*$, najkorzystniejszego ze wszystkich zbadanych dotąd rozwiązań i zapisaniu jako wektor $\mathbf{war}^u$. Przy rozpoczęciu przeszukiwania z tabu elementy obu wektorów mają jednakowe wartości. W trakcie realizacji przeszukiwania z tabu wektor $\mathbf{war}^u$ będzie poddawany modyfikacji. Dzięki temu w przypadku, gdy w rezultacie przeszukiwania z tabu nie zostanie znalezione rozwiązanie lepsze niż $\mathbf{war}^*$ badanie

kolejnego segmentu będzie rozpoczynane od oceny rozwiązań sąsiednich dla bieżącego rozwiązania $\mathbf{war}^*$.

W każdej iteracji przeszukiwania z tabu sprawdzane są wartości funkcji kryterium dla rozwiązań należących do zbioru rozwiązań sąsiednich $\mathbf{WARD}(\mathbf{war}^u, \text{seg})$ z wyłączeniem rozwiązań wpisanych na listę tabu. Następnie spośród sprawdzonych rozwiązań sąsiednich wybierane jest do następnego kroku jako tymczasowe rozwiązanie $\mathbf{war}^u$, to rozwiązanie które cechuje najmniejsza wartość funkcji kryterium. Działania te realizowane są zgodnie z zależnością:

$$\mathbf{war}^u \leftarrow \mathbf{war}^{s \min} = \min_{\mathbf{war} \in \mathbf{WARD}(\mathbf{war}^u, \text{seg})} \{FC(\mathbf{war})\} \quad (5-4)$$

$$FC(\mathbf{war}^u) < FC(\mathbf{war}^*) \Rightarrow \mathbf{war}^* \leftarrow \mathbf{war}^u$$

gdzie $\mathbf{war}^u \leftarrow \mathbf{war}^{s \min}$ oznacza zmianę rozwiązania tymczasowego $\mathbf{war}^u$ w każdej iteracji przeszukiwania z tabu bez względu na relację pomiędzy wartościami funkcji kryterium dla rozwiązań: tymczasowego $\mathbf{war}^u$ i cechującego się spośród wszystkich rozwiązań sąsiednich względem rozwiązania tymczasowego najmniejszą wartością średniego czasu oczekiwania (oznaczonego jako $\mathbf{war}^{s \min}$). Ponadto każde rozwiązanie tymczasowe $\mathbf{war}^u$ jest porównywane z dotychczas znalezionym bieżącym rozkładem jazdy $\mathbf{war}^*$ tzn. charakteryzującym się najmniejszym wyznaczonym czasem oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej. Jeśli w toku przeszukiwania z tabu znalezione zostało rozwiązanie o mniejszej wartości funkcji kryterium niż wartość funkcji kryterium dla rozwiązania bieżącego $FC(\mathbf{war}^*)$ to staje się ono równocześnie nowym rozwiązaniem bieżącym zgodnie ze wzorem 5-4.

Przeszukiwanie lokalne dla rozwiązania wyznaczonego metodą przeszukiwania z tabu

Dopiero po zakończeniu wszystkich kroków przeszukiwania z tabu sprawdzane jest czy podczas realizacji przeszukiwania z tabu poprawiono dotychczasowe rozwiązanie bieżące $\mathbf{war}^*$. Jeśli tak to ponownie dla badanego segmentu docelowego, dla nowego, wyznaczonego w ramach przeszukiwania z tabu rozwiązania bieżącego realizowane jest przeszukiwanie lokalne. Celem tego działania jest próba dalszego poprawienia rozwiązania znalezione w trakcie przeszukiwania z tabu, w którym dobór rozwiązań ograniczony był liczbą kroków i listą tabu. Punktem wyjścia w drugim dla segmentu przeszukiwaniu lokalnym jest najlepsze dotychczas znalezione rozwiązanie tymczasowe a tym samym bieżące $\mathbf{war}^* \equiv \mathbf{war}^u$. Procedura przeszukiwania lokalnego dla danego segmentu docelowego kończy się, gdy nie jest możliwe dalsze poprawianie rozwiązania $\mathbf{war}^u$ zawierającego najkrótszy średni czas oczekiwania pasażerów podczas zmiany środka transportu spośród wszystkich rozkładów jazdy w węźle zbadanych podczas procedury.

Po przeprowadzeniu analizy dla wszystkich segmentów docelowych wektor $\mathbf{war}^*$ determinuje najlepszy ze wszystkich zbadanych w pracy rozkładów jazdy w węźle co kończy etap 4 oraz cały tok postępowania w opracowanej metodzie w zakresie procedury synchronizacji rozkładów jazdy, przeglądu i wyboru dopuszczalnych rozwiązań.

5.7. Etap 5 – ocena wpływu zastosowania metody synchronizacji rozkładów jazdy na czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu

Ideą postępowania przyjętą w etapie 5 jest sprawdzanie jak uwzględnienie oddziaływania wybranych czynników o charakterze stochastycznym podczas synchronizacji rozkładów jazdy wpływa na czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej. W tym celu należy zastosować proponowaną metodę do zbioru przypadków testowych a następnie poddać analizie porównawczej czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu charakteryzujący wyznaczone, zsynchronizowane rozkłady jazdy. Dla potrzeb pracy w niniejszym punkcie rozszerzono opis formalny aspektów procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym rozpatrywanych w rozdziałach 3 i 4. Dokonano w tym zakresie uzupełnienia zapisu związanego z badaniem rozkładów jazdy opisujących zbiór porównywanych przypadków testowych, w tym o miary przyjęte w pracy dla potrzeb analizy porównawczej rozkładów jazdy.

Zbiór przypadków testowych zdefiniowano w postaci:

$$\mathbf{V} = \{1, \dots, v, v', \dots, |\mathbf{V}|\} \quad (5-5)$$

gdzie $|\mathbf{V}|$ oznacza liczebność zbioru $\mathbf{V}$ i ma interpretację łącznej liczby przypadków testowych rozważanych w analizie.

Dla potrzeb pracy uzupełniono oznaczenia wybranych zmiennych o indeks v identyfikujący w analizie porównawczej w rozdziale 6 przypadek testowy, który opisuje rozpatrywaną zmienną. Uzupełnienie oznaczenia wprowadzone zostało dla czterech zmiennych. Są to:

- zmienna decyzyjna determinująca rytmiczny w okresach rozkład jazdy dla v -tego przypadku testowego oznaczona jako $\mathbf{war}_v^*$,
- zbiór pasażerów zmieniających środek transportu w rozważanym v -tym przypadku testowym Π_v o elementach oznaczonych jako π_v oraz zbiór pasażerów zmieniających środek transportu, którzy przyjechali do węzła pociągiem w o -tym okresie $\Pi_{v,o}$ o elementach oznaczonych jako $\pi_{v,o}$, w rozważanym v -tym przypadku testowym,
- zbiór kursów dla linii w komunikacji miejskiej obsługujących węzeł przesiadkowy v -tym przypadku testowym $\mathcal{A}_v$ o elementach oznaczonych jako α_v i wyróżnione na tej podstawie podzbiory kursów realizowanych dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy $\mathcal{A}_{j\alpha}$ oraz kursów realizowanych dla linii komunikacyjnej w $j\alpha$ -tym kierunku jazdy w o -tym okresie $\mathcal{A}_{o,j\alpha}$ w rozważanym v -tym przypadku testowym,
- zbiór pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym z pociągu na autobus komunikacji miejskiej dla potoku pasażerów w ujęciu stochastycznym $\mathbf{ZS}_v$ odwzorowujących warunki ruchu w v -tym przypadku testowym.

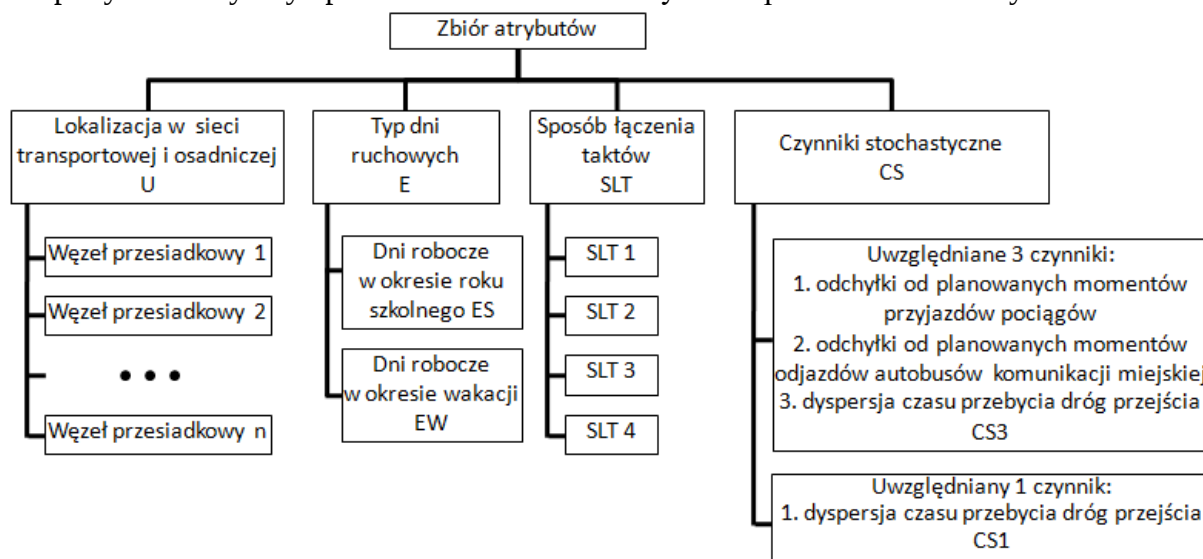
W pracy przyjęto, że przypadki testowe są to węzły przesiadkowe różnicowane dodatkowo konfiguracją stanów przypisanych w każdym z atrybutów rozpatrywanych w rozprawie. Cechy węzła przesiadkowego jako przedmiotu badań stanowiącego w pracy podstawę

definicji zbioru przypadków testowych opisujących parametry synchronizacji rozkładów jazdy i poddawanych testom, zagregowano w ramach czterech atrybutów, stosowanych dla potrzeb identyfikacji, charakterystyki i grupowania przypadków testowych.

Atrybuty charakteryzują węzeł przesiadkowy i transport zbiorowy w obszarze oddziaływania węzła przesiadkowego. Zbiór Q numerów przyjętych w pracy atrybutów opisujących węzły przesiadkowe określono w postaci:

$$Q = \{1, \dots, q, \dots, 4\} \equiv \{U, CS, E, SLT\} \quad (5-6)$$

Rozpatrywane atrybuty opisane zbiorem stanów atrybutów przedstawiono na rysunku 5.10.



Rys. 5.10. Zbiór atrybutów charakteryzujących węzły przesiadkowe wraz ze stanami przypisanymi w atrybutach i będących podstawą definicji przypadków testowych

Źródło: opracowanie własne

Każdy przypadek testowy z rozważanego w pracy zbioru V posiada unikalne cechy. Przyjęto w pracy, że cechy węzłów przesiadkowych agregowane są w ramach czterech następujących atrybutów:

- lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej,
- typ dni ruchowych,
- sposób łączenia taktów,
- czynniki stochastyczne.

Atrybut „**Lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej**U” odwzorowuje rolę węzła przesiadkowego w systemie transportowym. Wśród cech węzłów przesiadkowych opisywanych w atrybucie, istotnych w zakresie synchronizacji rozkładów jazdy dla potrzeb pracy wskazano:

- elementy systemu transportowego w węźle przesiadkowym - liczbę i rozmieszczenie przestrzenne peronów, stanowisk przystankowych, charakterystykę dróg przejścia,
- elementy systemu transportowego w obszarze oddziaływania węzła przesiadkowego – liczbę linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy, liczbę relacji w transporcie kolejowym, liczbę i układ segmentów,

- zapotrzebowanie na realizację przewozów - wyrażone liczbą podróży realizowanych w poszczególnych relacjach,
- zależności czasowe – obowiązujący rozkład jazdy determinujący liczbę kursów,
- oddziaływanie czynników o charakterze stochastycznym - rejestrowane w węźle przesiadkowym a wynikające z funkcjonowania systemu transportowego w obszarze oddziaływania węzła przesiadkowego i cech systemu wskazanych we wcześniejszych punktach niniejszego wyliczenia.

Ze względu na znaczną liczbę elementów związanych z organizacją i funkcjonowaniem węzłów przesiadkowych i zróżnicowanie wartości wskazanych charakterystyk dla poszczególnych przypadków testowych, przyjęto w pracy, że we wskazanym atrybucie każdy węzeł przesiadkowy istniejący lub planowany, o zdefiniowanych charakterystykach, opisanych w rozdziale 3 w modelu węzła przesiadkowego i jego otoczenia **MWO** stanowi odrębny stan.

Podział na **typy dni ruchowych E** wynika z odmiennych charakterystyk systemu transportowego w poszczególnych typach dni, wymagających niezależnej synchronizacji rozkładów jazdy, w związku ze stosowaniem różnych: liczby kursów i wartości parametrów linii komunikacyjnych. Stany tego atrybutu pozwalają odwzorować w modelu rozkład jazdy różny w poszczególnych typach dni ruchowych, dostosowany do sytuacji drogowo-ruchowej, zapotrzebowania na wielkość przewozów, do występujących problemów transportowych oraz istotności skutków, zasięgu oddziaływania problemów transportowych. Dobór stanu w omawianym atrybucie determinuje zakres czasowy koniecznych do zgromadzenia danych wejściowych. Dotyczy to przede wszystkim wyboru obowiązującego rozkładu jazdy, liczby podróży realizowanych w poszczególnych relacjach w kolejnych godzinach/kursach oraz wielkości i struktury odchyłek od rozkładu jazdy, dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w okresach *o*, charakteryzowanych przez różne wartości w różnych typach dni ruchowych.

Sposób łączenia taktów SLT wpływa na konstrukcję rozkładu jazdy linii komunikacyjnej w kierunku jazdy, determinując odstępy czasu między kolejnymi kursami, z których każdy realizowany jest w innym okresie $hm(ja, o, o', war_v)$. Sposób łączenia taktów wpływa na liczebność zbioru rozwiązań dopuszczalnych **WAR_v**.

Stany atrybutu „**Czynniki stochastyczne CS**” różnicują zakres danych wejściowych stosowany podczas synchronizacji rozkładów jazdy, który wpływa na ostateczny, wyznaczony, zsynchronizowany rozkład jazdy. Wyróżniono w pracy dwa stany danego atrybutu związane z tym, czy podczas synchronizacji rozkładów jazdy będą uwzględniane odchyłki od rozkładu jazdy czy nie będą uwzględniane. Natomiast w każdym, z dwóch stanów uwzględniana jest dyspersja czasu przebycia dróg przejścia. Dany atrybut pełni kluczową rolę w pracy, zwłaszcza w zakresie weryfikacji hipotez badawczych.

Zbiór **SQ** numerów przyjętych w pracy stanów atrybutów charakteryzujących węzły przesiadkowe określono w postaci:

$$SQ = \{1, \dots, sq, \dots, |SQ|\} \quad (5-7)$$

gdzie $|SQ|$ oznacza liczebność zbioru SQ i ma interpretację rozpatrywanej w badaniach liczby stanów atrybutów. Odwzorowanie $g4(sq, v) \in \{0,1\}$ przyjmuje wartość 1 gdy sq -ty stan atrybutu charakteryzuje v -ty przypadek testowy, 0 w przeciwnym przypadku.

Dla potrzeb pracy na zbiorze V zadane są cztery odwzorowania w postaci:

$$\begin{aligned} U(v) &\equiv SQ(U, v), v \in V \\ CS(v) &\equiv SQ(CS, v) \in \{cs: CS3 \vee CS1\}, v \in V \\ E(v) &\equiv SQ(E, v) \in \{e: ER, EW\}, v \in V \\ SLT(v) &\equiv SQ(SLT, v) \in \{slt: SLT1, SLT2, SLT3, SLT4\}, v \in V \end{aligned} \quad (5-8)$$

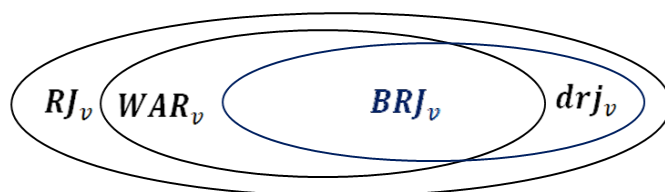
z których każde identyfikuje stan przypisany do v -tego przypadku testowego w jednym z czterech atrybutów. Każdy z podzbiorów zbioru SQ oznaczony jako $SQ(q)$ zawiera stany przypisane do q -tego atrybutu.

Dodatkowo na podstawie odwzorowania $g4(sq, v)$ zbiór V został podzielony na podzbiory $V(sq)$, w taki sposób, że do jednego podzbioru należą te wszystkie przypadki testowe, charakteryzowane przez zbiór czterech atrybutów, które przyjmują ten sam stan atrybutu sq w przynajmniej jednym atrybucie. Podzbiory zostały określone w postaci:

$$V(sq) = \{v: g4(sq, v) = 1, v \in V\}, sq \in SQ \quad (5-9)$$

Dla potrzeb pracy przyjęto, że wskazane podzbiory będą wyodrębniane także na podstawie wspólnego stanu w więcej niż jednym atrybucie. Zastosowano w tym celu we wzorze 5-9 wewnątrz argumentu identyfikującego podzbiór, oznaczenie $\wedge$ wskazujące, że wszystkie wyliczone w argumencie dla podzbiorów stany atrybutów stanowią wspólnie, jednocześnie podstawę wyróżnionych podzbiorów. Zatem dla przykładu podzbiór $V(ER \wedge SLT1)$ obejmuje te przypadki testowe, które dla atrybutu „Typ dni ruchowych E ” opisane są stanem „Dni robocze w okresie roku szkolnego ER ” oraz dla atrybutu „Sposób łączenia taktów” sposobem $SLT1$.

W rozdziale czwartym rozpatrywano jedynie zmienną decyzyjną determinującą rozkłady jazdy spełniające ograniczenie rytmiczności. Dane ograniczenie powoduje, że WAR_v jest podzbiorem zmiennej RJ_v determinującej rozkład jazdy w węźle przesiadkowym, w którym odstępy czasu pomiędzy odjazdami kolejnych autobusów w kursach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy nie charakteryzuje stały interwał. Zależności pomiędzy rozpatrywanymi w pracy elementami zbioru RJ_v opisującymi rozpatrywane przypadki testowe w wykonywanej analizie porównawczej przedstawiono na rysunku 5.11.



Rys. 5.11. Przynależność elementów zbioru zmiennej determinującej rozkład jazdy w węźle przesiadkowym do podzbiorów rozpatrywanych w rozprawie

Źródło: opracowanie własne

Zbiór RJ_v , którego elementy determinują wszystkie kombinacje doboru planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej obsługujących węzeł przesiadkowy określono w postaci:

$$RJ_v = \{1, \dots, rj_v, rj'_v, \dots, |RJ_v|\}, v \in V \quad (5-10)$$

gdzie $|RJ_v|$ oznacza liczebność zbioru RJ_v i ma interpretację liczby wszystkich potencjalnie możliwych kombinacji doboru planowanych momentów odjazdów pojazdów komunikacji miejskiej obsługujących v -ty przypadek testowy. Oznacza to, że zbiór WAR_v jest podzbiorem zbioru RJ_v a $|RJ_v|$ jest większa od $|WAR_v|$.

Funkcja $g5(rj_v, v) \in \{0,1\}$ przyjmuje wartość 1, gdy dla rozważanego elementu determinującego rozkład jazdy został wyznaczony w pracy czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu oraz wartość 0 w innych przypadkach. Funkcja $g15(rj_v, v)$ stanowi podstawę identyfikacji elementów podzbioru BRJ_v określonego w postaci:

$$BRJ_v = \{rj_v: g15(rj_v, v) = 1, rj_v \in RJ_v\}, v \in V \quad (5-11)$$

Zbiór BRJ_v , identyfikuje dla v -tego przypadku testowego zbadane w rozprawie elementy zbioru RJ_v . W pracy podstawą badań elementów zbioru zmiennej decyzyjnej jest czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym, tj. odpowiednio $\forall \pi_v \in \Pi_{vZS_v} \forall \pi_v \in \Pi_{vZS_v} \in ZS_v^{tm}(\pi_v, rj_v, ZS_v)$. Wskazana charakterystyka determinowana jest przez rozkład jazdy w węźle przesiadkowym $\theta YJ(rj_v)$ opisany wektorem rj_v . Elementy zbioru BRJ_v zmiennej decyzyjnej determinują rozkłady jazdy dla v -tego przypadku testowego i obejmują:

- war_v^* element zbioru WAR_v opisujący rozkład jazdy w węźle przesiadkowym wyznaczony przy pomocy proponowanej metody synchronizacji,
- war_v^{*3} element zbioru WAR_v , identyfikujący pierwsze bieżące rozwiązanie, opisujące rozkład jazdy w węźle przesiadkowym wyznaczony w momencie zakończenia realizacji etapu 3 proponowanej metody synchronizacji, czyli zakończenia przeszukiwania zupełnego dla wszystkich linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy,
- zbiór WAR_v^L będący podzbiorem WAR_v i obejmującym elementy wylosowane ze zbioru WAR_v , mające reprezentować w badaniu strukturę czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym jaką determinują elementy zbioru WAR_v ,
- drj_v element zbioru RJ_v determinujący obowiązujący rozkład jazdy w węźle przesiadkowym. Węzeł przesiadkowy charakteryzowany przez zmienną drj_v identyfikuje zbiór przypadków testowych opisanych wspólnym stanem w atrybucie lokalizacja węzła w sieci transportowej i osadniczej.

Podstawą charakterystyki rozwiązań jest czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej w węźle przesiadkowym funkcjonującym w warunkach oddziaływania czynników o charakterze stochastycznym. W rozprawie czas oczekiwania wyznaczany jest metodą modelowania symulacyjnego, przy zastosowaniu zbioru pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu dla potoku pasażerów rozpatrywanego w ujęciu stochastycznym ZS_v . Zbiory zastosowane

do oceny badanych rozkładów jazdy dla przypadków testowych odwzorowują oddziaływanie trzech rozpatrywanych czynników o charakterze stochastycznym zgodnie ze wzorem 3-45. Zbiory $\mathbf{ZS}_v$, zastosowane do analizy porównawczej rozkładów jazdy wyznaczane są na podstawie rozkładów prawdopodobieństwa opisujących rozpatrywane w pracy czynniki o charakterze stochastycznym i są niezależnie od zbiorów pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu przyjętych podczas wyznaczania rozwiązań w synchronizacji rozkładów jazdy. Podejście przyjęte w proponowanej procedurze zapewnia, że czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu charakteryzujący rozkład jazdy dla porównywanych przypadków testowych nie jest wyznaczany na podstawie tego samego zbioru $\mathbf{ZS}_v$, który posłużył do synchronizacji badanych rozkładów jazdy.

W dysertacji różne dane wejściowe skutkują wyznaczeniem różnych zsynchronizowanych rozkładów jazdy poprzez dopasowywanie planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej. Ocena rezultatów zastosowania proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy została przeprowadzona na podstawie analizy czasu oczekiwania determinowanego przez rozkłady jazdy wyznaczone dla par przypadków testowych $(v, v') \in \mathbf{rCSV}$. Funkcja $CS(v)$ stanowi podstawę identyfikacji par przypadków testowych opisanych zbiorem czterech atrybutów poddanych analizie porównawczej. Zbiór $\mathbf{rCSV}$ par przypadków testowych, różniących się przypisanym stanem w atrybucie „Czynniki stochastyczne” zdefiniowano w postaci:

$$\begin{aligned} \mathbf{rCSV} = \{ & (v, v'): CS(v) = CS3, CS(v') = CS1, \\ & U(v) = U(v'), E(v) = E(v'), SLT(v) = SLT(v'), v, v' \in V \} \end{aligned} \quad (5-12)$$

Zbiór $\mathbf{rCSV}$ zawiera pary przypadków testowych (v, v') , które będąc opisane czterema atrybutami różnią się jedynie stanem przypisanym w atrybucie „Czynniki stochastyczne”. Oznacza to, że $CS(v) = CS3$, a $CS(v') = CS1$. Pary przypadków testowych należące do zbioru V , które spełniają ten warunek przypisania stanów atrybutów nazwane zostały w pracy jako odpowiadające sobie przypadki testowe i oznaczono symbolem $v \approx v'$. Rozpatrywane pary (v, v') określone są w rozprawie w taki sposób, że rozkład jazdy opisany zmienną $\mathbf{war}_v^*$ zsynchronizowano przy pomocy proponowanej metody z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy, a rozkład jazdy opisany zmienną $\mathbf{war}_{v'}^*$ zsynchronizowano przy pomocy proponowanej metody z pominięciem odchyłek od rozkładu jazdy.

Na podstawie odwzorowania $g4$ dla każdego stanu atrybutu wyróżniono zbiór $\mathbf{rCSV}(sq)$, będący podzbiorem zbioru $\mathbf{rCSV}$, identyfikującym te pary przypadków testowych charakteryzowane zbiorem czterech atrybutów, które mają przypisany sq -ty stan atrybutu, co zapisano w postaci:

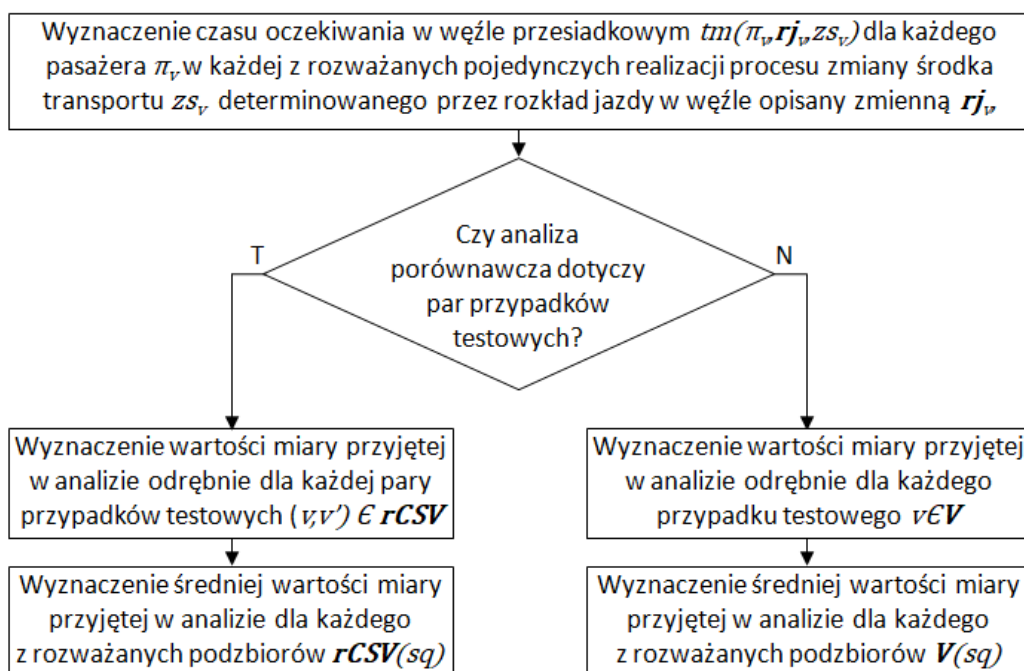
$$\begin{aligned} \mathbf{rCSV}(sq) = \{ & (v, v'): g4(sq, v) = 1 \wedge g4(sq, v') = 1 \wedge \\ & (v, v') \in \mathbf{rCSV}, sq \in \mathbf{SQ} \} \end{aligned} \quad (5-13)$$

W dalszej części pracy węzły przesiadkowe badane są z uwzględnieniem oddziaływania rozpatrywanych czynników o charakterze stochastycznym. Dla każdego elementu ze zbioru badanych przypadków testowych V analizowane są 3 rozwiązania determinujące rozkład jazdy w węźle przesiadkowym $\mathbf{war}_v^*$, $\mathbf{WAR}_v^L$, $\mathbf{drj}_v$.

Rozkłady jazdy opisane wektorami $\mathbf{war}_v^*$ wyznaczone dla elementów v podzbioru $V(CS3)$, tzn. rozkłady jazdy zsynchronizowane przy pomocy proponowanej metody, z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy poddawane są trzem analizom porównawczym, tj. względem:

- 1) zbioru $\mathbf{WAR}_v^L$ reprezentującego zbiór $\mathbf{WAR}_v$ opisujący dopuszczalne rozkłady jazdy dla przypadku testowego,
- 2) dotychczas obowiązujących rozkładów jazdy w węzłach przesiadkowych $\mathbf{drj}_v$,
- 3) rozkładów jazdy zsynchronizowanych przy pomocy proponowanej metody bez uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy dla elementów v' podzbioru $V(CS1)$, opisany wektorem $\mathbf{war}_{v'}^*$ tj. dla odpowiadających sobie elementów $v \asymp v'$, należących do zbioru par $(v, v') \in \mathbf{rCSV}$, różniących się wśród stanów atrybutów opisujących elementy jedynie liczbą uwzględnianych czynników o charakterze stochastycznym.

W przypadku odniesienia rezultatów synchronizacji rozkładów jazdy $\mathbf{war}_v^*$ do elementów $\mathbf{WAR}_v^L$ i $\mathbf{drj}_v$ analizie porównawczej poddawane są różne rozwiązania dla pojedynczych przypadków testowych. Natomiast analiza porównawcza rozkładów jazdy determinowanych przez zmienną $\mathbf{war}_v^*$ realizowana jest dla odpowiadających sobie par rozwiązań, wyznaczonych przy pomocy proponowanej metody dla par odpowiadających sobie przypadków testowych. Analizy porównawcze w etapie 5 realizowane są według jednego, ogólnego schematu postępowania, którego logikę zaprezentowano na rysunku 5.12.



Rys. 5.12. Logika postępowania w etapie 5 przyjęta w zakresie przygotowania i realizacji analizy porównawczej par rozkładów jazdy wyznaczonych dla przypadków testowych

Źródło: opracowanie własne

W etapie piątym przyjęto zbiór miar pozwalających dokonać analizy porównawczej par rozkładów jazdy na podstawie oceny czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środki transportu w węźle przesiadkowym, wyrażonego zarówno w wartościach absolutnych

jak i względnych. Dla każdej z rozważanych par rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym wyznaczyć należy po jednej wartości każdej z przyjętych miar charakteryzującej badane rozwiązanie. Na tej podstawie wyznaczane są wartości charakteryzujące podzbiory przypadków testowych wyróżnionych według przypisanego stanu atrybutu. Analizę porównawczą par rozkładów jazdy z zastosowaniem zbioru miar należy realizować, według przedstawionego algorytmu, odrębnie dla każdego z trzech różnych rozkładów jazdy w węźle tj. war_v^* , WAR_v^L , drj_v . Zastosowanie poszczególnych miar do wyróżnionych analiz przedstawiono w tabeli 5.2.

Tabela 5.2 Zestawienie miar stosowanych w analizie wyników synchronizacji rozkładów jazdy zrealizowanej proponowaną metodą

Miara charakteryzująca wynik synchronizacji realizowanej proponowaną metodą w analizach porównawczych względem rozkładów jazdy w węźle przyjętych jako punkt odniesienia w celu określenia skutków przyjęcia wartości zmiennej decyzyjnej war_v^*		Rozkład jazdy w węźle stanowiący punkt odniesienia		
Definicja	Oznaczenie	WAR_v^L	drj_v	war_v^*
Średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym związany z $\mathbf{rj}_v$ -tym rozkładem jazdy w węźle	$\mu tm(\mathbf{rj}_v)$	×	×	×
Wartość średnia dla podzbioru $V(sq)$ przypadków testowych opisanych stanem atrybutu sq wartości miary $\mu tm(\mathbf{rj}_v)$	$\overline{\mu tm}(sq, \mathbf{rj}_v)$	×	×	
Dyspersja średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym wśród elementów zbioru $\mathbf{RJ}_v$ opisujących rozkłady jazdy w węźle przesiadkowym	$\sigma tm(\mathbf{RJ}_v)$	×		
Ustandaryzowana różnica między wartością miary $\mu tm(\mathbf{rj}'_v)$ opisującej wektor $\mathbf{rj}'_v$ a wartością tej miary $\mu tm(\mathbf{RJ}_v)$ charakteryzującą łącznie zbiór rozwiązań dopuszczalnych $\mathbf{RJ}_v$ opisujących rozkłady jazdy w węźle	$\partial \mu tm(\mathbf{RJ}_v, \mathbf{rj}'_v)$	×		
średnia arytmetyczna wartość miary $\partial \mu tm(\mathbf{RJ}_v, \mathbf{rj}'_v)$ dla podzbioru $V(sq)$ przypadków testowych opisanych stanem atrybutu sq	$\overline{\partial \mu tm}(sq, \mathbf{RJ}_v, \mathbf{rj}'_v)$	×		
różnica między całkowitym czasem oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle charakteryzującym dwa odrębne rozkłady jazdy w węźle opisane wektorami $\mathbf{rj}_v$ i $\mathbf{rj}'_v$	$rtm(\mathbf{rj}_v, \mathbf{rj}'_v)$	×		
wartość średnia miary $rtm(\mathbf{rj}_v, \mathbf{rj}'_v)$ dla przypadków testowych opisanych sq -tym stanem atrybutu	$\overline{rtm}(sq, \mathbf{rj}_v, \mathbf{rj}'_v)$	×	×	×
względna różnica między wartościami miary $\mu tm(\mathbf{rj}_v)$ opisującymi pary rozkładów jazdy opisanych wektorami $\mathbf{rj}_v$ i $\mathbf{rj}'_v$ zmiennej decyzyjnej	$\rho \mu tm(\mathbf{rj}_v, \mathbf{rj}'_v)$		×	×
wartość średnia miary $\rho \mu tm(\mathbf{rj}_v, \mathbf{rj}'_v)$ dla przypadków testowych opisanych sq -tym stanem atrybutu	$\overline{\rho \mu tm}(sq, \mathbf{rj}_v, \mathbf{rj}'_v)$		×	×

Źródło: opracowanie własne

Średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym w pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu związany z $\mathbf{rj}_v$ -tym rozkładem jazdy w węźle przesiadkowym określono w postaci:

$$\mu tmz(\mathbf{rj}_v, zs_v) = \frac{\sum_{\pi_v \in \Pi_v} tm(\pi_v, \mathbf{rj}_v, zs_v)}{|\Pi_v|}, \mathbf{rj}_v \in \mathbf{RJ}_v, zs_v \in \mathbf{ZS}_v, v \in V \quad (5-14)$$

Średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym związany z $\mathbf{rj}_v$ -tym rozkładem jazdy w węźle przesiadkowym określono na podstawie zależności:

$$\mu tm(\mathbf{rj}_v) = \frac{\sum_{\pi_v \in \Pi_v} \sum_{zs_v \in ZS_v} tm(\pi_v, \mathbf{rj}_v, zs_v)}{|\Pi_v| \cdot |ZS_v|}, \mathbf{rj}_v \in \mathbf{RJ}_v, v \in V \quad (5-15)$$

tj. z uwzględnieniem czasu oczekiwania poszczególnych pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym w poszczególnych pojedynczych realizacjach procesu zmiany środka transportu. Natomiast wartość miary $\mu tm(\mathbf{RJ}_v)$ średniego czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym związany z $\mathbf{RJ}_v$ -tym zbiorem rozwiązań jest średnią arytmetyczną ze zbioru wartości średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym oznaczonych jako $\mu tm(\mathbf{rj}_v)$ charakteryzujących rozkłady jazdy w węźle $\mathbf{rj}_v$ dla v -tego przypadku testowego.

Na podstawie miary $\mu tm(\mathbf{rj}_v)$ dla potrzeb pracy zdefiniowano zmienną opisującą rozkład jazdy w węźle przesiadkowym $\mathbf{war}_v^{*L}$ charakteryzującą zbiór $\mathbf{WAR}_v^L$ elementów wybranych losowo ze zbioru dopuszczalnych rozwiązań i spełniającą warunek:

$$\mathbf{war}_v^{*L}: \mu tm(\mathbf{war}_v^{*L}) = \min_{\mathbf{war}_v \in \mathbf{WAR}_v^L} \{\mu tm(\mathbf{war}_v)\} \quad (5-16)$$

Rozkład jazdy $\mathbf{war}_v^{*L}$ cechuje najmniejsza wartość miary $\mu tm(\mathbf{rj}_v)$ spośród wszystkich wartości zmiennych opisujących rozkład jazdy w węźle i należących do zbioru $\mathbf{WAR}_v^L$.

Dla potrzeb pracy wartość średnią miary $\mu tm(\mathbf{rj}_v)$ dla opisanego zmienną $\mathbf{rj}_v$ podzbioru $V(sq)$ przypadków testowych opisanych stanem atrybutu sq zdefiniowano w postaci:

$$\overline{\mu tm}(sq, \mathbf{rj}_v) = \frac{\sum_{v \in V(sq)} \mu tm(\mathbf{rj}_v)}{|V(sq)|}, \mathbf{rj}_v \in \mathbf{RJ}_v, sq \in \mathbf{SQ}, v \in V \quad (5-17)$$

Dyspersję średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym $\sigma tm(\mathbf{RJ}_v)$ wśród elementów zbioru $\mathbf{RJ}_v$ opisujących rozkłady jazdy w węźle przesiadkowym scharakteryzowano w pracy poprzez odchylenie standardowe wyznaczone zgodnie ze wzorem:

$$\sigma tm(\mathbf{RJ}_v) = \sqrt{\frac{\sum_{\mathbf{rj}_v \in \mathbf{RJ}_v} (\mu tm(\mathbf{rj}_v) - \overline{\mu tm}(sq, \mathbf{rj}_v))^2}{|\mathbf{RJ}_v|}}, \quad \mathbf{rj}_v \in \mathbf{RJ}_v, sq \in \mathbf{SQ}, v \in V \quad (5-18)$$

Ustandaryzowana różnica $\partial \mu tm(\mathbf{RJ}_v, \mathbf{rj}'_v)$ między średnim czasem oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym charakteryzującym wektor $\mathbf{rj}_v$ a średnim czasem oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym charakteryzującym zbiór dopuszczalnych rozwiązań reprezentowany w analizie poprzez zbiór $\mathbf{RJ}_v$ wyznaczona została według zależności:

$$\partial \mu tm(\mathbf{R} \mathbf{J}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_v) = \frac{\overline{\mu tm}(sq, \mathbf{r} \mathbf{j}_v) - \mu tm(\mathbf{r} \mathbf{j}'_v)}{\sigma tm(\mathbf{R} \mathbf{J}_v)}, \mathbf{r} \mathbf{j}'_v \in \mathbf{R} \mathbf{J}_v, sq \in \mathbf{S} \mathbf{Q} \quad v \in \mathbf{V} \quad (5-19)$$

Przyjęta miara wyraża różnicę między wartościami średnimi w odniesieniu do odchylenia standardowego opisującego zbiór $\mathbf{R} \mathbf{J}_v$

Dla potrzeb pracy przyjęto dla podzbioru $\mathbf{V}(sq)$ przypadków testowych opisanych stanem atrybutu sq średnią arytmetyczną z wartości miary $\partial \mu tm(\mathbf{R} \mathbf{J}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_v)$, którą wyznaczono jako:

$$\overline{\partial \mu tm}(sq, \mathbf{R} \mathbf{J}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_v) = \frac{\sum_{v \in \mathbf{V}(sq)} \partial \mu tm(\mathbf{R} \mathbf{J}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_v)}{|\mathbf{V}(sq)|}, sq \in \mathbf{S} \mathbf{Q}, \mathbf{r} \mathbf{j}'_v \in \mathbf{R} \mathbf{J}_v \quad (5-20)$$

Różnica między całkowitym czasem oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym charakteryzującym dwa odrębne rozkłady jazdy w węźle opisane wektorami $\mathbf{r} \mathbf{j}_v$ i $\mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'}$ została oznaczona jako $rtm(\mathbf{r} \mathbf{j}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'})$ i zdefiniowana w postaci:

$$rtm(\mathbf{r} \mathbf{j}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'}) = \mu tm(\mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'}) \cdot |\Pi_{v'}| - \mu tm(\mathbf{r} \mathbf{j}_v) \cdot |\Pi_v|, \quad \mathbf{r} \mathbf{j}_v \in \mathbf{R} \mathbf{J}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'} \in \mathbf{R} \mathbf{J}_{v'}, v, v' \in \mathbf{V} \quad (5-21)$$

Wartość miary $rtm(\mathbf{r} \mathbf{j}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'})$ wskazuje o ile czasu łącznie w ciągu doby pasażerowie zmieniający środek transportu będą czekać krócej w rezultacie zastosowania rozkładu jazdy opisanego wektorem $\mathbf{r} \mathbf{j}_v$ w porównaniu z rozkładem jazdy opisanym przez wektor $\mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'}$, dla rozważanych przypadków testowych v, v' .

Wartość średnią miary $rtm(\mathbf{r} \mathbf{j}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'})$ dla podzbioru par przypadków testowych opisanych sq -tym stanem atrybutu oznaczono jako $\overline{rtm}(sq, \mathbf{r} \mathbf{j}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'})$ i wyznaczono w postaci:

$$\overline{rtm}(sq, \mathbf{r} \mathbf{j}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'}) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sum_{v \in \mathbf{V}(sq)} rtm(\mathbf{r} \mathbf{j}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'})}{|\mathbf{V}(sq)|}, \text{ gdy } v \equiv v' \\ \frac{\sum_{(v, v') \in rCSV(sq)} rtm(\mathbf{r} \mathbf{j}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'})}{|rCSV(sq)|}, \text{ gdy } v \neq v' \end{array} \right\}, \quad \mathbf{r} \mathbf{j}_v \in \mathbf{R} \mathbf{J}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'} \in \mathbf{R} \mathbf{J}_{v'}, v, v' \in \mathbf{V}, sq \in \mathbf{S} \mathbf{Q} \quad (5-22)$$

Względna różnica między wartościami miary $\mu tm(\mathbf{r} \mathbf{j}_v)$ dla pary rozkładów jazdy $\mathbf{r} \mathbf{j}_v$ i $\mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'}$ oznaczono symbolem $\rho \mu tm(\mathbf{r} \mathbf{j}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'})$ i wyznaczono w postaci:

$$\rho \mu tm(\mathbf{r} \mathbf{j}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'}) = \frac{\mu tm(\mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'}) - \mu tm(\mathbf{r} \mathbf{j}_v)}{\mu tm(\mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'})}, \quad \mathbf{r} \mathbf{j}_v \in \mathbf{R} \mathbf{J}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'} \in \mathbf{R} \mathbf{J}_{v'}, v, v' \in \mathbf{V} \quad (5-23)$$

Natomiast dla podzbioru przypadków testowych opisanych stanem atrybutu $\mathbf{V}(sq)$ wartość średnią miary $\rho \mu tm(\mathbf{r} \mathbf{j}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'})$ oznaczono jako $\overline{\rho \mu tm}(sq, \mathbf{r} \mathbf{j}_v, \mathbf{r} \mathbf{j}'_{v'})$ i wyznaczono w postaci:

$$\overline{\rho\mu tm}(sq, \mathbf{rj}_v, \mathbf{rj}_{v'}) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sum_{v \in V(sq)} \rho\mu tm(\mathbf{rj}_v, \mathbf{rj}'_{v'})}{|V(sq)|}, \text{ gdy } v \equiv v' \\ \frac{\sum_{(v, v') \in rCSV(sq)} \rho\mu tm(\mathbf{rj}_v, \mathbf{rj}'_{v'})}{|rCSV(sq)|}, \text{ gdy } v \neq v' \end{array} \right\}, \quad (5-24)$$

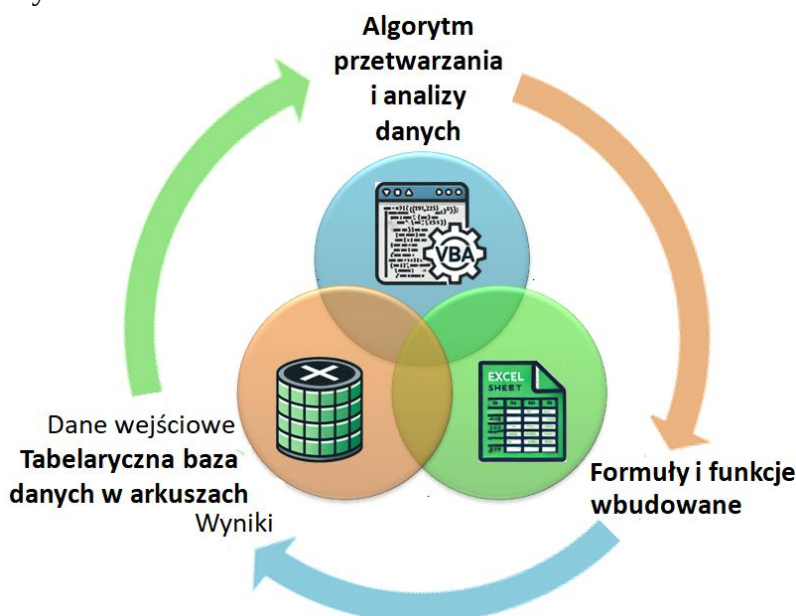
$\mathbf{rj}_v \in \mathbf{RJ}_v, \mathbf{rj}'_{v'} \in \mathbf{RJ}_{v'}, v, v' \in V, sq \in SQ,$

5.8. Opis narzędzia wspomagającego realizację obliczeń

Przedstawiona w podrozdziałach 5.3-5.7 metoda synchronizacji rozkładów jazdy została zaimplementowana w postaci autorskiego, dedykowanego programu komputerowego. Aplikacja została opracowana w języku Visual Basic for Applications zintegrowanym z MS Excel co umożliwiło efektywne połączenie zalet języka programowania, mechanizmów bazodanowych, funkcji wbudowanych oraz szerokiej dostępności środowiska. Opracowane narzędzie składa się ze zbioru sekwencyjnie uruchamianych programów, z których każdy realizuje inny algorytm odpowiadający kolejnym etapom proponowanej metody. Przepływ danych, w każdym z programów oraz integrację kodu źródłowego języka programowania VBA z arkuszami kalkulacyjnymi Excel przedstawiono schematycznie na rysunku 5.13.

Arkusze programu Excel pełnią rolę bazy danych, w której przechowywane są:

- dane wejściowe metody,
- wyniki analiz wykonywanych w kolejnych iteracjach obliczeń w ramach poszczególnych programów
- wyniki pośrednie kolejnych etapów obliczeń,
- końcowe rezultaty, obejmujące zsynchronizowany rozkład jazdy w węzle przesiadkowym.



Rys. 5.13. Logika przepływu danych podczas przeszukiwania zbioru rozwiązań w ramach poszczególnych programów składowych autorskiego narzędzia wspomagającego synchronizację rozkładów jazdy

Źródło: opracowanie własne

Kolejne etapy metody oraz kolejne iteracje procesu optymalizacyjnego realizowane są sekwencyjnie w ramach dedykowanych programów zaimplementowanych w VBA, według tego samego schematu. Przetwarzanie danych odbywa się zgodnie z przyjętym algorytmem, obejmującym:

- pobieranie i odczyt danych z arkuszy Excel,
- przeszukiwanie, wybór i przetwarzanie wybranych rozwiązań,
- realizację obliczeń i analizę uzyskanych wyników, której rezultaty warunkują dalsze postępowanie,
- aktualizację wyników, poprzez modyfikację arkuszy kalkulacyjnych sterowaną formułami i funkcjami wbudowanymi w Excel.

Wyniki każdej iteracji zapisywane są w arkuszach Excel, nadpisując poprzednie obliczenia, a jednocześnie stanowią dane wejściowe dla kolejnej iteracji algorytmu. W ten sposób sekwencyjny mechanizm przetwarzania danych pozwala na systematyczne poprawianie rozkładu jazdy według procedury zastosowanej w opracowanej metodzie.

Baza danych stanowi centralny element programów ponieważ pozwala odwzorować w opracowanym narzędziu zbiór pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu, stanowiący podstawę wyznaczania wartości funkcji kryterium w trakcie przeszukiwania zbioru rozwiązań dopuszczalnych. Czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu zależy od rzeczywistych momentów odjazdów autobusów, które choć obciążone dyspersją wynikającą ze stochastycznego charakteru procesu ruchu wynikają z rozkładu jazdy i razem z nim są modyfikowane podczas synchronizacji.

W każdym programie ze zbioru programów dedykowanych kolejnym etapom metody poprzez arkusz o nazwie „Start” uruchamiana jest realizacja algorytmu, który pobiera dane wejściowe opisujące organizację i funkcjonowanie węzła przesiadkowego, związane z procesem zmiany środka transportu przez pasażerów zawarte w zbiorze arkuszy. Każdy arkusz posiada określoną strukturę danych. W każdym pliku programu zawarty jest arkusz z rezultatami realizacji procedury zdefiniowanej w etapie i stanowiący dane wejściowe dla algorytmu określonego w kolejnym etapie metody. Zakres i strukturę danych wejściowych do metody rozdzielonych pomiędzy poszczególne arkusze wprowadzane do plików programu przedstawiono w tabeli 5.3.

Tabela 5.3 Zestawienie arkuszy danych wejściowych do metody zaimplementowanej w programie

Nazwa arkusza	Opis danych wejściowych zawartych w arkuszu
MacierzOD	Zestawienie wszystkich połączeń kolejowych, w których pasażerowie przyjeżdżają do węzła. Dla każdego połączenia przyporządkowana jest informacja o planowanym momencie przyjazdu $\theta YK(\kappa)$ i wielkości potoków $\Phi 2_{\alpha, seg}$ pasażerów, realizujących podróż do poszczególnych segmentów docelowych.

Nazwa arkusza	Opis danych wejściowych zawartych w arkuszu
RozA	Zestawienie w kolejnych kolumnach danych charakteryzujących linie komunikacyjne w modyfikowanych kierunkach jazdy. W wierszach zamieszczane są uporządkowane w kolejności chronologicznej planowane momenty odjazdów autobusów $\theta Y\mathcal{A}(\alpha)$ w kursach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy. Zestawienie charakteryzuje dotychczas obowiązujący w węźle przesiadkowym rozkład jazdy.
AN	Rozkład jazdy dla linii komunikacyjnych w niemodyfikowanych kierunkach jazdy. Zestawienie w kolejnych kolumnach wartości dla poszczególnych linii komunikacyjnych a w kolejnych wierszach planowanych momentów odjazdów autobusów $\theta Y\mathcal{A}(\alpha)$ w kursach dla kierunku jazdy $\alpha \in \mathcal{A}j_{ja}, ja \in \mathcal{JA}$ uporządkowanych w kolejności chronologicznej.
RozK	Planowane momenty przyjazdów pociągów $\theta Y\mathcal{K}(\kappa)$ w połączeniach kolejowych $\kappa \in \mathcal{K}j_{jk}$, uporządkowane w kolejności chronologicznej w kolejnych wierszach. Kolejne kolumny zawierają dane dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym.
LS	Odwzorowanie linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w kolejnych wierszach wraz z przypisaniem zbioru segmentów docelowych $SEGg1\alpha_\alpha$, których połączenie z węzłem przesiadkowym zapewnia dana linia komunikacyjna.
SL	Odwzorowanie segmentów docelowych w kolejnych wierszach, wraz ze wskazaniem dla każdego z segmentów zbioru linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy $\mathcal{A}g1_{seg}$, zapewniających połączenie węzła przesiadkowego z danym segmentem.
ParP	Parametry rozkładów prawdopodobieństwa opisujących czas przebycia p -tej drogi przejścia w o -tym okresie $\mathcal{P}tp(p,o)$ wraz z przyjętymi granicami określającymi analizowany przedział zmienności czasu przejścia w kolejnych wierszach odpowiadających poszczególnym drogom przejścia
ParK	Parametry rozkładów prawdopodobieństwa odchyłek od planowanego momentu przyjazdu pociągów $\mathcal{P}opp(jk,o)$ w kolejnych wierszach dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym w okresach o
ParA	Parametry rozkładów prawdopodobieństwa opisujących w kolejnych wierszach dla kursów linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w okresach $\mathcal{A}O_{ja,o}$ odchyłki od planowanych momentów odjazdów ze stanowisk przystankowych w węźle autobusów komunikacji miejskiej $\mathcal{P}opo(ja,o)$ wraz z przyjętymi granicami określającymi analizowany przedział zmienności odchyłek od rozkładu jazdy.

Źródło: opracowanie własne

Przed uruchomieniem procedury konieczne jest wstawienie w poszczególnych plikach programu arkuszy zawierających dane wejściowe stosowane w realizowanym algorytmie. W tabeli 5.4 przedstawiono dla każdego z plików programu realizujących kolejne etapy metody w zakresie synchronizacji rozkładów jazdy zestawienie niezbędnych do zastosowania arkuszy danych zawierających podzbiory danych wejściowych.

Tabela 5.4 Zestawienie nazw opracowanych plików programu stosowanych na kolejnych etapach metody w zakresie synchronizacji rozkładów jazdy wraz z identyfikacją arkuszy zawierających dane wejściowe do poszczególnych plików

Nazwa pliku programu Nazwa arkusza		Etap realizacji metody							
		Etap 1		Etap 2				Etap 3	Etap 4
		Etap1 PPK	Etap1 ZRD	Etap2P	Etap2LosProcStoch			Etap3 BiezacyRJ	Etap4 Symulacje
Arkusze zawierające	MacierzOD				×		×	×	
	RozA	×							

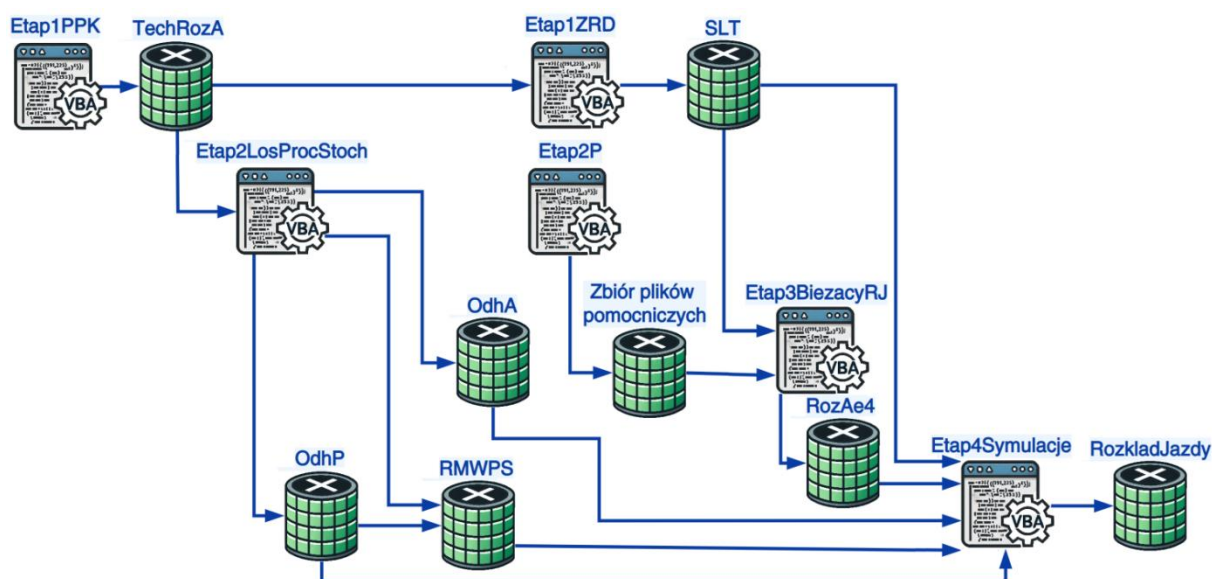
Nazwa pliku programu Nazwa arkusza		Etap realizacji metody						
		Etap 1		Etap 2			Etap 3	Etap 4
		Etap1 PPK	Etap1 ZRD	Etap2P	Etap2LosProcStoch		Etap3 BiezacyRJ	Etap4 Symulacje
dane wejściowe	AN					×	×	×
	RozK						×	
	LS						×	×
	SL						×	×
	ParP			×	×			
	ParK			×		×		
	ParA			×		×		

Źródło: opracowanie własne

Dla każdego z arkuszy zawierających dane wejściowe ustalono określoną strukturę, służącą dostosowaniu i uporządkowaniu informacji, do potrzeb realizacji algorytmu w ramach poszczególnych etapów metody. We wszystkich arkuszach przyjęto jednolite oznaczenia pozwalające na bezpośrednie przeszukiwanie danych. Każdemu kierunkowi jazdy nadana została nazwa zawierająca informacje o numerze linii, oznaczeniu kierunku jazdy i peronu/stanowiska przystankowego obsługiwanego w węźle przesiadkowym. Natomiast w oznaczeniach segmentów zamieszczono informację o numerze peronu, stanowiska przystankowego w węźle przesiadkowym, które jest obsługiwane odpowiednio przez relacje w transporcie kolejowym i linie komunikacyjne w kierunkach jazdy zapewniające połączenie węzła z segmentem. W załączniku 1 na rysunkach Z1-1÷Z1-20 zamieszczono widok wszystkich arkuszy programu dostępnych dla użytkownika uzupełnionych danymi dla przykładowego węzła zgodnie ze zdefiniowaną w narzędziu strukturą.

Zakres zastosowania poszczególnych arkuszy danych wejściowych w realizacji algorytmu na poszczególnych etapach realizacji metody jest zróżnicowany. Niektóre arkusze jak „MacierzOD” i „AN” są stosowane wielokrotnie, tj. w różnych plikach programu. Inne natomiast jak arkusz „RozA” w jednym etapie i stanowią podstawę doboru parametrów opisujących linie komunikacyjne, stosowanych w kolejnych procedurach w algorytmie metody. Większość arkuszy danych wejściowych stosowanych jest zarówno w programach pomocniczych przygotowujących odwzorowanie procesu zmiany środka transportu jak i w procedurach zasadniczych, podczas synchronizacji rozkładów jazdy odpowiednio w trzecim lub czwartym etapie proponowanej metody.

Przepływ danych w metodzie, odwzorowany poprzez wskazanie arkuszy rezultatów realizacji poszczególnych etapów, zastosowanych jako dane wejściowe do realizacji procedury na kolejnych etapach metody w zakresie synchronizacji rozkładów jazdy przedstawiono na rysunku 5.14.



Rys. 5.14. Zastosowanie arkuszy wyników realizacji procedur proponowanej metody w kolejnych etapach algorytmu

Źródło: opracowanie własne

Plik „Etap1PPK” realizuje algorytm przetwarzania obowiązującego rozkładu jazdy dla poszczególnych linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy $\mathcal{JA}$. Działania polegają na sprawdzeniu spełniania postulatu regularności odjazdów w okresach o i wprowadzaniu zmian w celu zapewnienia stałego odstępu czasu między odjazdami autobusów w kursach dla każdej linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy $h(j\alpha, o)$. Wyniki zamieszczone są w arkuszu „TechRozA” i obejmują informacje o wyznaczonych:

- liczbie kursów realizowanych w poszczególnych okresach oznaczonej jako $|\mathcal{AO}_{j\alpha, o}|$,
- interwale $h(j\alpha, o)$ dla linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy w okresach,
- momentach rozpoczęcia okresu pierwszego dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy oznaczonych jako $\theta b1j(O1, j\alpha)$.

Wynikowy arkusz „TechRozA” zawiera dane wejściowe dla algorytmu realizowanego na dalszych etapach metody.

Drugi z plików programu realizujących działania w etapie 1 proponowanej metody, tj. „Etap1ZRD” zapewnia wyznaczenie zbioru rozwiązań dopuszczalnych dla linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy $\mathbf{WAR}_{v, j\alpha}$ równocześnie dla czterech przypadków testowych, różniących się tylko stanem przypisanym w atrybucie „Sposób łączenia taktów” tj. należących do zbioru $V(u \wedge e \wedge cs)$. Wynikiem działania programu są cztery arkusze zawierające zbiory rozwiązań dopuszczalnych, po jednym dla każdego sposobu łączenia taktów. Do kolejnych etapów realizacji algorytmu proponowanej metody z zastosowaniem opracowanego narzędzia wybierany jest tylko jeden z arkuszy $SLT1 \div SLT4$ odpowiadający stanowi atrybutu „Sposób łączenia taktów” badanego przypadku testowego. W każdym uruchomieniu programów realizujących kolejne etapy metody wstawić należy

tylko jeden z czterech arkuszy wygenerowanych w niniejszym kroku, zmieniając jednocześnie nazwę wybranego arkusza na SLT.

Zbiór plików pomocniczych wyznaczany jest w wyniku zastosowania pliku programu Etap2P i zawiera wartości charakteryzujące czas oczekiwania pasażerów podczas zmiany środka transportu. Dane wejściowe do analizy obejmują parametry rozkładów prawdopodobieństwa opisujące czynniki o charakterze stochastycznym i zawarte są w arkuszach „ParK”, „ParP” i „ParA”. Dane zawarte w zbiorze plików pomocniczych wyznaczonych w wyniku uruchomienia programu Etap2P charakteryzują czas oczekiwania odrębnie w każdym okresie o , dla każdej pary relacja w transporcie kolejowym i linia komunikacyjna w kierunku jazdy. Dostosowano do tego sposób wyznaczenia i zapis danych w omawianych arkuszach. Wyznaczony zbiór plików pomocniczych może być stosowany wielokrotnie podczas badania różnych przypadków testowych. Budowane w programie „Etap2P” pliki zawierają zbiór wielokrotnie odczytywanych wartości w ramach konstrukcji bieżącego rozwiązania war^{*3} opisującego rozkład jazdy w węźle w wyniku przeszukiwania zbioru rozwiązań dopuszczalnych dla kolejnych linii komunikacyjnej w kierunkach jazdy.

W ramach uruchomienia algorytmu w pliku „Etap2LosProcStoch” losowane są wartości charakteryzujące pojedyncze realizacje procesu zmiany środka transportu dla potoku pasażerów, w ujęciu stochastycznym. W rezultacie procedury opracowywane są trzy arkusze zawierające wartości:

- odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów w komunikacji miejskiej (arkusz „OdH”),
- czasu przebycia poszczególnych dróg przejścia przez pasażerów zmieniających środek transportu (arkusz „OdH”),
- momentów wejścia na stanowisko przystankowe pasażerów (arkusz „RMWPS”) przyjeżdżających do węzła w poszczególnych połączeniach w transporcie kolejowym opisanych rzeczywistym momentem przyjazdu pociągu.

W każdym arkuszu dane zawarte w poszczególnych kolumnach odwzorowują pojedynczą realizację procesu zmiany środka transportu.

Po zakończeniu czynności przygotowawczych realizowana jest zasadnicza część metody, obejmująca synchronizację rozkładów jazdy w etapach 3 i 4 zaimplementowana w programach odpowiednio „Etap3BiezacyRJ” i „Etap4Symulacje”. Przykład struktury danych wejściowych i arkusz rezultatów w etapie 3 przedstawiono na rysunku 5.15.

a)		A	B	C	D	E	F
1	Segment	Kierunki linii					
2	1#2;	17A2	73A2	94A2	173A2	608A2	
3	2#2;	73A2	94A2	173A2	608A2		
4	3#2;	73A2					
5	4#2;	17A2					
6	5#2;	17A2	94A2	173A2	608A2		
7	6#1;	17B1	73B1	94B1	173B1	708B1	
8	7#1;	73B1	94B1	708B1			
9	8#1;	73B1					
10	9#1;	708B1					
11	10#1;	94B1					
12	11#1;	17B1	173B1				
13	12#1;	17B1					
14							
		RMWPS	OdH	SLT	MacierzOD	LS	SL
						Start	Roi

b)		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Segment / Kurs kolejowy	1#2	2#2	3#2	4#2	5#2	6#1	7#1	8#1	9#1	10#1	11#1	12#1			
2	66 S8A11#1	8	6	6	3		19	6	1				7			
3	130 S8A12#2	11		1		2	9	3	2			1				
4	273 S8A12#3	8	2	1			10	1	1	1			1			
5	356 S8A13#4	7		3			12	5	6				2			
6	486 S8A13#5	5		4	6		12	2	10	2			3	1		
7	591 S8A13#6	7	1	10	7		16	2	1	1	3		2	2		
8	646 S8A14#7	13	1	8			13	4	4				3	1		
9	715 S8A14#8	5		6			7	2	2	1						
10	767 S8A14#9	5					4									
11	829 S8A15#10	4		1			3	1	2							
12	880 S8A15#11			2			4	1	2				1			
13	1019 S8A15#12	1		1	1		3	2	1							
14	70 S8B21#1	8	7	6	3		13	3	4				3	1		
15	127 S8B22#2	4	2	2	1	3	13	2	1	4	1					
16	190 S8B22#3	24	1	6	8		19	7	5				11			
17	285 S8B22#4	11					11	1	1							
18	380 S8B23#5	8		2			4	1	13							

c)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL			
1	LKP	1	2	3	4	5	L kursów		1	2	3	4	5	Często	4:30			Roz	173A2	173B1	17A2	17B1	608A2	708B1	73A2	73B1	94A2	94B1													
2	173A2	2	1	3	3	6			60	180	100	60	60			0			57	83	29	115	95	39	58	0	17	46													
3	173B1	1	3	3	3	6			60	60	100	60	60			60			117	143	89	175	155	69	88	30	47	76													
4	17A2	2	3	5	3	2			60	60	60	60	120			0			290	203	149	235	215	99	118	60	77	106													
5	17B1	1	3	3	3	3			60	60	100	60	120			60			394	263	209	295	275	137	148	90	107	136													
6	608A2	1	3	2	3	5			60	60	150	60	60			60			494	338	269	393	387	197	178	120	137	166													
7	708B1	3	3	5	3	3			30	60	60	60	60			30			594	438	329	493	537	257	208	150	167	196													
8	73A2	3	6	10	6	6			30	30	30	30	60			30			657	538	389	593	635	317	238	180	197	226													
9	73B1	4	6	10	6	6			30	30	30	30	60			0			717	623	449	655	695	377	268	210	227	256													
10	94A2	4	6	5	6	5			30	30	60	30	60			0			777	683	509	715	755	437	298	240	257	286													
11	94B1	3	6	10	6	6			30	30	30	30	60			30			837	743	569	775	815	497	328	270	287	316													
12																			897	803	629	891	875	557	358	300	333	346													
13																			957	863	689	1011	935	617	388	330	393	376													
14																			1017	923	749	1131	995	677	418	360	453	406													
15																			1077	983	839		1055	737	448	390	513	436													
16																			1137	1043	959			797	478	420	573	466													
17																				1103				857	508	450	617	496													
18																								917	538	480	647	526													
19																									568	510	677	556													
20																										598	540	707	586												

Rys. 5.15. Przykład struktury danych stosowanej w opracowanych programach:
a) Identyfikacja kierunków jazdy łączących poszczególne segmenty z węzłem przesiadkowym (arkusz SL); b) Zestawienie liczby pasażerów dla poszczególnych relacji podróży (Arkusz MacierzOD); c) Rezultat obliczeń w programie Etap3BiezacyRJ (arkusz RozAe4)
Źródło: opracowanie własne

Algorytm postępowania i sposób przetwarzania danych w programie „Etap3BiezacyRJ” jest jednoznacznie zdefiniowany. Ustalono są założenia i zasady przeszukiwania zbioru rozwiązań dopuszczalnych. Jednak ze względu na zróżnicowany zakres danych wejściowych, tj. odmienne dla poszczególnych badanych przypadków testowych przypisane stany w atrybutach:

- „Sposób łączenia taktów” determinujący zbiór rozwiązań dopuszczalnych,
- „Czynniki o charakterze stochastycznym” determinujące liczbę czynników uwzględnianych podczas synchronizacji rozkładów jazdy,

do realizacji etapu 3 wydzielono zbiór odrębnych plików programu dedykowanych do przetwarzania wskazanych zróżnicowanych danych wejściowych.

Jako dane wejściowe do realizacji algorytmu w etapach 3 i 4 metody stosowana jest większość arkuszy stanowiących zarówno dane przyjmowane na wejściu do proponowanej metody jak i wyniki wyznaczone we wcześniejszych etapach procedury, przy pomocy opracowanych programów, zgodnie z przyporządkowaniem przedstawionym w tabeli 5.4. i na rysunku 5.14. Wynikiem realizacji etapu 3 jest arkusz „RozAe4” zawierający planowane momenty odjazdów autobusów w kursach dla wszystkich linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy wyrażone w jednostkach zbioru θY oraz numery rozwiązań dopuszczalnych wybranych w bieżącym rozkładzie jazdy war_v^* .

Etap 4 realizowany jest przy pomocy pliku „Etap4Symulacje” i obejmuje modyfikacje bieżącego rozkładu jazdy opisanego zmienną decyzyjną war_v^* . Czas oczekiwania wyznaczany jest na podstawie zastosowanego zbioru wartości odwzorowujących pojedyncze realizacje procesu zmiany środka transportu w węzle przesiadkowym opisane arkuszami „RMWPS” i „OdH” lub tylko arkuszem „OdHP” – gdy w analizie nie są brane pod uwagę odchyłki od rozkładu jazdy. Zatem zależnie od przypadku testowego jako dane wejściowe do pliku programu należy wprowadzić albo oba arkusze „RMWPS” i „OdH” albo tylko arkusz „OdHP”. W trakcie realizacji algorytmu modyfikowane są rzeczywiste momenty

odjazdów autobusów w kursach dla badanej linii komunikacyjnej w modyfikowanym kierunku jazdy. Czas oczekiwania wyznaczany jest dla każdej zmiany bieżącego rozwiązania.

Wartość funkcji kryterium wyznaczana jest na podstawie czasów oczekiwania charakteryzujących każdą z pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym w podróżach w kierunkach segmentów docelowych, obsługiwanych przez rozważaną linię komunikacyjną w kierunku jazdy. W pliku zastosowano funkcje wbudowane i formuły. Przygotowane w ten sposób arkusze pozwalają dynamicznie w czasie realizacji algorytmu wyróżniać podzbiory danych, elementy modelu opisanego w rozdziale 3. Stanowi to podstawę identyfikacji zakresu modyfikacji i analizy danych wynikających z zależności odwzorowanych w modelu węzła przesiadkowego i jego otoczenia **MWO**.

W wyniku zastosowania pliku programu „Etap4Symulacje” wyznaczany jest zgodnie z proponowaną metodą rozkład jazdy w węźle przesiadkowym, który spośród wszystkich zbadanych rozwiązań przyjmuje najmniejszą wartość funkcji kryterium. Arkusz o nazwie „RozkładJazdy” zawiera zsynchronizowany rozkład jazdy dla linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy. Uzyskane rezultaty prezentowane są w postaci zbioru planowanych momentów odjazdów wszystkich autobusów w kursach realizowanych w komunikacji miejskiej.

6. Walidacja opracowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy

6.1. Charakterystyka węzłów przesiadkowych w zakresie realizacji podróży ze zmianą środka transportu

Dla potrzeb zastosowania opracowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy w praktyce zrealizowano w ramach procesu pozyskiwania i opracowywania danych wejściowych zbiorów działań przygotowawczych zgodnie z procedurą postępowania zdefiniowaną w ramach metody. Skupiono się na analizach wykonanych dla wybranych węzłów przesiadkowych w rzeczywistym układzie komunikacyjnym, z uwzględnieniem ich organizacji, funkcji oraz warunków realizacji podróży ze zmianą środka transportu. Zakres przeprowadzonych analiz obejmuje:

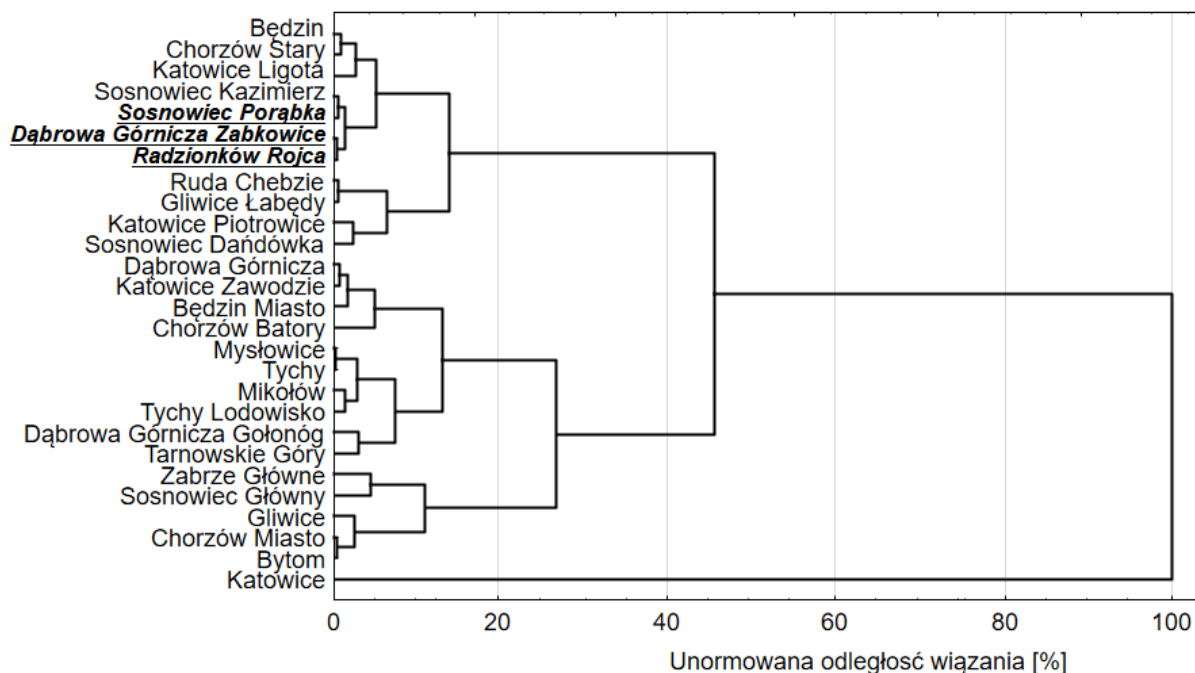
- wybór i charakterystykę węzłów przesiadkowych – dokonano selekcji trzech lokalnych węzłów przesiadkowych zlokalizowanych na terenie Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii (Radzionków Rojca, Sosnowiec Porąbka, Dąbrowa Górnicza Ząbkowice), a następnie scharakteryzowano ich konfigurację funkcjonalną i komunikacyjną, ze szczególnym uwzględnieniem liczby obsługiwanych segmentów podróży, rozkładów kursów oraz relacji przesiadkowych.
- modelowanie i analiza czasów przebycia dróg przejścia w węźle – przeprowadzono symulacje komputerowe odwzorowujące ruch pieszy w obrębie każdego z analizowanych węzłów, z podziałem użytkowników na 32 grupy o zróżnicowanych cechach. Na podstawie wyników symulacji wyznaczono empiryczne rozkłady czasu przejścia pomiędzy punktami przesiadkowymi oraz przeprowadzono ich dopasowanie do rozkładów teoretycznych w celu określenia parametrów wykorzystywanych w dalszym etapie synchronizacji.

Wybór i charakterystyka węzłów przesiadkowych

Dla potrzeb pracy analizie poddano węzły przesiadkowe cechujące się podobnymi wartościami charakterystyk opisujących funkcjonowanie węzła w aspekcie czasu podróży pasażera. Wyboru dokonano spośród węzłów przesiadkowych zlokalizowanych na obszarze GZM i zidentyfikowanych w opracowaniu [98]. Dla potrzeb rozprawy przeprowadzono zatem klasyfikację węzłów integrujących transport kolejowy z innymi podsystemami PTZ. Analizę przeprowadzono na podstawie danych charakteryzujących obsługę węzłów przez transport autobusowy, którą spośród obszernego zbioru kryteriów oceny zdefiniowanych w literaturze [144, 185, 203], w dysertacji opisano przy pomocy miar:

- łączna liczba kursów autobusowych w węźle w całym okresie funkcjonowania,
- średnia liczba stref⁶, które są obsługiwane przez linie autobusowe.

Rezultaty grupowania węzłów za pomocą metody aglomeracji przy zastosowaniu pełnego wiązania i odległości euklidesowej przedstawiono na rysunku 6.1. Nazwy węzłów wybrane do weryfikacji metody wyróżniono wizualnie poprzez krój czcionki i podkreślenie.



Rys. 6.1. Wyniki grupowania węzłów przesiadkowych w GZM metodą aglomeracji
Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 6.1. zbiór węzłów został uporządkowany według kryterium podobieństwa, tj. zbliżonych wartości miary, rozpoczynając od węzłów charakteryzowanych przez najmniejszą liczbę kursów i stref obsługiwanych przez linie komunikacyjne (na górze zestawienia nazw węzłów na rysunku) do węzłów o największych wartościach rozważanych charakterystyk (w dolnej części opisu osi pionowej). Im bliżej siebie zamieszczono nazwy węzłów w zestawieniu widocznym na osi pionowej tym bardziej podobne są do siebie rozważane węzły, opisane zbliżonymi wartościami przyjętych miar.

Węzeł przesiadkowy związany ze stacją Katowice jest największym i wyraźnie odrębnym w skali całego regionu względem pozostałych rozważanych w badaniu. W zestawieniu wyróżniono dwie grupy węzłów: o znaczeniu wojewódzkim (węzły od stacji Dąbrowa Górnicza do stacji Bytom) oraz lokalnym, regionalnym (węzły od stacji Będzin do stacji

⁶w pracy strefa rozumiana jest jako strefa taryfowa stosowana przez organizatora transportu w GZM (ZTM) i zwykle granice stref pokrywają się z granicami administracyjnymi gmin.

Sosnowiec Dańdówka). Taki podział węzłów znajduje potwierdzenie w literaturze [15]. Drugą ze wskazanych grup węzłów przesiadkowych cechuje mniejsza obsługiwana liczba stref, mniejsza liczba linii publicznego transportu miejskiego i realizowanych kursów. Tym samym szczególnie ważne jest zapewnienie synchronizacji rozkładów jazdy, gdyż ze zmianą momentów realizacji kursów w danych węzłach znacznie zmienia się czas oczekiwania pasażerów. Podkreślono to w podrozdziale 2.3 dotyczącym przeglądu literaturowego wyników badań w zakresie roli synchronizacji rozkładów jazdy w węzłach przesiadkowych.

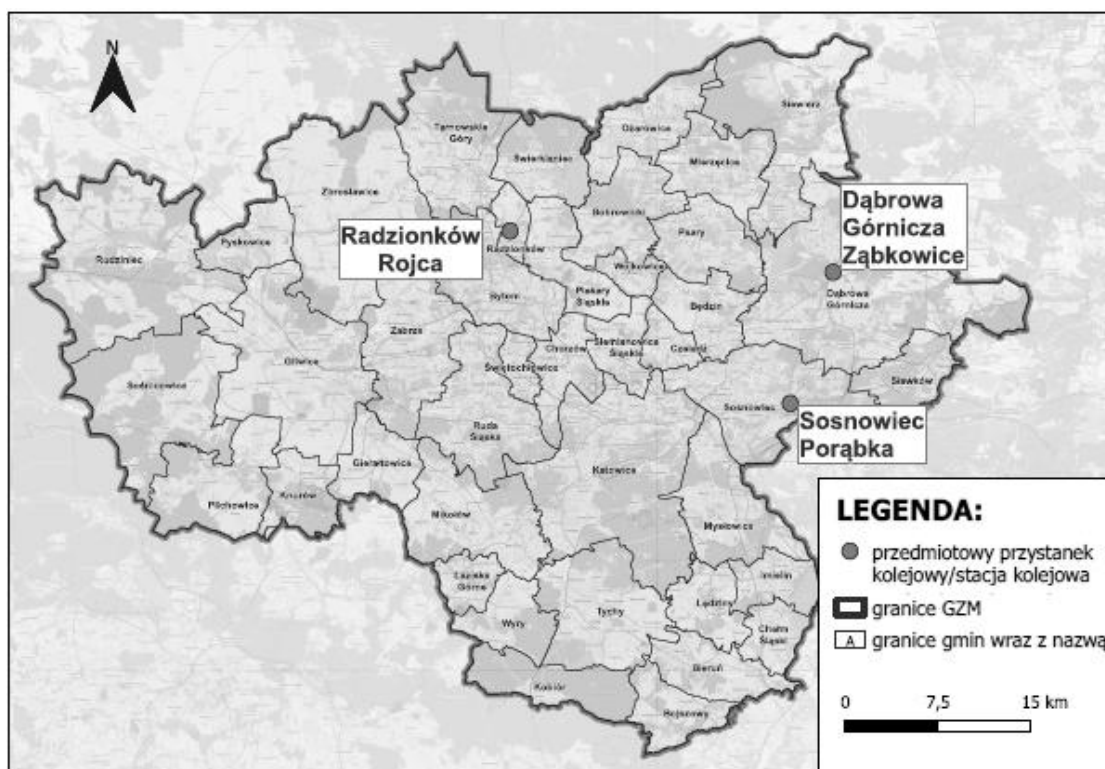
Spośród zidentyfikowanej grupy węzłów o charakterze lokalnym wybrano węzły do przeprowadzenia weryfikacji zaproponowanej metody. Są to węzły: Dąbrowa Górnicza Ząbkowice i Radzionków Rojca, które tworzą wiązanie jako drugie w kolejności podczas realizacji procedury identyfikacji grup węzłów. Wybrano także, węzeł Sosnowiec Porąbka. Trzy wymienione węzły cechują się najbardziej zbliżonymi wartościami parametrów. Są to jednocześnie wartości średnie w całej grupie lokalnych węzłów przesiadkowych, co stanowiło podstawę wyboru węzłów do zastosowania proponowanej metody.

Zbadanie zbioru podobnych węzłów zapewni porównywalność wyników i pozwoli na wykrycie wpływu lokalnych uwarunkowań na rozbieżności w zakresie uzyskiwanych rezultatów. W ocenie autora zastosowanie proponowanej metody od razu do kilku istotnie różnych węzłów, cechujących się odmienną specyfiką, rozmiarem, typem czy rolą w systemie transportowym wprowadziłoby do analizy dodatkowe czynniki wpływające na rezultaty synchronizacji, przez co znacznie ograniczyłoby możliwości wnioskowania, uogólniania wyników. Badanie zbyt wielu różnych węzłów przesiadkowych byłoby na tym etapie prac nad procesem zmiany środka transportu i opracowywaną metodą nieuzasadnione i powinno stanowić temat dalszych prac, nad rozszerzeniem zakresu zastosowania proponowanej metody, dopiero po gruntownej analizie wyników uzyskanych dla węzłów lokalnych.

W pracy dalsze badania zostały przeprowadzone dla danych wejściowych charakteryzujących trzy wybrane węzły przesiadkowe, w celu sprawdzenia skuteczności proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy w różnych uwarunkowaniach lokalnych oraz wskazania wpływu uwarunkowań lokalnych na czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu. Są to węzły przesiadkowe obejmujące punkty eksploatacyjne w transporcie kolejowym:

1. Radzionków Rojca,
2. Sosnowiec Porąbka,
3. Dąbrowa Górnicza Ząbkowice,

których lokalizację na obszarze metropolii przedstawiono na rysunku 6.2.



Rys. 6.2. Lokalizacja badanych węzłów przesiadkowych na planie gmin wchodzących w skład GZM

Źródło: opracowanie własne

Lokalizacja węzła przesiadkowego w sieci transportowej (uwzględniana w pewnym stopniu w nazwie węzła) jest w rozprawie tożsama z nazwą stanu i obejmuje, odwzorowuje te elementy charakterystyki węzła przesiadkowego, które nie zostały uwzględnione w pozostałych atrybutach, a które ze względu na odmienne cechy każdego węzła przesiadkowego determinują rolę i funkcjonowanie węzła przesiadkowego. Ponadto w zakresie charakterystyki atrybutów przyjęto w badaniach, że dla linii komunikacyjnych w modyfikowanych kierunkach jazdy, w ramach zastosowania proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy dla przypadku testowego stosowany jest ten sam sposób łączenia taktów, z pośród 4 scharakteryzowanych w podrozdziale 4.3.

W tabeli 6.1 przedstawiono wartości wybranych parametrów opisujących funkcjonowanie linii komunikacyjnych obsługujących węzły przesiadkowe.

Tabela 6.1 Zestawienie wartości wybranych parametrów charakteryzujących transport zbiorowy w zakresie obsługi węzła przesiadkowego i jego otoczenia

Parametr	Radzionków Rojca	Sosnowiec Porąbka	Dąbrowa Górnica Ząbkowice
Liczba stanowisk przystankowych w promieniu 250 m od przystanku kolejowego	2	4	1

Parametr	Radzionków Rojca	Sosnowiec Porąbka	Dąbrowa Górnica Ząbkowice
Liczba stanowisk przystankowych w promieniu od 250 m do 500 m od przystanku kolejowego	2	5	3
Liczba linii autobusowych obsługujących węzeł w dni robocze w okresie roku szkolnego	6	4	6
Łączna liczba kursów w komunikacji miejskiej w węźle w całym okresie funkcjonowania w skali doby w dni robocze w okresie roku szkolnego	208	186	202
Średnia liczba kursów realizowanych dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w dni robocze w okresie roku szkolnego	21	23	17
Liczba autobusowych linii komunikacyjnych obsługujących węzeł w dni robocze w okresie wakacji	6	4	6
Łączna liczba kursów w komunikacji miejskiej w węźle w całym okresie funkcjonowania w skali doby w dni robocze w okresie wakacji	190	184	202
Średnia liczba kursów realizowanych dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w dni robocze w okresie wakacji	19	23	17
Suma liczby stref ¹⁾ przez które przejeżdżają autobusowe linie komunikacyjne obsługujące węzeł	37	22	28
Suma liczby stref do których dotrzeć może pasażer przesiadający się w węźle	20	13	16
Średnia liczba stref, które są obsługiwane przez linie komunikacji miejskiej	3,7	2,3	2,3
Średnia liczba stref, do których dotrzeć może pasażer przesiadający się w węźle	2,6	1,6	1,8
Liczba linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy obsługujących węzeł przesiadkowy	10	8	12
Średnia liczba stanowisk przystankowych na trasie linii komunikacyjnej w kierunku jazdy	29	32	32
Łączna liczba obsługiwanych przystanków	76	96	124
Średnia długość trasy linii komunikacyjnej w poszczególnych kierunkach jazdy [km]	21,0	24,0	24,5
Liczba stanowisk przystankowych w węźle przesiadkowym	2	2	2
Liczba torów szlakowych	2	1	2
Liczba peronów w węźle przesiadkowym	2	1	1
Liczba połączeń kolejowych obsługujących węzeł	1	2	2
Średnia długość dróg przejścia w węźle [m]	170	175	310
Okres funkcjonowania węzła w skali doby	04:20	04:17	04:17
	23:36	23:42	23:53

Parametr		Radzionków Rojca	Sosnowiec Porąbka	Dąbrowa Górnica Ząbkowice
Liczba połączeń w transporcie kolejowym w dni robocze	w okresie roku szkolnego	24	11	60
	w okresie wakacji	28	11	60
Liczba segmentów		28	33	41
Liczba badanych segmentów ²⁾		12	14	12
Dobowa wymiana pasażerska w komunikacji miejskiej w węźle przesiadkowym		241	192	198
Objaśnienia: 1) – w pracy strefa rozumiana jest jako strefa taryfowa stosowana przez organizatora transportu w GZM (Zarząd Transportu Metropolitalnego) i zwykle granice stref pokrywają się z granicami administracyjnymi gmin. 2) – zbiór wybranych segmentów, dla których węzeł przesiadkowy realnie stanowi miejsce zmiany środka transportu z transportu kolejowego na komunikację miejską, ze względu na racjonalność wyboru środka transportu wynikającą z układu węzłów przesiadkowych linii komunikacyjnych na badanych obszarze, zwłaszcza obszarze oddziaływania węzła przesiadkowego.				

Źródło: opracowanie własne na podstawie [255], dla danych za 18.03.2019 r. i 23.07.2019 r.

Średnio w każdym kierunku jazdy obsługiwanych jest około 30 stanowisk przystankowych na trasie o średniej długości około 23 km. Analizowane w pracy linie dzienne obsługują węzły w podobnym przedziale doby tj. między godziną 4:00 a 24:00. Zestawienie stosowanych przez Zarząd Transportu Metropolitalnego GZM (ZTM GZM) wyróżników wszystkich rozpatrywanych w pracy kierunków jazdy linii komunikacyjnych wraz z identyfikatorami nazw⁷ przyjętymi w dysertacji przedstawiono w załączniku 2 w tabeli Z2-1. Natomiast oznaczenie relacji w transporcie kolejowym dla badanych węzłów przedstawiono w tabeli Z2-2. Poza lokalizacją węzłów w układzie przestrzennym metropolii zróżnicowanie charakterystyk węzłów widoczne jest w wartościach: średniej liczby stref i łącznej liczby stanowisk przystankowych oraz segmentów w obszarze oddziaływania węzła. Największa liczba kursów w ruchu kolejowym występuje w węźle Ząbkowice, najmniejsza w węźle Porąbka. W tabeli 6.2 zamieszczono dokładne wartości ram podziału całego okresu funkcjonowania węzła, przyjęte na podstawie przeglądu literatury z zakresu badań systemu PTZ w regionie [111, 166, 269], co wprost odpowiada potrzebom niniejszej pracy.

⁷ Dla potrzeb pracy każdej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy przydzielono unikatowy wyróżnik posiadający 3 składowe oznaczenia postaci: XXX\$Y, gdzie:
 XXX - trzy pierwsze znaki identyfikują numer linii komunikacyjnej stosowany przez ZTM GZM,
 \$ - znak, na którego pozycji umieszczana jest litera A lub B identyfikujące kierunek jazdy,
 Y – cyfra identyfikująca numer stanowiska przystankowego w węźle przesiadkowym obsługiwanego przez linię komunikacyjną XXX w kierunku jazdy \$.

Tabela 6.2 Zestawienie ram podziału całego okresu funkcjonowania węzła

L.p.	Przedział całego okresu funkcjonowania węzła	Oznaczenie	Ramy czasowe
1.	okres wczesno poranny	$o = 1 \equiv O1$	04:30:00-06:29:59
2.	szczyt poranny	$o = 2 \equiv O2$	06:30:00-09:29:59
3.	okres między szczytowy	$o = 3 \equiv O3$	09:30:00-14:29:59
4.	szczyt popołudniowy	$o = 4 \equiv O4$	14:30:00-17:29:59
5.	okres wieczorny	$o = 5 \equiv O5$	17:30:00-00:29:59

Źródło: opracowanie własne

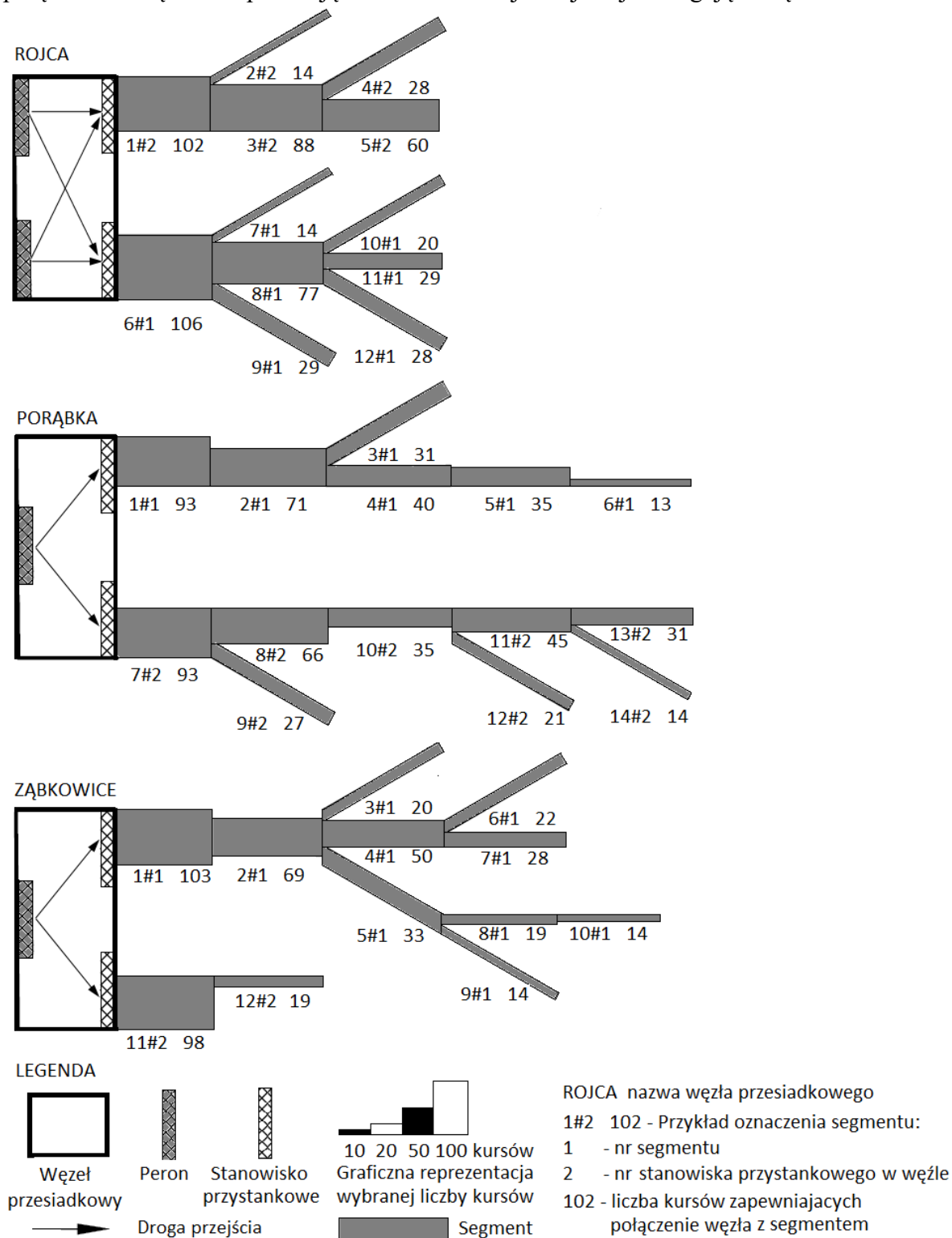
Układ geometryczny badanych węzłów przesiadkowych na tle sieci transportowej i zagospodarowania przestrzennego przedstawiono na rysunku 6.3.



Rys. 6.3. Układ geometryczny badanych węzłów przesiadkowych: a) Rojca; b) Porąbka; c) Zabkowice

Źródło: opracowanie własne na podstawie [255]

Połączenie węzła przesiadkowego z poszczególnymi segmentami zapewniające jest przez różną liczbę kursów co wynika z liczby i układu tras linii komunikacyjnych oraz liczby kursów realizowanych dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy. Dla potrzeb charakterystyki komunikacji miejskiej w zakresie obsługi badanych węzłów przesiadkowych na rysunku 6.4. przedstawiono układ przestrzenny segmentów docelowych, których połączenie z węzłem zapewniają linie komunikacji miejskiej obsługujące węzeł.



Rys. 6.4. Wybrane charakterystyki segmentów docelowych dla badanych węzłów

Źródło: opracowanie własne na podstawie [255]

Na rysunku 6.4. przedstawiono perony, stanowiska przystankowe i drogi przejścia w węźle przesiadkowym. Każdy pojazd transportu zbiorowego dla linii obsługujących węzeł zatrzymuje się w celu realizacji wymiany pasażerskiej tylko na jednym stanowisku przystankowym. Dlatego segmenty docelowe, do których można dotrzeć wsiadając do pojazdów na określonym stanowisku przystankowym w węźle przesiadkowym powiązano w sposób graficzny z poszczególnymi stanowiskami przystankowymi. Każdy szary prostokąt rysunku symbolizuje segment. Zróżnicowanie szerokości prostokąta jest proporcjonalne do liczby kursów, które zapewniają w całym okresie funkcjonowania węzła przesiadkowego w skali doby połączenie segmentu z węzłem przesiadkowym.

Liczba segmentów docelowych powiązanych z poszczególnymi stanowiskami przystankowymi w węźle przesiadkowym jest zróżnicowana i dla badanych węzłów przesiadkowych zawiera się w przedziale od 2 do 10 segmentów. Największe zróżnicowanie występuje w węźle Ząbkowice, najmniejsze w węźle Rojca. Wraz z oddalaniem się od węzła przesiadkowego maleje liczba kursów zapewniających połączenie z poszczególnymi segmentami. Wynika to z układu tras, przy czym w większości przypadków kolejne segmenty wyznaczone są na skutek oddzielenia trasy jednej linii. Poszczególne segmenty cechuje różna liczba kursów zapewniających połączenie z węzłem przesiadkowym, wynikająca m.in. z liczby linii komunikacyjnych obsługujących poszczególne segmenty.

Liczba kursów zapewniających połączenie poszczególnych segmentów z węzłem przesiadkowym nie jest rozdzielona równomiernie pomiędzy poszczególne segmenty. Dla przeważającej liczby segmentów liczba kursów zapewniających połączenie wynika z obsługi segmentu przez pojedyncze linie autobusowe. Natomiast kilka wybranych segmentów, zlokalizowanych blisko węzła przesiadkowego jest obsługiwanych przez znaczną liczbę kursów. We wszystkich badanych węzłach przeważają segmenty obejmujące do 10 stanowisk przystankowych, których połączenie z węzłem przesiadkowym zapewnia mniej niż 50% dostępnych kursów. Analiza porównawcza badanych węzłów wykazała występowanie zróżnicowania liczby stanowisk przystankowych tworzących segmenty i liczby kursów autobusowych zapewniających połączenia w poszczególnych relacjach. Udział segmentów, których połączenie z węzłem zapewnia więcej niż 50% dostępnych kursów jest najmniejszy w węźle Porąbka, największy w węźle Ząbkowice.

Badanie rozkładu czasu przebycia dróg przejścia

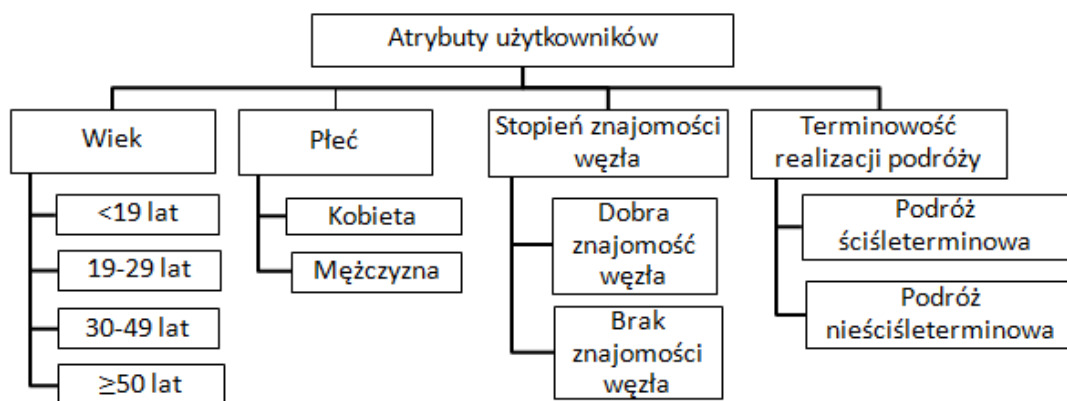
Rozkład czasu przebycia każdej drogi przejścia p w poszczególnych okresach dla badanych węzłów wyznaczono z zastosowaniem modeli symulacyjnych ruchu pieszych skonstruowanych przy użyciu programu Anylogic 8.7.2. firmy The AnyLogic company. W zastosowanym modelu symulacyjnym odwzorowano proces: wysiadania pasażerów z pociągów, opuszczenia węzła przesiadkowego przez pasażerów kończących podróż oraz przemieszczania pasażerów drogami dojścia podczas zmiany środka transportu. Przyjęte dane wejściowe do przeprowadzenia badań symulacyjnych obejmowały:

- wymiary geometryczne elementów infrastruktury dla pieszych tworzących drogi przejścia,
- wielkość potoków pasażerów przyjeżdżających do węzła w kolejnych kursach i przemieszczających się poszczególnymi drogami dojścia wyznaczonych na podstawie

danych o wymianie pasażerskiej w węźle przesiadkowym i obszarze oddziaływania węzła,

- prędkość ruchu pieszych charakteryzującą pasażerów przemieszczających się w węźle,
- strukturę użytkowników odrębnie w kolejnych okresach.

Na podstawie przeglądu literatury [41, 103, 126, 171, 187] przyjęto, że strukturę użytkowników węzła przesiadkowego charakteryzować będą przedstawione na rysunku 6.5. cztery atrybuty z przypisanym zbiorem stanów determinujących zróżnicowanie prędkości przejścia.

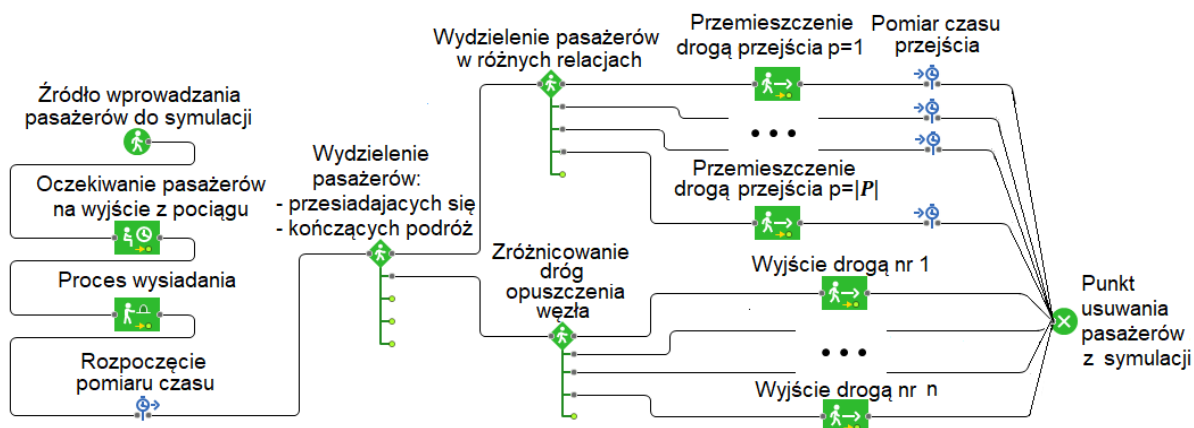


Rys. 6.5. Schemat atrybutów różnicujących użytkowników węzła przesiadkowego

Źródło: opracowanie własne

Przyjęte atrybuty stanowią podstawę wyróżnienia wśród użytkowników węzła przesiadkowego 32 jednorodnych grup użytkowników zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym w ciągu doby. Rozkład prędkość przebycia drogi dojścia dla każdej grupy użytkowników opisano rozkładem normalnym o odmiennych wartościach parametrów rozkładu zależnych od atrybutów charakteryzujących grupę.

Model symulacyjny odwzorowuje losowość w procesie wysiadania pasażerów z pociągów i przejścia dróg dojścia w węźle przesiadkowym oraz założoną strukturę pasażerów w danym okresie σ . Na rysunku 6.6. przedstawiono opracowaną w zastosowanym programie logikę modelu ruchu pasażerów w węźle i pomiaru czasu przebycia dróg przejścia.



Rys. 6.6. Zastosowany w badaniu węzłów schemat procesu ruchu pasażerów zaimplementowany w modelu symulacyjnym

Źródło: opracowanie własne

Przyjętym w pracy celem modelowania ruchu pieszego jest określenie rozkładu prawdopodobieństwa opisującego dyspersję czasu przebycia przez podróżnych drogi przejścia. W opracowanym modelu dla każdego przejścia pasażera czas mierzony jest między momentem wyjścia danego pasażera z pojazdu a momentem wejścia danego pasażera na stanowisko przystankowe w węźle przesiadkowym. W modelu symulacyjnym odwzorowano zjawiska i procesy ruchu jakie występują w węzłach przesiadkowych poprzez wprowadzenie w realizowanych symulacjach 32 jednorodnych grup użytkowników. Prędkość przemieszczania przypisana do jednorodnej grupy użytkowników opisana została rozkładem normalnym. Każdemu pasażerowi modelowanemu w symulacji na etapie uruchomienia badania przydzielano wylosowaną prędkość przemieszczania dla zadanych parametrów rozkładu prawdopodobieństwa. Następnie pasażerowie umieszczani byli w pociągu, gdzie gromadzili się przy drzwiach oczekując na możliwość opuszczenia pociągu. Po wystąpieniu w symulacji zdarzenia otwarcia drzwi pasażerowie oczekujący w kolejkach wysiadali, aby rozpocząć przemieszczanie się drogami przejścia. W przemieszczającym się potoku pasażerów odwzorowywano zarówno pasażerów zmieniających środek transportu jak i kończących podróż w węźle przesiadkowym. Oddziaływania pomiędzy pasażerami w potoku wpływa w modelu na czas przebycia dróg przejścia. Pasażerowie kończący podróż opuszczają węzeł przesiadkowy wszystkimi dostępnymi wyjściami a każdy z pasażerów zmieniający środek transportu identyfikuje i wybiera tę drogę dojścia, która jest przypisana do relacji podróży danego pasażera.

Wartości udziałów każdej jednorodnej grupy w strukturze użytkowników węzła przesiadkowego w kolejnych okresach o i typach dni ruchowych eprzyjęto na podstawie wyników badań systemu transportowego dla subregionu centralnego województwa śląskiego [110] prowadzonych na głównych przystankach PTZ. Stosowane w modelu symulacyjnym opracowanym w zastosowanym programie wartości udziałów grup użytkowników oraz średniej i odchylenia standardowego prędkości przejścia przedstawiono w załączniku 3 w tabelach Z3-1÷Z3-3.

W wyniku przeprowadzenia badań symulacyjnych ruchu pieszych w węzłach przesiadkowych z zastosowaniem dedykowanego środowiska programistycznego wyznaczone zostały w dysertacji rozkłady empiryczne czasu przebycia dróg przejściap w okresach o . Łącznie uzyskano 120 zbiorów danych poddanych analizie statystycznej. Celem badania czasu przebycia dróg przejścia była identyfikacja wartości parametrów opisujących kształt teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa, z którym największą zgodność wykazują empiryczne rozkłady prawdopodobieństwa czasu przejścia. Po wstępnych analizach wybrano 5 teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa zmiennej ciągłej. Częstość wystąpienia braku zgodności empirycznych rozkładów prawdopodobieństwa opisujących czas przebycia dróg przejścia p w okresach o z rozkładami teoretycznymi na poziomie istotności α 0,05 wyniosła odpowiednio dla:

- mieszaniny dwóch rozkładów normalnych⁸ 2%,
- uogólnionej wartości ekstremalnej 2%,
- Jonsona 5%,
- logarytmiczno-normalnego 6%,
- normalnego 54%.

Teoretyczne rozkłady prawdopodobieństwa, dla których wykryto w dysertacji najmniejszy udział przypadków odrzucenia zgodności rozkładu danych empirycznych, wynoszący 2% to mieszanina dwóch rozkładów normalnych i uogólnionej wartości ekstremalnej. Prawdopodobieństwo potwierdzenia braku zgodności rozkładu empirycznego z teoretycznym nie zależy od okresu i typu dni ruchowych e , dla których prowadzono analizę. Wyjątek stanowi rozkład normalny, dla którego dwa razy częściej potwierdzano w rozprawie brak zgodności w okresach pierwszym $O1$ i drugim $O2$ niż w okresach od trzeciego $O3$ do piątego $O5$.

W dalszych badaniach do opisu dyspersji czasu przebycia dróg przejścia przyjęta została mieszanina dwóch rozkładów normalnych. Wyznaczone w pracy dla każdej drogi przejściowej w każdym okresie oi w każdym typie dni ruchowych wartości parametrów przyjętego teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa opisujących strukturę czasu przebycia poszczególnych dróg przejścia pw badanych węzłach, w kolejnych okresach o i wyróżnionych typach dni ruchowych e (łącznie 120 przypadków) zamieszczono w załączniku 3 w tabelach Z3-4÷Z3-11. Wyznaczone wartości parametrów zastosowano w pracy w dalszych badaniach, tzn. przyjęto jako dane wejściowe charakteryzujące węzły przesiadkowe do proponowanej metody synchronizacji wpływając na budowę rozkładu jazdy w węźle, dostosowanego do momentów wejścia pasażerów na stanowiska przystankowe w węzłach.

6.2. Analiza obsługi węzłów przesiadkowych przez linie komunikacyjne

Działania przeprowadzone w ramach przygotowania danych wejściowych do zastosowania opracowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy objęły przetworzenie danych historycznych z systemów rejestracji ruchu środków transportu zbiorowego obsługujących badane węzły przesiadkowe w Górnośląsko-Zagłębiowskiej, ze uwzględnieniem zmienności punktualności kursowania pociągów i autobusów w różnych okresach doby i typach dni ruchowych. Analizy te objęły:

- selekcję i charakterystykę odchylek od planowanych momentów przyjazdów pociągów w analizowanych węzłach,

⁸ Mieszanina dwóch rozkładów normalnych (Gaussian mixture) – to teoretyczny rozkład prawdopodobieństwa będący ważoną sumą dwóch rozkładów normalnych i opisany przez sześć parametrów. Są to wartość średnia i odchylenie standardowe opisujące składowe rozkłady normalne oraz dwa współczynniki o sumie równej 1, będące wagami podczas sumowania dwóch składowych rozkładów normalnych.

- selekcję i charakterystykę odchylek od planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej w badanych węzłach przesiadkowych na obszarze GZM,
- charakterystykę i grupowanie linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy na podstawie odchylek od rozkładu jazdy,
- selekcję i charakterystykę odchylek od rozkładu jazdy charakteryzujących się największą dyspersją, w zakresie regularnych warunków ruchu, jakie zarejestrowano dotychczas w transporcie zbiorowym GZM,
- grupowanie danych stanowiących wynik analiz w postaci danych wejściowych dla zbioru przypadków testowych, dla których zastosowano proponowaną metodę synchronizacji rozkładów jazdy,
- analizę danych opisujących największe regularne odchyłki od rozkładu jazdy charakteryzujące węzły przesiadkowe w GZM,
- identyfikację przypadków testowych zastosowanych podczas implementacji opracowanej metody w praktyce

Działania te stanowią istotny etap praktycznego zastosowania metody i odzwierciedlają funkcjonowanie systemu transportu zbiorowego w rzeczywistych warunkach, które muszą być uwzględnione przy ocenie skuteczności synchronizacji rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym.

Selekcja i charakterystyka odchylek od planowanych momentów przyjazdów pociągów

Analizie poddano zbiory odchylek od rozkładu jazdy w transporcie kolejowym udostępnione przez zarządcę infrastruktury PKP PLK S.A. z okresu od 01.01.2018 r. do 11.03.2020 r. Dla każdego kursu dla poszczególnych połączeń kolejowych dysponowano informacją o planowanych i rzeczywistych momentach przyjazdów i odjazdów pociągów z badanych węzłów. Dane rejestrowane były z dokładnością do minuty oraz poddane zostały przetworzeniu zrealizowanym zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziale 5.2. Wyselekcjonowane dane stanowiły w pracy podstawę oceny zgodności rozkładów empirycznych zbiorów danych opisujących punktualność z teoretycznymi rozkładami prawdopodobieństwa. Liczbę kursów kolejowych po przeprowadzeniu selekcji, stanowiących podstawę do oceny istotności różnic i doboru parametrów rozkładów prawdopodobieństwa łącznie oraz dla poszczególnych węzłów i okresowo przedstawiono w tabeli 6.3.

Tabela 6.3 Zestawienie liczby połączeń kolejowych poddanych analizie dopasowania rozkładów prawdopodobieństwa opisujących odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągów do węzła przesiadkowego $Popp(jk, o)$

Węzeł przesiadkowy	Liczba połączeń zbadanych w ruchu kolejowym					
	Okres					Łącznie
	1	2	3	4	5	
Rojca	851	2 419	1 659	2 096	2 330	9 355
Porąbka	400	2 004	1 548	1 607	846	6 405
Ząbkowice	3 097	3 042	4 063	4 742	3 463	18 407
Łącznie	4348	7465	7270	8445	6639	34167

Źródło: opracowanie własne

Widoczne w tabeli zróżnicowanie liczby kursów determinowane jest przez rozkład jazdy i przyjęty czas trwania poszczególnych okresów o . Liczba kursów realizowanych w poszczególnych okresach o węzłach Porąbka i Rojca jest podobna, wyróżniają się przy tym okresy szczytów komunikacyjnych, w których liczba kursów jest znacznie większa niż w pozostałych okresach.

Zbiór danych poddano ocenie istotności różnic w strukturze odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów. Wyniki potwierdziły zasadność prowadzenia odrębnych badań zarówno w poszczególnych typach dni ruchowych e jak i okresach o . Dla obu czynników w 75% przypadków potwierdzono odmiennność poszczególnych zbiorów danych. Struktura i wartość średnia odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów w kolejnych okresach o jest zróżnicowana i zależy od poszczególnych linii komunikacyjnych. W 50% relacji w transporcie kolejowym w wyniku analizy wskazane zostały pary a w 30% trójki okresów o , pomiędzy którymi nie występują istotne różnice w zbiorach danych odchyłek od rozkładu jazdy. Natomiast zasadność odrębnego badania odchyłek od rozkładu jazdy dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym potwierdził brak istotności różnic dla poszczególnych zbiorów danych wykazany jedynie w 12% przypadków w okresie roku szkolnego ER i 22% w okresie wakacji EW .

Następnie podjęto próby doboru parametrów rozkładów teoretycznych, które pozwolą potwierdzić zgodność danych empirycznych z rozkładami prawdopodobieństwa: geometrycznym, Poissona, dwumianowym i Bernoullego, niezależnie dla zbiorów danych opisujących oddzielnie: relację w transporcie kolejowym $j\kappa$, w okresie o i typie dni ruchowych e . Zgodność danych empirycznych z teoretycznym rozkładem prawdopodobieństwa potwierdzono dla 30% analizowanych zbiorów danych. Udział liczby kursów przyspieszonych jest nieznaczny, nie przekracza 3% dla 75% zbadanych relacji w transporcie kolejowym $j\kappa$. Występuje natomiast duże zróżnicowanie udziałów liczby kursów punktualnych dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym $j\kappa$, determinowane również przez charakterystykę węzła. Stanowi to przyczynę braku potwierdzenia zgodności z teoretycznymi rozkładami prawdopodobieństwa. Dlatego w dalszej części pracy odchyłki od rozkładu jazdy są opisywane za pomocą wyznaczonych empirycznych rozkładów prawdopodobieństwa, które dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym $j\kappa$ zamieszczono w załączniku 2 w tabelach Z2-3÷Z2-8.

Selekcja i charakterystyka odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej w badanych węzłach przesiadkowych

Analiza dotyczyła struktury danych charakteryzujących punktualność realizacji kursów w obsłudze badanych węzłów przesiadkowych na obszarze metropolii. Podstawę stanowiły dane rejestrowane w sposób ciągły na podstawie pokładowego systemu GPS autobusów komunikacji miejskiej. Dane gromadzone przez ZTM w bazie danych systemu Śląska Karta Usług Publicznych, udostępnione dla potrzeb pracy, obejmują okres od rozpoczęcia rejestrowania punktualności kursów (dla zbadanych w pracy linii zawiera się w przedziale od 1 lipca 2015 do 18 kwietnia 2016) do 11 marca 2020 włącznie. Liczba badanych odchyłek

od rozkładu jazdy po realizacji selekcji w podziale na węzły i okresy o , stanowiących podstawę doboru parametrów rozkładów prawdopodobieństwa przedstawiono w tabeli 6.4. Selekcję zrealizowano zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziale 5.2.

Tabela 6.4 Zestawienie liczby kursów w komunikacji miejskiej po przeprowadzeniu trzyetapowej selekcji danych w podziale na węzły, okresy i typy dni ruchowych

Węzeł przesiadkowy	Sposób agregacji danych													Łącznie
	Liczba kursów w dni robocze w okresie roku szkolnego <i>ER</i>						Liczba kursów w dni robocze w okresie wakacji <i>EW</i>							
	Okres <i>o</i>					Łącznie	Okres <i>o</i>					Łącznie		
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5			
Rojca	9 707	13 505	15 051	12 311	15 854	66 428	5 554	9 115	11 025	8 782	13 581	48 057	114 485	
Porąbka	6 478	10 174	15 055	9 176	14 648	55 531	6 524	8 221	16 329	13 414	15 107	59 595	115 126	
Ząbkowice	9 638	12 515	21 544	15 278	19 465	78 440	7 542	13 618	16 905	15 476	15 236	68 777	147 217	

Źródło: opracowanie własne

Widoczne zróżnicowanie liczby danych determinowane jest m.in. przez liczbę linii komunikacyjnych obsługujących poszczególne węzły przesiadkowe oraz częstotliwość kursowania i czas trwania okresów o . W przeliczeniu na linię komunikacyjną w kierunku jazdy najwięcej danych zgromadzono dla węzła Porąbka. Rozbieżności w liczbie danych pomiędzy węzłami przesiadkowymi są bardziej wyraźne w dni robocze w okresie wakacji EW , dla których wskaźnik zmienności wyniósł 22% podczas gdy w okresie roku szkolnego ER 3%. W okresie roku szkolnego ER najwięcej danych charakteryzuje szczyt poranny $O2$ a dni robocze w okresie wakacji EW najwięcej danych występuje dla szczytu popołudniowego $O4$.

Dla 95% zbadanych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy potwierdzono istotne różnice pomiędzy zbiorami odchyłek od rozkładu jazdy charakteryzującymi poszczególne okresy o . W 16% przypadków każdy z pięciu okresów o cechowała inna wielkość dyspersji odchyłek od rozkładu jazdy. Natomiast w pozostałych sytuacjach wskazano grupy okresów o , pomiędzy którymi nie występują istotne różnice wielkości odchyłek od rozkładu jazdy, w tym 55% sytuacji dotyczyło par okresów o a 20% trzech okresów o . W okresie drugim najczęściej, a w okresie czwartym najrzadziej wskazywano zgodność, podobieństwo odchyłek od rozkładu jazdy z danymi charakteryzującymi wybrane, inne okresy o . Porównując parami wszystkie zbadane w pracy linie komunikacyjne w kierunkach jazdy istotność różnic w zbiorach danych potwierdzono w 97% sytuacji. Uzyskane wyniki potwierdzają zatem zasadność niezależnej analizy zbiorów odchyłek od rozkładu jazdy dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy ja w okresach o , dla typów dni ruchowych e . Potwierdza to występowanie wyraźnie różnego narażenia poszczególnych linii komunikacyjnych na uciążliwość niepunktualności w realizacji kursów w poszczególnych okresach doby o i roku. W dalszych badaniach zastosowano do charakterystyki węzłów przesiadkowych odrębne wartości parametrów teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa przyjętych do opisu struktury zbiorów odchyłek od rozkładu jazdy dla każdego z wyróżnionych zbiorów.

Poszukiwanie teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa, z którym dla największej liczby zbiorów danych empirycznych nie zostanie odrzucona hipoteza o zgodności stanowi

zasadniczy element badania odchyłek od rozkładu jazdy. Łącznie uzyskano 296 zbiorów danych poddanych analizie statystycznej. Po wstępnych analizach wybrano 5 teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa zmiennej ciągłej. Częstość wystąpienia braku zgodności empirycznych rozkładów prawdopodobieństwa charakteryzujących linie komunikacyjne w kierunkach jazdy w okresach o z rozkładami teoretycznymi na poziomie istotności $\alpha 0,05$ wyniosła odpowiednio dla:

- mieszaniny dwóch rozkładów normalnych 2%,
- uogólnionego wartości ekstremalnej 20%
- Jonsona SB 33%,
- normalnego 43%,
- trójkątnego 65%.

Empiryczne rozkłady prawdopodobieństwa najlepiej charakteryzuje mieszanina dwóch rozkładów normalnych. Brak podstaw dla odrzucenia zgodności rozkładu empirycznego z mieszaniną dwóch rozkładów normalnych wystąpił w 98% zbadanych zbiorów danych charakteryzujących poszczególne linie komunikacyjne w kierunkach jazdy w okresach. Wskazany teoretyczny rozkład prawdopodobieństwa spośród badanych rozkładów wykazywał najmniejszą rozbieżność względem rozkładów empirycznych. Mieszanina dwóch rozkładów normalnych pozwala w największym stopniu spośród badanych rozkładów prawdopodobieństwa opisać rozkład odchyłek od rozkładu jazdy, który cechuje prawostronna skośność i duży udział kursów opóźnionych. W przeprowadzonych badaniach zgodność danych empirycznych z pozostałymi rozważanymi teoretycznymi rozkładami prawdopodobieństwa odrzucono co najmniej o 20% częściej w okresie roku szkolnego ER względem okresu wakacji EW . Zgodność rozkładu normalnego w okresie roku szkolnego ER dwa razy częściej odrzucono w czasie szczytów komunikacyjnych $O2$ i $O4$ niż w okresach pozaszczytowych $O1$, $O3$ i $O5$, ze względu na występowanie większych odchyłek od rozkładu jazdy i związanej z tym większej dyspersji rzeczywistych momentów odjazdów autobusów ze stanowisk przystankowych w węzłach przesiadkowych. Wartości parametrów przyjęte do opisu rozkładów prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłek od rozkładu jazdy poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy ja w okresach o dla poszczególnych węzłów i stosowane w dalszych badaniach zamieszczono w załączniku 2 w tabelach Z2-11÷Z2-16.

Charakterystyka i grupowanie linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy na podstawie odchyłek od rozkładu jazdy

Grupowania linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy dokonano na podstawie podobieństwa wartości średnich opisujących zbiory odchyłek od rozkładu jazdy w kolejnych okresach o . Na podstawie metody k średnich określono profil wartości średnich dla skupień (wyróżnionych grup linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy, zidentyfikowanych podczas badania) w kolejnych okresach o . Wyniki dla poszczególnych typów dni ruchowych przedstawiono w tabeli 6.5. i na rysunku 6.7.

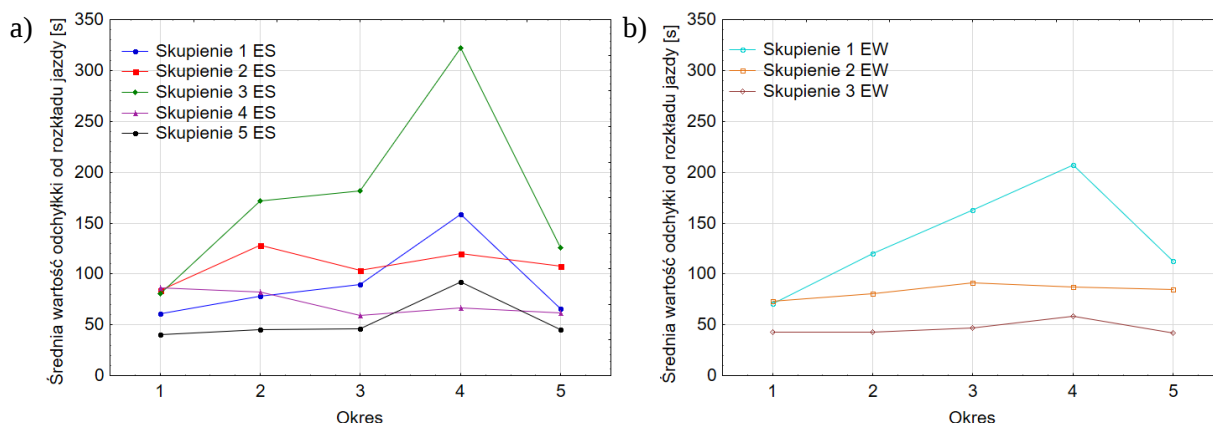
Tabela 6.5 Zestawienie badanych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy przypisanych do poszczególnych skupień

Typ dni ruchowych	Skupienie	Węzeł przesiadkowy		
		Rojca	Porąbka	Ząbkowice
Dni robocze w okresie roku szkolnego ER	1 ES	17B1; 73A2	34A1	175B1; 637B1
	2 ES	17A2; 173A2	•	140A2; 175A2; 237A2; 635A2; 637A2
	3 ES	73B1; 94A2; 608A2;	260A1; 835A1	•
	4 ES	•	34B2; 221B1; 835B2	84A2
	5 ES	94B1; 173B1; 708B1	221A1; 260B2	84B1; 140B1; 237B1; 635B1
Dni robocze w okresie wakacji EW	1 EW	73B1; 94A2; 608A2	260A1; 835A1	•
	2 EW	17A2; 17B1; 73A2; 173A2	34A1; 34B2; 221B2	84A2; 140A2; 175A2; 237B1; 635A2; 637A1; 637B2
	3 EW	94B1; 173B1; 708B1;	221A1; 260B2; 835B2	84B1; 140B1; 175B1; 635B1; 237A2

Objaśnienia:
• - badane zjawisko nie wystąpiło

Źródło: opracowanie własne

W ujęciu szczegółowym w dni robocze w okresie roku szkolnego *ER* wyróżniono 5 a w dni robocze w okresie wakacji *EW* 3 skupienia. Większa liczba wyróżnionych skupień w okresie roku szkolnego *ER* wskazuje na większe zróżnicowanie wartości w zbadanych zbiorach odchylek od rozkładu jazdy dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy. Na zróżnicowanie odchylek od rozkładu jazdy wpływa typ dni ruchowych jak i lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej. Wynika to ze zróżnicowanego oddziaływania zakłóceń pochodzących z systemu PTZ i otoczenia na punktualność ruchu autobusów w kursach dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy.



Rys. 6.7. Schemat Charakterystyka wartości średniej ze zbioru odchylek od rozkładu jazdy w okresach *o* dla skupień linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w poszczególnych typach dni ruchowych *e*: a) dni robocze w okresie roku szkolnego *ER*, b) dni robocze w okresie wakacji *EW*

Źródło: opracowanie własne

Przedstawione na rysunku 6.7. uzyskane wyniki analizy stanowiły podstawę identyfikacji dwóch typów profili wartości średniej odchyłki od rozkładu jazdy: z maksimum w okresie popołudniowego szczytu komunikacyjnego *O4* i bez wyraźnych tendencji. Wyniki grupowania linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy wskazują na istnienie zróżnicowania wielkości i kształtu profilu odchylek od rozkładu jazdy opisujących wartości średnie w kolejnych okresach *o*. Zidentyfikowane tendencje są podobne dla dni roboczych w okresie roku szkolnego *ER* jak i dni roboczych w okresie wakacji *EW*. Największe wartości cechują węzeł Rojca, a wyraźny wzrost wartości występuje w okresie popołudniowego szczytu komunikacyjnego *O4*. W przypadku węzła Porąbka występuje zróżnicowanie wielkości odchylek od rozkładu jazdy dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy, inaczej niż w węźle Ząbkowice, dla którego występują najbardziej jednorodne odchyłki dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy. Wyróżniono na tej podstawie w węźle Ząbkowice dwie grupy linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy tj. o mniejszych i większych wartościach średnich w profilu odchylek od rozkładu jazdy. W obu grupach obserwowane są większe wartości w jednym ze szczytów komunikacyjnych.

W dni robocze w okresie wakacji *EW* mniejsze są wartości średnie odchylek od rozkładu jazdy. Dla większości zbadanych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w skali całego okresu funkcjonowania węzła występują zbliżone odchyłki od rozkładu jazdy. Brak jest wyraźnego wpływu szczytów komunikacyjnych na zróżnicowanie wartości. Lecz pięć linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w zakresie profilu wartości średnich odróżnia się od pozostałych. Największe odchyłki od rozkładu jazdy występują w tych przypadkach nie w okresie popołudniowego szczytu komunikacyjnego *O4* ale w pozostałych okresach *o*, zwłaszcza w szczycie porannym *O2*. Również w okresie międzyszczytowym *O3* wartości są większe niż w przypadku pozostałych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy *ja*. W dodatku obserwowany jest wzrost wartości średniej, opisującej odchyłki od rozkładu jazdy dla wskazanego skupienia w kolejnych okresach *o*. Uzyskane wyniki stanowią podstawę ogólnej charakterystyki struktury odchylek od rozkładu jazdy w poszczególnych węzłach w całym okresie funkcjonowania. Zróżnicowanie pomiędzy węzłami odwzorowano w pracy, wyróżniając stany w atrybucie „lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej”.

Analiza danych opisujących Węzeł Modelowy zdefiniowany w rozprawie dla potrzeb badania największych regularnych odchylek od rozkładu jazdy opisujących węzły przesiadkowe w GZM

W celu uwzględnienia w analizie największej dyspersji odchylek od rozkładu jazdy, jaka występuje w systemie transportowym GZM uwzględniono dodatkowy czwarty, fikcyjny węzeł przesiadkowy „Modelowy”. Cechy węzła związane z drogami przejścia, wielkością obszaru oddziaływania węzła przesiadkowego, liczbą linii komunikacyjnych, liczbą kursów i układem tras linii przyjęto dla węzła Modelowego jako średnie z danych opisujących badane rzeczywiste węzły przesiadkowe. Natomiast w zakresie opisu procesu zmiany środka transportu w ujęciu stochastyczny przyjęto wartości parametrów teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa opisujących strukturę odchylek od rozkładu jazdy o największych wartościach średnich jakie występują regularnie na peronach i stanowiskach przystankowych w sieci transportowej na terenie GZM.

Dla potrzeb węzła Modelowego zbadano odchyłki od planowanych momentów przyjazdów pociągów dla stacji Katowice $Popp(jk, o)$ wybierając w rezultacie relacje w transporcie kolejowym jk o największej wartości średniej opisującej odchyłki od rozkładu jazdy w okresie o . Liczba połączeń kolejowych zastosowanych w ocenie zgodności zbiorów danych empirycznych z teoretycznymi rozkładami prawdopodobieństwa wyniosła łącznie 29 094, w tym odpowiednio w okresie:

- pierwszym 3 577,
- drugim 6 717,
- trzecim 4 569,
- czwartym 7 193,
- piątym 7 038.

Przyjęta do dalszej analizy liczba danych charakteryzujących połączenia kolejowe jest różna w poszczególnych okresach o . Różnice wynikają z rozkładu jazdy w transporcie kolejowym, dostosowania częstotliwości ruchu pociągów pasażerskich do zgłaszanego zapotrzebowania na realizację podróży oraz czasu trwania okresów o . Najmniejsza liczba połączeń wystąpiła w okresie pierwszym, wczesno porannym. Największą natomiast liczbę realizowanych połączeń zarejestrowano w czasie popołudniowego szczytu komunikacyjnego. Wartość ta jest o około 7% większa od liczby danych charakteryzujących poranny szczyt komunikacyjny, zbliżona natomiast do liczby danych opisujących relacje w transporcie kolejowym w okresie wieczornym 05. Duża różnica między liczbą połączeń realizowanych w szczytach komunikacyjnych 02 i 04 a liczbą połączeń w okresie międzyszczytowym 03. Względna różnica liczby danych wynosi około 47% w odniesieniu do szczytu porannego 02.

Analogicznie jak w przypadku analizy danych dla wybranych, rzeczywistych węzłów przesiadkowych również dla danych charakteryzujących węzeł Modelowy podjęto próby doboru parametrów rozkładów teoretycznych. Do oceny zgodności danych empirycznych z teoretycznymi rozkładami prawdopodobieństwa przyjęto rozkłady: geometryczny, Poissona, dwumianowy i Bernoulliego. Badania zrealizowano dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym, w okresach o i typach dni ruchowych e . Zgodność danych empirycznych z teoretycznym rozkładem prawdopodobieństwa potwierdzono dla 33% analizowanych zbiorów danych opisujących dni robocze w okresie wakacji EW , jedynie z rozkładem geometrycznym. W przypadku dni roboczych w okresie roku szkolnego ER , jak i doboru innych teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa nie potwierdzono zgodności kształtu rozkładów dla żadnego z rozpatrywanych zbiorów danych. Przyczyną braku potwierdzenia zgodności danych empirycznych z teoretycznymi rozkładami prawdopodobieństwa było występowanie dużego zróżnicowania udziałów liczby kursów punktualnych dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym. W dodatku dla większości przypadków udział połączeń punktualnych jest większy, niż liczebność pierwszej klasy dla rozpatrywanych teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa zmiennej dyskretnej. Nie bez znaczenia pozostaje również fakt, że wybrane rozkłady prawdopodobieństwa dla zmiennej dyskretnej posiadają niewielką liczbę parametrów, determinujących kształt rozkładu. Brak potwierdzenia zgodności z teoretycznymi rozkładami prawdopodobieństwa

dla większości przypadków jest przyczyną przyjęcia w dalszej części pracy opisu odchyłek od rozkładu jazdy za pomocą wyznaczonych empirycznych rozkładów prawdopodobieństwa, Dane dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym zamieszczono w załączniku 2 w tabelach Z2-9÷Z2-10.

W celu doboru odchyłek od rozkładu jazdy dla charakterystyki węzła Modelowego analizie poddano autobusowe linie komunikacji miejskiej funkcjonujące w GZM, cechujące się największym poziomem dyspersji odchyłek od rozkładu jazdy. Tak samo jak podczas badania rzeczywistych węzłów przesiadkowych, po przeprowadzeniu trzech etapów selekcji zgodnie z procedurą przedstawioną na rysunku 5.4., zbiory danych empirycznych opisujących odchyłki od rozkładu jazdy autobusów komunikacji miejskiej stanowią podstawę oceny zgodności z teoretycznymi rozkładami prawdopodobieństwa. Łącznie do dalszej charakterystyki i badań węzła modelowego wybrano 59 zbiorów danych i 5 teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa zmiennej ciągłej. Częstość wystąpienia braku zgodności empirycznych rozkładów prawdopodobieństwa charakteryzujących linie komunikacyjne w kierunkach jazdy w okresach o i typach dni ruchowych e , z rozkładami teoretycznymi na poziomie istotności α 0,05 wyniosła odpowiednio dla:

- mieszaniny dwóch rozkładów normalnych 5%,
- uogólnionej wartości ekstremalnej 37%
- Jonsona SB 40%,
- normalnego 45%,
- trójkątnego 80%.

Podobnie jak dla węzłów rzeczywistych, empiryczne rozkłady prawdopodobieństwa najlepiej charakteryzuje mieszanina dwóch rozkładów normalnych. Najrzadziej następuje wtedy brak zgodności rozkładu empirycznego z teoretycznym, najczęściej natomiast dla rozkładu trójkątnego. W przypadku pozostałych rozpatrywanych teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa, występowanie braku zgodności potwierdzono w około 40% przypadków, częściej w okresie roku szkolnego ER niż w okresie wakacji EW oraz częściej w okresach trzecim $O3$, czwartym $O4$ i piątym $O5$ niż w pozostałych okresach o . Wartości parametrów przyjęte do opisu rozkładu odchyłek od rozkładu jazdy dla poszczególnych kierunków linii ja w okresach o dla węzła Modelowego i stosowane w dalszych badaniach zamieszczono w załączniku 2 w tabelach Z2-17÷Z2-18.

Identyfikacja elementów zbioru przypadków testowych V zastosowanych podczas implementacji opracowanej metody w praktyce

Analizie poddano wybrane rzeczywiste węzły przesiadkowe w GZM oraz scharakteryzowano dla potrzeb badań dane wejściowe do proponowanej metody. Opracowaną metodę zastosowano do synchronizacji rozkładów jazdy odrębnie dla zbioru przypadków testowych, różnicowanych w rozprawie na podstawie przyjętych czterech atrybutów (podrozdział 5.7). Dokładna, przyjęta w pracy liczba stanów dla atrybutów „Typ dni ruchowych E ”, „Sposób łączenia taktów SLT ” i „Czynniki o charakterze stochastycznym CS ” została określona w podrozdziale 5.7. Zatem liczebność zbioru przypadków testowych

poddanych analizie w dalszej części dysertacji zależy od liczby stanów przypisanych do atrybutu „Lokalizacja węzła w sieci transportowej i osadniczej”, która jest tożsama z liczbą zbadanych węzłów przesiadkowych. Zgodnie z charakterystyką przedstawioną w niniejszym podrozdziale zbadano cztery węzły przesiadkowe, tj. trzy rzeczywiste węzły funkcjonujące na obszarze GZM oraz teoretyczny, przykładowy węzeł opisany przez odchyłki od rozkładu jazdy o największych wartościach rejestrowanych w GZM. Są to zatem następujące cztery stany atrybutu „Lokalizacja węzła w sieci transportowej i osadniczej” wraz z przyjętymi oznaczeniami:

- Rojca UR ,
- Porąbka UP ,
- Ząbkowice UZ ,
- Modelowy UM .

Tym samym dla potrzeb pracy funkcję $U(v)$ określono w postaci:

$$U(v) \in \{UR, UP, UZ, UM\} \equiv SQ(U, v), v \in V \quad (6-1)$$

Analogicznie jak w przypadku funkcji charakteryzujących pozostałe atrybuty, opisane wzorem 5-8. Przypadki testowe wyznaczono na podstawie konfiguracji doboru stanów w każdym z czterech atrybutów. Uzyskano w ten sposób zbiór 64 przypadków testowych $|V| = 64$ poddanych badaniom z zastosowaniem proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy.

6.3. Analiza zastosowania opracowanej procedury przeszukiwania lokalnego

Celem podrozdziału jest uzasadnienie realizacji algorytmu przeszukiwania lokalnego w proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy w przyjętym kształcie. Przedstawiono charakterystykę sposobu postępowania podczas przeszukiwania lokalnego w praktycznym zastosowaniu do zbioru badanych przypadków testowych. Omówione zostały wyniki stosowania poszczególnych kroków, działań zdefiniowanych w ramach przeszukiwania lokalnego, identyfikując wpływ proponowanych kroków na uzyskiwane rezultaty, zmienność wyników i charakteryzujących proponowaną metodę. Aspekty realizacji przeszukiwania lokalnego obejmującego modyfikacje pierwszego wyznaczonego rozwiązania opisane zostały w niniejszym podrozdziale w dwóch następujących obszarach:

- Analiza realizacji przeszukiwania lokalnego poprawiającego bieżące rozwiązanie war_v^{*3} - identyfikująca wpływ zastosowania poszczególnych kroków postępowania, liczby iteracji, kolejności doboru segmentów, przeszukiwania z tabu i liczby kroków pamiętanych i sprawdzanych na przebieg poprawiania bieżącego rozwiązania,
- Badanie powtarzalności uzyskanych wyników wyznaczanych z zastosowaniem modelowania symulacyjnego – określające niezbędny zakres badań w celu przeprowadzenia weryfikacji słuszności tezy pracy. Przedstawiono wpływ stanów atrybutów na zróżnicowanie liczby powtórzeń koniecznych do realizacji w celu jednoznacznego wyznaczenia średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu. Przedstawiono przyjęty w pracy sposób porównania rezultatów

i wpływu liczby powtórzeń synchronizacji rozkładów jazdy dla przypadków testowych i liczby ocen wyznaczonych rozkładów jazdy na zróżnicowanie oszacowania średniego czasu oczekiwania.

Analiza przebiegu przeszukiwania lokalnego poprawiającego bieżące rozwiązanie war_v^{*3}

Przedmiotem podrozdziału jest analiza przebiegu obliczeń w ostatecznej postaci przyjętej procedury przeszukiwania lokalnego w proponowanej metodzie synchronizacji rozkładów jazdy. Procedurę postępowania i wartości parametrów zastosowane podczas przeszukiwania lokalnego wyznaczono i zweryfikowano w rezultacie iteracyjnego poddawania algorytmu analizie podczas budowy metody synchronizacji rozkładów jazdy. Celem niniejszej analizy jest wykazanie zasadności realizacji przeszukiwania lokalnego w ramach modyfikacji bieżącego rozwiązania, w przyjętej postaci. Liczba:

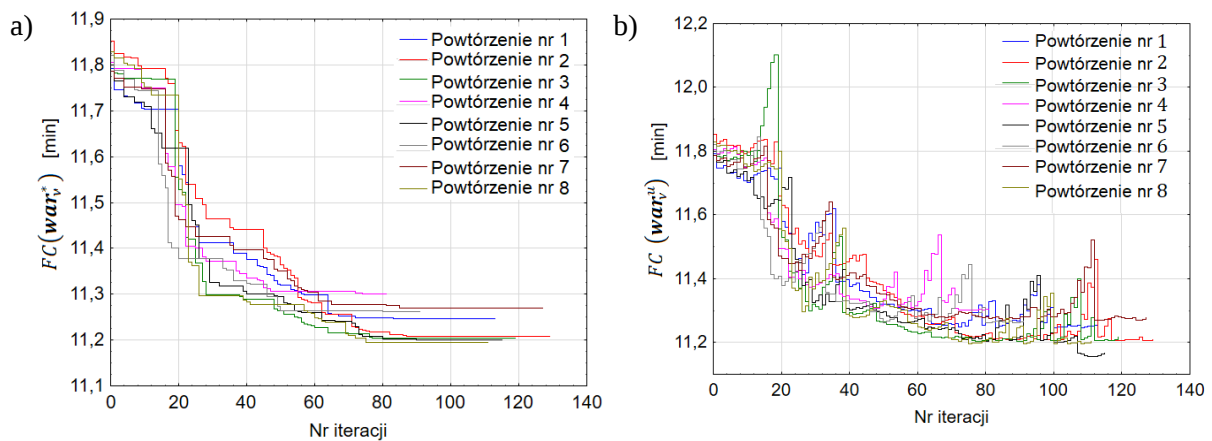
- iteracji,
- sprawdzonych rozwiązań,
- kolejnych modyfikacji, zmian bieżącego rozwiązania war_v^{*3}

w czasie realizacji algorytmu synchronizacji rozkładów jazdy opisywane są przez rozkład prawostronnie asymetryczny dla zbadanego zbioru przypadków testowych.

Liczba realizowanych iteracji w 90% powtórzeń zastosowania proponowanej metody do przypadku testowego zawiera się w przedziale od 60 do 120 iteracji. W węźle Modelowym realizowanych jest o 20% więcej iteracji niż w pozostałych węzłach. W przypadku uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy (tzn. przypadków testowych opisanych przez trzy czynniki stochastyczne, dla stanu opisanego jako $CS1$) podczas przeszukiwania lokalnego w etapie 4 realizowanych jest o 15% więcej iteracji niż w przypadkach gdy przeszukiwanie lokalne realizowane jest dla przypadków testowych opisanych przez jeden czynnik stochastyczny (opisany stanem $CS1$). Przeszukiwanie lokalne wszystkich segmentów wiąże się ze sprawdzeniem łącznie od 200 do 1000 rozwiązań. W węzłach Modelowym i Rojca badanych jest o 80% więcej rozkładów jazdy niż dla przypadków testowych związanych z węzłem Porąbka.

W rezultacie analizy liczby zmian rozwiązania bieżącego war_v^* podczas realizacji przeszukiwania lokalnego dla zbiorów powtórzeń zastosowania metody wskazano, że dominują wartości od 5 do 20 zmian. W badaniu realizowanym dla elementów podzbioru $V(CS3)$, liczba zmian rozwiązania bieżącego war_v^* w czasie realizacji algorytmu była o 38% większa niż w zbiorach powtórzeń dla elementów podzbioru przypadków testowych opisanych jako $V(CS1)$. Natomiast o 69% większą liczbę zmian zarejestrowano dla węzła Modelowego względem pozostałych węzłów.

Na rysunku 6.8. przedstawiono przykład realizacji wybranych ośmiu powtórzeń realizacji procedury przeszukiwania lokalnego dla wybranego przypadku testowego z zastosowaniem niezależnych zbiorów pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu (oznaczonych jako ZS_v).



Rys. 6.8. Przykład przebiegu zmian wartości funkcji kryterium w kolejnych iteracjach realizacji algorytmu przeszukiwania lokalnego dla $v \in V$: a) $FC(\mathbf{war}_v^*)$ dla kolejnych bieżących rozwiązań $\mathbf{war}_v^*$; b) $FC(\mathbf{war}_v^u)$ w kolejnych iteracjach w przeszukiwaniu lokalnym i z tabu

Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 6.8.a) pionowe odcinki identyfikują numery iteracji, w których nastąpiła poprawa bieżącego rozwiązania. Przedstawiony przebieg realizacji poprawiania rozwiązań wskazuje istnienie ogólnej tendencji dla zbioru powtórzeń zastosowania algorytmu w badaniach przypadków testowych. Zróżnicowanie oceny rozwiązania na początku i na końcu realizacji procedury jest podobne. Rozkład wartości o jaką następuje skrócenie wartości średniej czasu oczekiwania pasażerów podczas kolejnych zmian rozwiązania bieżącego $\mathbf{war}_v^*$ cechuje prawostronna skośność. Oznacza to, że wskazuje się w realizacji algorytmu tylko kilka zmian o największym skróceniu średniego czasu oczekiwania. Numery iteracji w których występują kolejne zmiany bieżącego rozkładu jazdy $\mathbf{war}_v^*$ są zbliżone lecz nie jednakowe. Następujące po sobie kolejne zmiany bieżącego rozwiązania w różnych powtórzeniach przebiegu algorytmu następują w iteracjach o różnych numerach. Różnice w tym zakresie pomiędzy powtórzeniami mogą wynosić do 10 iteracji lecz realizowane podczas przeszukiwania lokalnego zmiany bieżącego rozwiązania wynikają z dopasowania rozkładu jazdy do procesu zmiany środka transportu opisanego przez dane wejściowe.

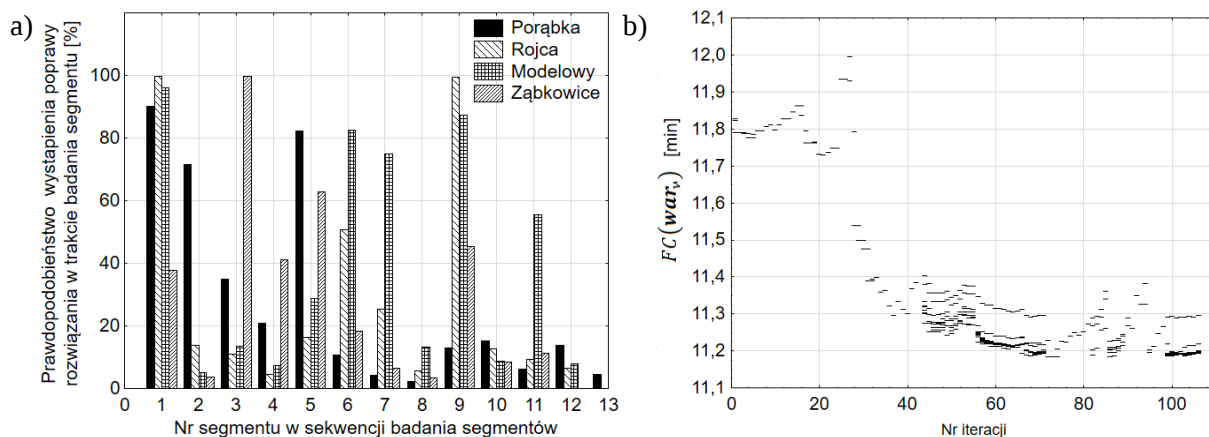
Na rysunku 6.8.b) przedstawiającym zmiany wartości średniej czasu oczekiwania charakteryzujących rozwiązania przyjmowane w kolejnych iteracjach $\mathbf{war}_v^*$ lub $\mathbf{war}_v^u$ widoczne są tendencje wskazane dla analizy zmian kolejnych bieżących rozwiązań. W analizie realizowanej dla poszczególnych segmentów docelowych widoczne jest, że jeśli próby znalezienia lepszego rozwiązania bieżącego $\mathbf{war}_v^*$ mimo przeszukiwania z tabu nie przynoszą rezultatów a wartość funkcji kryterium gwałtownie rośnie procedura jest przerywana. Rozpoczyna się badanie rozwiązań związanych z liniami komunikacyjnymi w kierunkach jazdy zapewniającymi połączenie kolejnego segmentu docelowego a punktem

wyjścia jest najlepsze wyznaczone dotychczas rozwiązanie $\mathbf{war}_v^*$. Na rysunku 6.8. jest to uwidocznione poprzez gwałtowne spadki wartości funkcji kryterium dla niektórych iteracji.

Skrócenie czasu oczekiwania osiągnięte jest podczas badania średnio 3 spośród zbioru segmentów docelowych w obszarze oddziaływania węzła przy czym wartość wskaźnika zmienności dla zbioru V wynosi 38%. Liczba iteracji realizowanych na każdym ze wskazanych segmentów opisana jest rozkładem prawostronnie umiarkowanie skośnym. W 90% zbadanych powtórzeń dla przypadków testowych podczas przeszukiwania lokalnego dla segmentu realizowane jest do 7 iteracji. W wyniku analizy zbadanego zbioru przypadków testowych V wskazano, że ponad 80% kolejnych zmian rozwiązań osiągniętych w trakcie realizacji algorytmu następuje w pierwszej połowie całkowitej liczby iteracji. Jedynie dla przypadków testowych związanych z węzłem Modelowym lub sposobem łączenia taktów $SLT1$, poprawa rozwiązania następuje także później i wtedy dalsze zmiany bieżącego rozkładu jazdy przestają następować średnio dopiero po zrealizowaniu 75% wszystkich iteracji, a do zakończenia procedury pozostaje wtedy około 25 iteracji.

Zasadność realizacji procedury zgodnie z wyznaczonym w ramach pracy tokiem postępowania i obejmującego lokalne poprawianie rozwiązań potwierdzają wyniki zbioru analiz:

- Liczba iteracji wykonywanych podczas badania segmentu, wielkość skrócenia czasu oczekiwania oraz dyspersja czasu oczekiwania opisująca rozwiązania sąsiednie nie zależą od pozycji segmentu w badanej sekwencji. Wyłącznie dla węzłów Porąbka i Rojca potwierdzono istnienie słabej korelacji dodatniej dla wielkości poprawy.
- Wystąpienie poprawy rozwiązania podczas badania poszczególnych segmentów nie zależy od wartości funkcji czasu oczekiwania pasażerów chcących w skali doby dotrzeć do danego segmentu (oznaczonej jako $f4(seg, \mathbf{war}_v)$) ani od liczby kursów zapewniających połączenie węzła przesiadkowego z badanym segmentem (oznaczonej jako $|\mathcal{K}g7_{seg}|$). Wartość prawdopodobieństwa wystąpienia skrócenia czasu oczekiwania na skutek badania rozwiązań związanych z kolejnymi segmentami docelowymi w sekwencji badanych segmentów przedstawiono na rysunku 6.9.a)
- Wskaźnik zmienności wartości średniej czasu oczekiwania dla zbioru rozwiązań sąsiednich zależy od badanego segmentu. Wartość średnia wskaźnika zmienności wynosi 1,9%. Dwa razy większe wartości występują dla węzłów Porąbka i Rojca niż dla pozostałych węzłów oraz dla sposobów łączenia taktów $SLT3$ i $SLT4$ niż w przypadku pozostałych sposobów. Wartości funkcji kryterium wyznaczone dla wszystkich zbadanych rozwiązań w rezultacie jednokrotnej realizacji procedury modyfikacji bieżącego rozwiązania dla wybranego przypadku testowego przedstawiono na rysunku 6.9.b.



Rys. 6.9. Wybrane wyniki analizy przebiegu przeszukiwania lokalnego:

a) Prawdopodobieństwo poprawy rozwiązania war_v^* podczas badania segmentów wyznaczone na podstawie powtórzeń; b) Wartości $FC(war_v)$ dla wszystkich rozwiązań dla przypadku testowego zbadanych proponowaną metodą

Źródło: opracowanie własne

Wyniki przedstawione na rysunku 6.9.a) wskazują na zróżnicowanie prawdopodobieństwa wystąpienia poprawy rozwiązania podczas analizy kolejnych segmentów. Jednocześnie rozkład prawdopodobieństwa jest różny dla poszczególnych węzłów przesiadkowych. Najczęściej uzyskano poprawę rozwiązania tylko na kilku segmentach podczas sekwencji badania kolejnych elementów ze zbioru segmentów. W przypadku węzła Porąbka poprawa rozwiązania następuje zwykle na początku realizacji algorytmu, dla węzła Ząbkowice podczas badania segmentów o numerach środkowych w sekwencji natomiast dla węzłów Modelowego i Rojca częściej pod koniec realizacji algorytmu. Dla wszystkich węzłów poprawa rozkładu jazdy następuje podczas badania pierwszego w sekwencji segmentów.

Na podstawie wyników badań przedstawionych na rysunku 6.9.b) wskazano, że liczba rozwiązań badanych na poszczególnych segmentach zależy od liczby linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy zapewniających połączenie węzła przesiadkowego z segmentem $|JAg1\alpha_{seg}|$. Widoczne jest zróżnicowanie średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu charakteryzującego sąsiednie rozwiązania.

- Przeszukiwanie z tabu wpłynęło na poprawę rozwiązania średnio w 75% powtórzeń (zakres zmienności wynosi od 65% do 85% oraz zależy od stanów w atrybutach lokalizacja węzła w sieci transportowej i osadniczej i sposób łączenia taktów). Wykryto jednocześnie zróżnicowany wpływ przeszukiwania z tabu zależnie od zastosowanego sposobu łączenia taktów. Przeszukiwanie z tabu pozwoliło poprawić rozwiązania w 55% wszystkich segmentów, na których uzyskano poprawę bieżącego rozwiązania podczas przeszukiwania lokalnego w przypadku stosowania sposobów łączenia taktów $SLT1$ i $SLT2$ oraz w 40% segmentów dla przypadków opisanych stanami $SLT3$ i $SLT4$.
- W przypadku segmentów, w których podczas przeszukiwania z tabu poprawiono bieżące rozwiązanie, najczęściej (w 35% sytuacji) zostało znalezione w ostatniej iteracji. Prawdopodobieństwo, że najlepszy podczas przeszukiwania z tabu rozkład jazdy wystąpi

w pierwszej połowie całkowitej liczby iteracji przeszukiwania z tabu dla segmentu wynosi 40%.

- Liczba iteracji przeszukiwania lokalnego po zakończeniu przeszukiwania z tabu opisana jest rozkładem silnie prawostronnie skośnym. W 90% przypadków nie przekracza 5 iteracji. Poprawa rozwiązań w danej części algorytmu występuje w przypadku 10% zbadanych segmentów. Częściej korzystny wpływ tego fragmentu procedury występuje podczas badania węzła Modelowego i sposobu łączenia taktów *SLT4*.

Badanie powtarzalności uzyskiwanych wyników wyznaczanych z zastosowaniem modelowania symulacyjnego

Realizacja pojedynczego powtórzenia algorytmu metody nie gwarantuje uwidocznienia ogólnych tendencji w zakresie różnicy średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu charakteryzującego rozkłady jazdy w węźle determinowane przez zmienne decyzyjne $\mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_{v'}^*$ wyznaczone przy pomocy proponowanej metody synchronizacji dla pary odpowiadających sobie elementów $(v, v') \in \mathbf{rCSV}$ różniących się uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy (oznaczonej jako $\mu_{tm}(\mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_{v'}^*)$ i wyznaczonej ze wzoru 5-23). Dlatego dla każdego przypadku testowego wielokrotnie powtarzano zastosowanie proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy. Charakterystyki opisujące wyznaczone w ten sposób zbiory danych przedstawiono w tabeli 6.6. Natomiast wynik przeprowadzonego badania dla przykładowej pary elementów $(v, v') \in \mathbf{rCSV}$ przedstawiono na rysunku 6.10.

Tabela 6.6 Zestawienie wartości wybranych miar statystyki opisowej i liczebności próby dla zbiorów powtórzeń wielokrotnego zastosowania proponowanej metody dla każdego z badanych przypadków testowych

			Stany atrybutu „Czynniki o charakterze stochastycznym stochastyczne”									
			Uwzględniane odchyłki od rozkładu jazdy i dyspersja czasu przejścia <i>CS3</i>					Uwzględniana wyłącznie dyspersja czasu przejścia <i>CS1</i>				
Charakterystyki zbiorów powtórzeń badania przypadków testowych			Średni czas oczekiwania charakteryzujący rozkład jazdy w węźle zmienności $\mu_{tm}(Tf_v)$	Odchyl. stand. wartości średniej czasu oczekiwania dla zbioru powtórzeń $\sigma_{tm}(Tf_v)$	Wskaźnik zmienności	Minimalna liczebność próby	Zrealizowana liczba powtórzeń	Średni czas oczekiwania charakteryzujący rozkład jazdy w węźle zmienności $\mu_{tm}(Tf_v)$	Odchyl. stand. wartości średniej czasu oczekiwania dla zbioru powtórzeń $\sigma_{tm}(Tf_v)$	Wskaźnik zmienności	Minimalna liczebność próby	Zrealizowana liczba powtórzeń
Stany atrybutów												
<i>U</i>	<i>E</i>	<i>SLT</i>	[min]	[min]	[%]	[szt.]	[szt.]	[min]	[min]	[%]	[szt.]	[szt.]
Modelowy <i>UM</i>	Okres roku szkolnego <i>ES</i>	<i>SLT1</i>	11,416	0,056	0,49%	11	32	11,750	0,034	0,29%	4	32
		<i>SLT2</i>	11,357	0,071	0,62%	18	47	11,906	0,079	0,66%	20	56
		<i>SLT3</i>	12,504	0,044	0,35%	6	32	12,855	0,109	0,85%	32	42
		<i>SLT4</i>	10,757	0,035	0,32%	5	32	11,391	0,051	0,45%	10	32
	Okres wakacji <i>EW</i>	<i>SLT1</i>	11,704	0,087	0,75%	28	40	12,402	0,054	0,44%	12	32
		<i>SLT2</i>	11,514	0,018	0,16%	2	32	12,134	0,002	0,02%	1	32
		<i>SLT3</i>	12,201	0,030	0,25%	3	32	12,396	2,224	17,95%	2	32
		<i>SLT4</i>	11,757	0,044	0,38%	7	32	12,074	0,054	0,45%	10	45

			Stany atrybutu „Czynniki o charakterze stochastycznym stochastyczne”									
			Uwzględniane odchyłki od rozkładu jazdy i dyspersja czasu przejścia <i>CS3</i>					Uwzględniana wyłącznie dyspersja czasu przejścia <i>CS1</i>				
Stany atrybutów	Charakterystyki zbiorów powtórzeń badania przypadków testowych		Średni czas oczekiwania charakteryzujący rozkład jazdy w węźle zmienności $\mu_{tm}(rj_v)$	Odchyl. stand. wartości średniej czasu oczekiwania dla zbioru powtórzeń $\sigma_{tm}(rj_v)$	Wskaźnik zmienności	Minimalna liczebność próby	Zrealizowana liczba powtórzeń	Średni czas oczekiwania charakteryzujący rozkład jazdy w węźle zmienności $\mu_{tm}(rj_v)$	Odchyl. stand. wartości średniej czasu oczekiwania dla zbioru powtórzeń $\sigma_{tm}(rj_v)$	Wskaźnik zmienności	Minimalna liczebność próby	Zrealizowana liczba powtórzeń
<i>U</i>	<i>E</i>	<i>SLT</i>	[min]	[min]	[%]	[szt.]	[szt.]	[min]	[min]	[%]	[szt.]	[szt.]
Porąbka UP	Okres roku szkolnego o <i>ES</i>	<i>SLT1</i>	7,854	1,388	17,68%	15	32	8,946	0,050	0,56%	15	32
		<i>SLT2</i>	8,025	1,240	15,45%	35	42	8,574	1,515	17,67%	1	32
		<i>SLT3</i>	7,345	0,073	0,99%	45	47	8,319	0,047	0,56%	15	42
		<i>SLT4</i>	7,584	0,058	0,76%	27	32	8,515	0,051	0,59%	18	32
	Okres wakacji <i>EW</i>	<i>SLT1</i>	7,286	1,064	14,60%	21	47	7,635	0,038	0,50%	12	32
		<i>SLT2</i>	7,865	0,050	0,63%	18	42	8,096	0,048	0,59%	16	42
		<i>SLT3</i>	7,264	0,033	0,45%	10	42	7,525	0,046	0,61%	18	42
		<i>SLT4</i>	7,611	0,054	0,71%	23	42	7,852	0,055	0,70%	23	32
Rojca UR	Okres roku szkolnego o <i>ES</i>	<i>SLT1</i>	7,972	0,055	0,68%	22	41	8,561	0,046	0,54%	16	32
		<i>SLT2</i>	8,043	0,059	0,73%	24	42	8,227	0,041	0,49%	11	42
		<i>SLT3</i>	8,370	0,050	0,60%	17	42	8,689	1,514	17,42%	1	32
		<i>SLT4</i>	8,256	0,040	0,49%	12	32	8,555	0,017	0,20%	2	32
	Okres wakacji <i>EW</i>	<i>SLT1</i>	7,357	1,136	15,45%	29	42	7,893	0,040	0,51%	13	32
		<i>SLT2</i>	7,291	0,065	0,89%	39	47	7,469	1,320	17,68%	16	32
		<i>SLT3</i>	9,347	0,040	0,43%	9	32	9,265	1,638	17,67%	11	32
		<i>SLT4</i>	7,128	0,035	0,49%	12	32	7,434	0,059	0,79%	32	42
Ząbkowice UZ	Okres roku szkolnego o <i>ES</i>	<i>SLT1</i>	10,246	1,582	15,44%	21	42	12,309	0,041	0,34%	6	32
		<i>SLT2</i>	10,009	1,545	15,44%	20	42	11,487	1,773	15,44%	24	42
		<i>SLT3</i>	10,782	0,090	0,84%	32	42	11,555	2,043	17,68%	26	32
		<i>SLT4</i>	9,872	0,063	0,64%	19	42	10,485	0,054	0,51%	13	32
	Okres wakacji <i>EW</i>	<i>SLT1</i>	10,024	1,772	17,68%	13	32	13,271	0,033	0,25%	3	32
		<i>SLT2</i>	9,819	1,515	15,43%	11	42	10,433	1,843	17,67%	14	32
		<i>SLT3</i>	10,678	0,061	0,58%	15	42	12,452	2,200	17,67%	5	32
		<i>SLT4</i>	10,551	0,060	0,57%	15	42	12,565	0,043	0,34%	6	32

Źródło: opracowanie własne

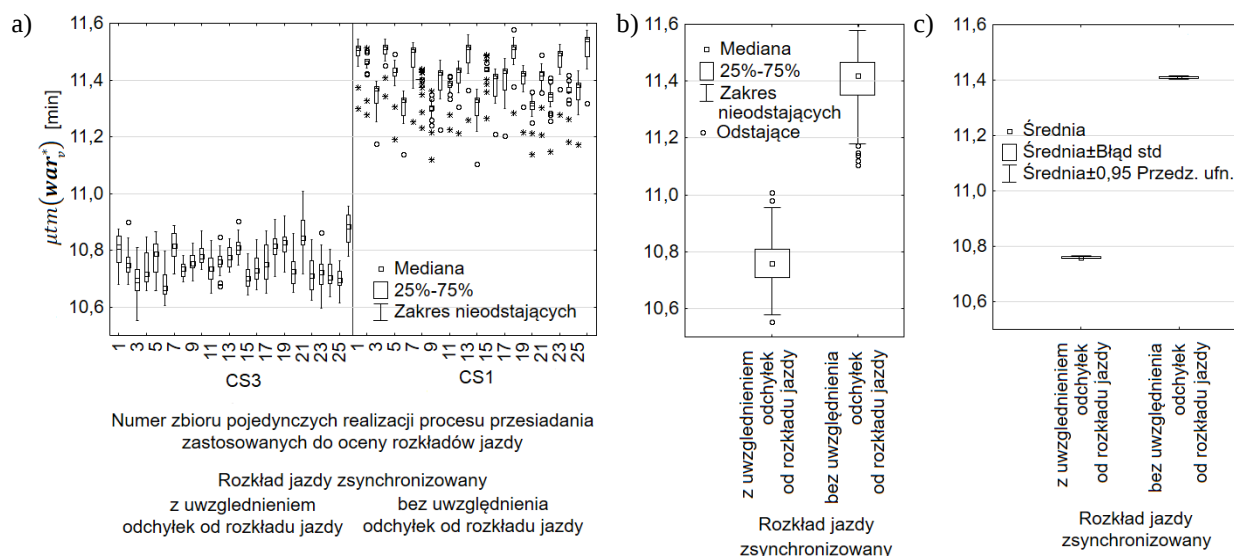
Badanie rozpoczęto od realizacji 32 powtórzeń zastosowania proponowanej metody do synchronizacji rozkładów jazdy w węźle dla każdego z badanych przypadków testowych. Na podstawie oceny spełnienia warunku minimalnej liczebności próby stwierdzono, że przyjęta na wstępie badania i zrealizowana liczba powtórzeń była wystarczająca do dokonania właściwej oceny średniego czasu oczekiwania charakteryzującego rozwiązanie (oznaczonego jako $\mu_{tm}(rj_v)$) dla 56% przypadków testowych v . Dla zbadania pozostałych elementów zbioru V indywidualnie realizowano kolejne powtórzenia zastosowania proponowanej metody, tak długo, aż dla każdego przypadku spełniono warunek minimalnej liczebności zbioru powtórzeń określonej na podstawie zbioru wartości miary $\mu_{tm}(rj_v)$ charakteryzujących powtórzenia. Uzyskane wyniki uwiaryściły, że mniejsza liczebność próby wystarczy dla badania przypadków testowych opisanych stanem *CS1* w atrybucie

„Czynniki o charakterze stochastycznym” co wynika z uwzględniania tylko dyspersji czasu przebycia dróg przejścia, czyli tylko jednego czynnika o charakterze stochastycznym wprowadzającego losowość w procesie zmiany środka transportu w modelu rozpatrywanym w dysertacji.

W wyniku przeprowadzonych badań stanowiących charakterystykę proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy jako metody bazującej na modelowaniu symulacyjnym dokonano w rozprawie następujących spostrzeżeń:

- Wskaźnik zmienności wyznaczony dla zbiorów wartości miary $\mu_{tm}(rj_v)$ charakteryzujących powtórzenia zastosowania proponowanej metody do badanych przypadków wyniósł średnio 4,8%.
- Zróżnicowanie wyników determinowane jest przede wszystkim przez stany atrybutu „Lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej”. Węzeł Modelowy charakteryzuje najmniejsza wymagana minimalna liczebność próby wynosząca średnio prawie 11 powtórzeń oraz najmniejsza wartość wskaźnika zmienności wynosząca średnio 1,5%. Największą wymaganą liczebność próby wskazano dla węzła Porąbka, wynoszącą średnio 19 powtórzeń. Dla pozostałych węzłów wskazano konieczność realizacji średnio 15 powtórzeń.
- Dla węzła Ząbkowice wskazano największą wartość wskaźnika zmienności charakteryzującej zbiory wartości miary $\mu_{tm}(rj_v)$ dla powtórzeń równą 8,5%, a dla pozostałych węzłów wartość 4,7%, czyli bliską ogólnej średniej.
- W toku realizowanych badań bazujących na modelowaniu symulacyjnym wykazano dla potrzeb pracy konieczność powtórzeń:
 - zastosowania proponowanej metody do synchronizacji rozkładów jazdy,
 - oceny czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle charakteryzującego zsynchronizowany rozkład jazdy w węźle opisany zmienną war_v^* przy pomocy różnych zbiorów pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu w węźle dla potoku w ujęciu stochastycznym (oznaczonych jako ZS_v)

dla przypadku testowego. Przykład prezentacji wyników uzyskanych dla wybranej pary odpowiadających sobie przypadków testowych $(v, v') \in rCSV$ różniących się uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji rozkładów jazdy zgodnie z procedurą przedstawioną na początku niniejszego podrozdziału, czyli powtórzeniem synchronizacji i oceny wyznaczonego rozwiązania z zastosowaniem zbiorów ZS_v (liczba zbiorów zastosowanych w analizie determinowana jest koniecznością spełnienia warunku minimalnej liczebności próby badawczej dla omawianego przypadku testowego wyniosła 26) przedstawiono na rysunku 6.10. Na kolejnych wykresach zaprezentowano wynik zastosowania różnych miar statystyki opisowej i szczegółowości agregacji zbiorów danych dla przedstawienia różnic średniego czasu oczekiwania dla pary przypadków testowych $(v, v') \in rCSV$.



Rys. 6.10. Przykład badania powtarzalności rezultatów uzyskanych poprzez przeszukiwanie lokalne dla pary przypadków testowych $(v, v') \in \mathbf{rCSV}$: a) struktura wartości miary $\mu m(\mathbf{war}_v^*)$ charakteryzujących powtórzenia synchronizacji w podziale na ocenę rozwiązań 26 zbiorami $\mathbf{ZS}_v$; b) zagregowana struktura wartości miary $\mu m(\mathbf{war}_v^*)$ dla pary (v, v') ; c) Analiza wartości średnich opisujących strukturę wartości miary $\mu m(\mathbf{war}_v^*)$ dla pary (v, v')

Źródło: opracowanie własne

W analizie rozpatrywane są rozwiązania $\mathbf{war}_v^*$ i $\mathbf{war}_{v'}^*$ wyznaczone z zastosowaniem proponowanej metody, dla przykładowej pary zbadanych, odpowiadających sobie przypadków testowych, różniących się przypisanym stanem atrybutu „Czynniki o charakterze stochastycznym. Wszystkie wykresy zaprezentowane na rysunku 6.10., w nieco odmienny sposób prezentują występowanie różnicy średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węzle, charakteryzującego przykładową, rozważaną parę odpowiadających sobie przypadków testowych. Na rysunku 6.10.a) pojedynczy zaprezentowany zbiór danych charakteryzuje wartości miary średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu charakteryzujących rozwiązania wyznaczone w poszczególnych powtórzeniach zastosowania proponowanej metody synchronizacji (oznaczonej jako $\mu m(\mathbf{war}_v^*)$), oceniane następnie za pomocą jednego zbioru $\mathbf{ZS}_v$ i opisany medianą, kwantylami i oceną odstawań. Kolejne przedstawione zbiory danych (na osi X) prezentują dla rozwiązań uzyskanych na drodze powtórzeń ocenę z zastosowaniem kolejnych zbiorów $\mathbf{ZS}_v$ (liczba zastosowanych w analizie zbiorów wynika z warunku minimalnej liczebności próby, niezbędnej dla wiarygodnego określenia wartości miary $\mu m(\mathbf{war}_v^*)$ charakteryzującej rozważany przypadek testowy i w rozważanym przykładzie wyniosła 26 elementów). Uzyskane w pracy wyniki dla zbioru $\mathbf{rCSV}$ potwierdziły występowanie dyspersji wartości miary $\mu m(\mathbf{war}_v^*)$ związanej zarówno z powtórzeniami zastosowania proponowanej

metody do badania przypadku testowego jak i oceny wyznaczonych rozwiązań z zastosowaniem różnych zbiorów pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu dla potoku pasażerów w ujęciu stochastycznym.

Na rysunku 6.10.a) wyróżniono dwie części, po jednej na każdy przypadek testowy porównywanej pary. Pozwala to w sposób ogólny porównać różnice w wartościach miary $\mu m(\mathbf{war}_v^*)$ charakteryzującej zbiory rozwiązań wyznaczonych na drodze powtórzeń jak i ocenianych przy pomocy różnych zbiorów $\mathbf{ZS}_v$. Zagregowanie wszystkich wartości miary wyznaczonych do jednego zbioru charakteryzującego przypadek testowy stanowi podstawę opracowania wykresu przedstawionego na rysunku 6.10.b). Scharakteryzowane struktury wartości elementów zbiorów opisujących parę przypadków testowych pozwalają dokonać oceny różnic średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu. Wyniki potwierdzają, że w związku z zastosowaniem modelowania symulacyjnego, do oceny rozwiązań i charakterystyki przypadków testowych konieczne jest zastosowanie analizy statystycznej. Utworzone zbiory dla pary elementów $(v, v') \in \mathbf{rCSV}$ poddano analizie istotności różnic. Dla wszystkich 32 badanych w pracy par $(v, v') \in \mathbf{rCSV}$ potwierdzono istotne statystycznie różnice. Na podstawie uzyskanych wyników wykazano, że uwzględnienie odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji rozkładów jazdy skutkuje krótszym średnim czasem oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu.

W związku ze stochastycznym charakterem analizowanego procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym w pracy wybrano wartość średniej arytmetycznej do oceny rozwiązań. Uzyskane wyniki dla analizowanej, przykładowej pary odpowiadających sobie przypadków testowych przedstawiono na rysunku 6.10.c). Przyjęty w pracy sposób postępowania i zapewnienie warunku minimalnej liczebności próby badawczej zarówno w zakresie liczby powtórzeń wyznaczania rozwiązania jak i oceny przy pomocy różnych zbiorów $\mathbf{ZS}_v$ o dobranej liczbie elementów zapewniły, że wyliczony średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu dla poszczególnych przypadków testowych charakteryzują niewielkie wartości błędu standardowego i przedziału ufności. Proponowana metoda synchronizacji rozkładów jazdy choć bazująca na modelowaniu symulacyjnym pozwala precyzyjnie szacować wartości przyjętych miar, co potwierdzają miary dyspersji. Wskaźnik zmienności przyjmował w analizach wartości maksymalnie kilku procent.

6.4. Analiza rozkładów jazdy wyznaczonych z zastosowaniem proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy

Realizowane działania były zorientowane na charakterystykę rezultatów zastosowania proponowanej metody poprzez analizę czasu oczekiwania. Wyznaczony, zsynchronizowany rozkład jazdy odniesiono zarówno do rozkładu jazdy opisującego elementy zbioru rozwiązań dopuszczalnych jak i do rozkładu jazdy obowiązującego obecnie $\mathbf{drj}_v$ w badanych węzłach. Przedmiotem analizy były wartości miary opisującej średni czas oczekiwania pasażerów

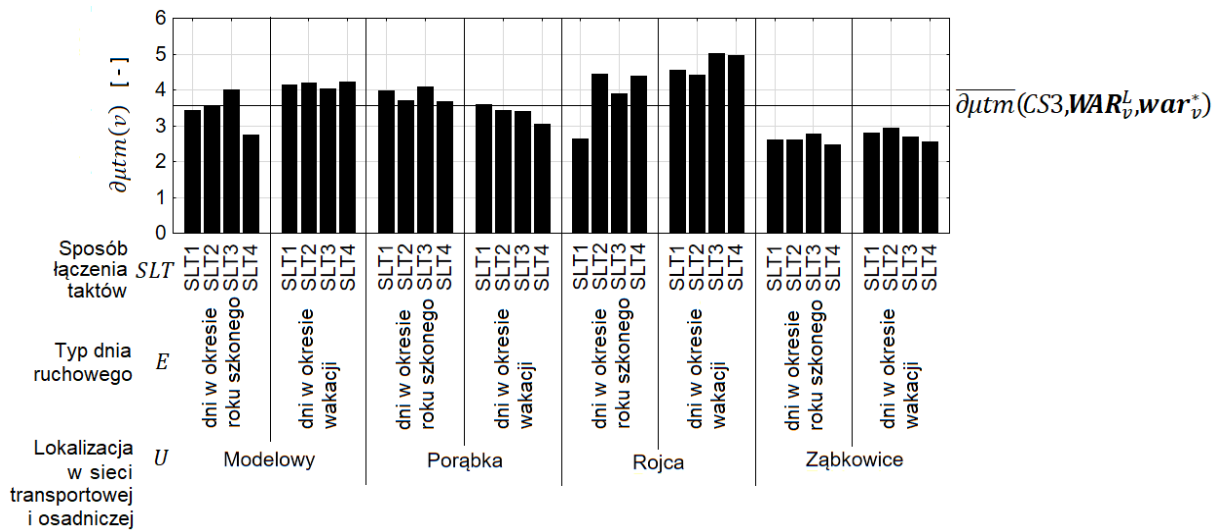
zmieniających środek transportu charakteryzujący rozkład jazdy w węźle $\mathbf{rj}_v$ (oznaczonej jako $\mu tm(\mathbf{rj}_v)$) dla potrzeb porównania odpowiadających sobie par rozkładów jazdy w węźle, są to rozkłady jazdy: wyznaczony przy pomocy proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy $\mathbf{war}_v^*$ oraz odpowiednio zbiór rozwiązań dopuszczalnych lub obowiązujący w węźle $\mathbf{drj}_v$ rozkład jazdy. W analizie jako podstawę przyjęto podzbiór przypadków testowych, dla których rozkład jazdy zsynchronizowano proponowaną metodą z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy (oznaczony jako $V(CS3)$). Zrealizowane zostały w tym zakresie analizy:

1. Analiza ustandaryzowanej różnicy między średnim czasem oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym (oznaczonego jako $\partial \mu tm(v)$), pomiędzy wyznaczonym rozwiązaniem $\mathbf{war}_v^*$ a wylosowanym zbiorem rozwiązań $\mathbf{WAR}_v^L$.
2. Analiza różnic całkowitego czasu oczekiwania pasażerów, między rozwiązaniem $\mathbf{war}_v^*$ wyznaczonym z zastosowaniem proponowanej metody a rozwiązaniem $\mathbf{war}_v^{*L}$ reprezentującym zbiór $\mathbf{WAR}_v^L$ (oznaczonych jako $rtm(\mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_v^{*L})$).
3. Analiza zróżnicowania wartości miary $\mu tm(\mathbf{rj}_v)$ pomiędzy podzbiorami przypadków testowych wyróżnionymi na podstawie jednocześnie stanów wybranych atrybutów i sposobu doboru rozkładu jazdy do badania (opisanego za pomocą miar $\overline{\mu tm}(sq, \mathbf{rj}_v)$ i $\overline{\mu tm}(sq, \mathbf{war}_v^*, \mathbf{drj}_v)$),
4. Analiza różnic całkowitego czasu oczekiwania charakteryzującego odpowiednio rozkład jazdy dotychczas obowiązujący $\mathbf{drj}_v$ i rozkład jazdy zsynchronizowany z zastosowaniem proponowanej metody $\mathbf{war}_v^*$, średnich dla podzbiorów przypadków testowych wyróżnionych na podstawie stanów atrybutów sq (oznaczone w ujęciu ogólnym jako $\overline{rtm}(sq, \mathbf{war}_v^*, \mathbf{drj}_v)$)

Analiza wartości ustandaryzowanej różnicy średniego czasu oczekiwania pasażerów $\partial \mu tm(v)$ pomiędzy wyznaczonym rozwiązaniem $\mathbf{war}_v^*$ a wylosowanym zbiorem rozwiązań $\mathbf{WAR}_v^L$

Celem analizy jest wskazanie różnicy średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym determinowanego odpowiednio przez rozkład jazdy zsynchronizowany z zastosowaniem proponowanej metody i opisanym wartością zmiennej $\mathbf{war}_v^*$ oraz przez zbiór rozwiązań $\mathbf{WAR}_v^L$ wylosowany ze zbioru rozwiązań dopuszczalnych $\mathbf{WAR}_v$.

Wartości ustandaryzowanej różnicy średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym $\partial \mu tm(v)$ dla podzbioru przypadków testowych, dla których synchronizacja realizowana była z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy $V(CS3)$ przedstawiono na rysunku 6.11.



Rys. 6.11. Zestawienie wartości miary $\partial \mu_{tm}(v)$ dla podzbioru $V(CS3)$

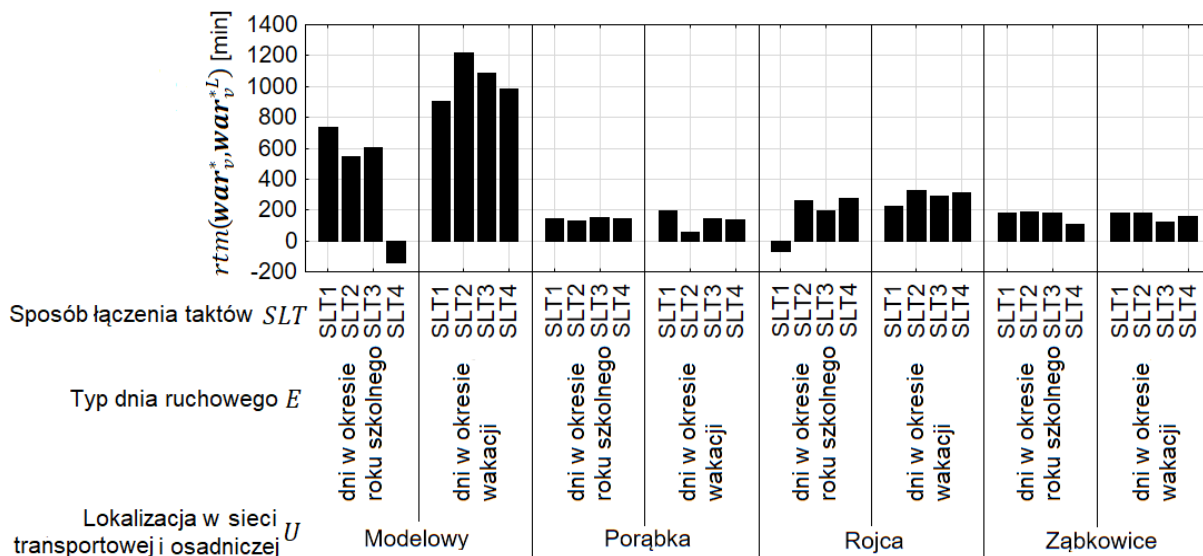
Źródło: opracowanie własne

Dla zbioru zbadanych przypadków testowych opisanych stanem „CS3” atrybutu „Czynniki stochastyczne” wartość średnia (oznaczona jako $\overline{\partial \mu_{tm}}(CS3, \mathbf{WAR}_v^L, \mathbf{war}_v^*)$) wyniosła 3,6. Oznacza to, że średnio dla danego podzbioru $V(CS3)$ wyznaczone rozkłady jazdy $\mathbf{war}_v^*$, cechują wartości miary średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środki transportu (oznaczonej jako $\mu_{tm}(\mathbf{war}_v^*)$) mniejsze o 3,6 odchylenia standardowe $\sigma_{tm}(\mathbf{WAR}_v^L)$ od średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środki transportu w węźle charakteryzującego zbiór rozkładów jazdy wybranych w sposób losowy (oznaczonego jako $\mu_{tm}(\mathbf{WAR}_v^L)$). Jednocześnie w trakcie analizy wykazano, że dzięki realizacji przeszukiwania lokalnego w proponowanej metodzie, wyznaczenie średniego czasu oczekiwania charakteryzującego badane rozwiązanie, opisane wartością funkcji kryterium $FC(\mathbf{war}_v)$ realizowane jest średnio dwa razy szybciej niż w przypadku oceny pełnego rozkładu jazdy w węźle wybranego w sposób losowy.

W badaniu wykazano istotny statystycznie wpływ atrybutu U „Lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej” dla którego różnice wartości miary $\partial \mu_{tm}(v)$ pomiędzy podzbiórami przypadków testowych opisanymi różnymi stanami atrybutu U były największe w porównaniu z podzbiórami wyróżnionymi na podstawie pozostałych atrybutów. Miara $\partial \mu_{tm}(v)$ największe wartości przyjmuje dla podzbioru przypadków testowych $V(CS3 \wedge UR)$ tj. związanych z węzłem Rojca. Wartość miary $\overline{\partial \mu_{tm}}(CS3 \wedge UR, \mathbf{WAR}_v^L, \mathbf{war}_v^*)$ wynosi 4,29 odchylen standardowych $\sigma_{tm}(\mathbf{WAR}_v^L)$. Najmniejsze wartości miary $\partial \mu_{tm}(v)$ występują dla podzbioru przypadków testowych $V(CS3 \wedge UZ)$ tj. związanych z węzłem Ząbkowice, dla którego jednocześnie zidentyfikowano największą wartość odchylenia standardowego $\sigma_{tm}(\mathbf{WAR}_v^L)$. Wartość miary $\overline{\partial \mu_{tm}}(CS3 \wedge UZ, \mathbf{WAR}_v^L, \mathbf{war}_v^*)$ wyniosła 2,7 odchylen standardowych $\sigma_{tm}(\mathbf{WAR}_v^L)$, a dla podzbiorów związanych z pozostałymi węzłami wartość miary $\overline{\partial \mu_{tm}}(CS3 \wedge (UM \vee UP), \mathbf{WAR}_v^L, \mathbf{war}_v^*)$ wynosi 3,7 odchylen standardowych $\sigma_{tm}(\mathbf{WAR}_v^L)$.

Analiza różnic całkowitego czasu oczekiwania pasażerów $rtm(\mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_v^{*L})$ dla podzbioru $V(CS3)$

Wyniki analizy porównawczej wartości miary $rtm(\mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_v^{*L})$ dla podzbioru przypadków testowych $V(CS3)$ przedstawiono na rysunku 6.12.



Rys. 6.12. Zestawienie wartości miary $rtm(\mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_v^{*L})$ dla podzbioru $V(CS3)$

Źródło: opracowanie własne

Atrybutem, który w największym stopniu wpływa na zróżnicowanie wartości miary $\overline{rtm}(V(sq), \mathbf{war}_v^{*L})$ pomiędzy podzbiórami przypadków testowych zgrupowanymi na podstawie stanów jest „Lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej”. Jest to spowodowane przede wszystkim różną liczbą pasażerów zmieniających środek transportu w poszczególnych węzłach przesiadkowych Π_v . Jedynie w 6% badanych przypadków testowych na drodze wyboru losowego zidentyfikowano rozkład jazdy w węźle przesiadkowym $\mathbf{war}_v^{*L}$ determinujący krótszy czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu $\mu_{tm}(\mathbf{rj}_v)$ niż rozkład jazdy w węźle określony przez wartość zmiennej decyzyjnej $\mathbf{war}_v^*$ i wyznaczony przy pomocy proponowanej metody. W pozostałych przypadkach zastosowanie proponowanej metody pozwoliło skrócić czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym, czyli uzyskać dodatnią wartość miary $rtm(\mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_v^{*L})$.

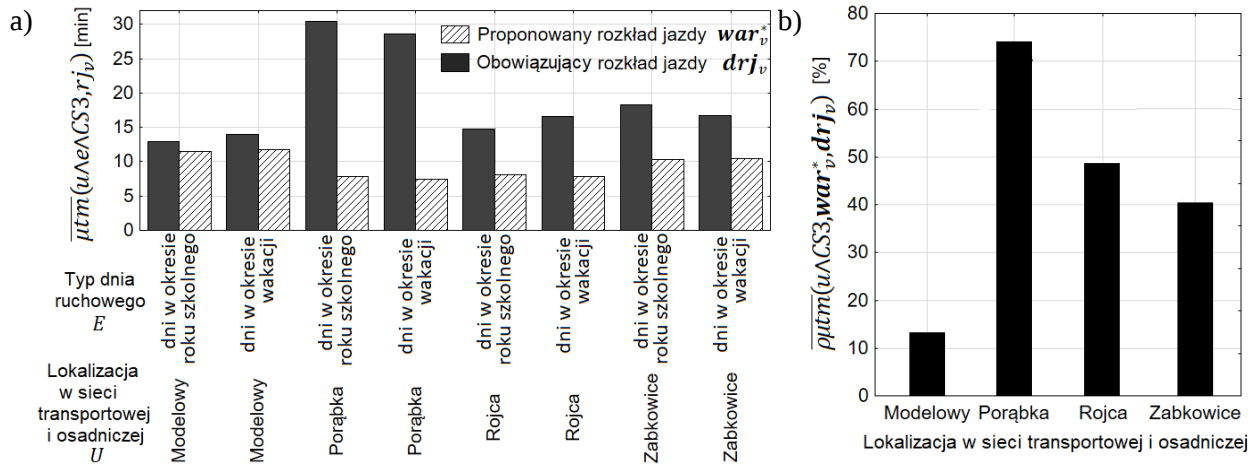
Największa różnica czasu oczekiwania między proponowanym rozkładem jazdy $\mathbf{war}_v^*$ a rozkładem jazdy najkorzystniejszym ze zbioru wylosowanych rozkładów jazdy $\mathbf{WAR}_v^L$ wystąpiła dla węzła Modelowego w dni robocze w okresie wakacji EW . Zmniejszono czas oczekiwania pasażerów w ciągu dnia średnio o ponad 16 godzin, natomiast w dni robocze w okresie roku szkolnego ER o 5 godzin. Natomiast w pozostałych węzłach różnica czasu oczekiwania wyniosła średnio 2,5 godziny, przy czym większe wartości wystąpiły dla węzła Rojca a mniejsze dla węzła Porąbka.

Analiza zróżnicowania wartości miary $\mu_{tm}(rj_v)$ pomiędzy podzbiorami przypadków testowych wyróżnionymi na podstawie stanów wybranych atrybutów i sposobu doboru rozkładu jazdy

Celem analizy jest określenie różnic średniego czasu oczekiwania $\mu_{tm}(rj_v)$ charakteryzującego odpowiednio rozkład jazdy wyznaczony z zastosowaniem proponowanej metody war_v^* i rozkład jazdy obowiązujący w węźle drj_v czyli określenie w ujęciu ogólnym dla badanego zbioru przypadków testowych skrócenia średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle wynikającego z zastosowania proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy względem dotychczasowego rozkładu jazdy. W analizie każdy przypadek testowy nie tylko charakteryzowany jest przez dwa różne rozkłady jazdy, ale opisany jest również przez unikatową kombinację stanów w czterech atrybutach i wpływających na uzyskiwane wyniki średniego czasu oczekiwania. W związku z powyższym, dla potrzeb określenia wpływu wszystkich wskazanych czynników wyznaczono średnie dla podzbiorów przypadków testowych o przypisanych różnych sposobach doboru rozkładów jazdy wartości miary średniego czasu oczekiwania $\mu_{tm}(rj_v)$ (oznaczone jako $\overline{\mu_{tm}}(sq, rj_v)$, zgodnie ze wzorem 5-17).

Na podstawie wstępnej oceny istotności różnic, zdecydowano się w pracy ostatecznie przedstawić wartości średnie dla podzbiorów przypadków testowych wyróżnionych w taki sposób, że wszystkie przypadki testowe, które mają ten sam przypisany stan w atrybucie „Lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej U ” a także stan w atrybucie „Typ dni ruchowych E ” zaliczone zostały dla potrzeb niniejszego badania do jednej grupy. Taka grupa w ujęciu ogólnym została w pracy oznaczona jako $V(u \wedge e \wedge CS3)$. Dla każdego tak wyróżnionego podzbioru wyznaczono dwie wartości średnie miary $\mu_{tm}(rj_v)$ tzn. odpowiednio charakteryzującą rozkłady jazdy wyznaczone z zastosowaniem proponowanej metody war_v^* oraz rozkłady jazdy obowiązujące w węzłach przesiadkowych drj_v , a wyniki przedstawiono na rysunku 6.13.a).

Dla potrzeb wyznaczenia różnic średniego czasu oczekiwania określonego miarą $\mu_{tm}(rj_v)$ i charakteryzującego odpowiednio rozkład jazdy zsynchronizowany z zastosowaniem proponowanej metody war_v^* i obowiązujący rozkład jazdy drj_v w ujęciu ogólnym, niezależnym od wartości miary odpowiednio $\mu_{tm}(war_v^*)$ i $\mu_{tm}(drj_v)$ co stanowi cel niniejszej analizy, zastosowano miarę względnej różnicy średniego czasu oczekiwania pomiędzy parą rozkładów jazdy (oznaczoną jako $\rho_{\mu_{tm}}(war_v^*, drj_v)$ zgodnie ze wzorem 5-23). Wartości miary są zróżnicowane w rozważnym zbiorze przypadków testowych, dlatego zbadano wpływ stanów atrybutów na uzyskiwane wyniki. W tym celu dla podzbiorów $V(sq)$ wyróżnionych na podstawie stanów atrybutów sq wyznaczone zostały wartości średnie miary $\rho_{\mu_{tm}}(war_v^*, drj_v)$ (oznaczone jako $\overline{\rho_{\mu_{tm}}}(sq, war_v^*, drj_v)$) i przeprowadzona ocena istotności różnic pomiędzy podzbiorami. W wyniku analizy jako istotne zidentyfikowano różnice wartości miary średniej pomiędzy czterema zbiorami wyróżnionymi na podstawie stanów w atrybucie „Lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej U ” przypisanych do przypadków testowych, z pominięciem stanów przypisanych w atrybucie „Typ dni ruchowych E ” i oznaczono w ujęciu ogólnym jako $V(u \wedge CS3)$, a wyniki przedstawiono na rysunku 6.13.



Rys. 6.13. Wyniki analizy wartości miary $\mu_{tm}(rj_v)$ dla rozkładów jazdy war_v^* i drj_v :

a) zestawienie wartości miary $\mu_{tm}(u \wedge e \wedge CS3, rj_v)$; b) zestawienie wartości miary

$$\rho\mu_{tm}(u \wedge CS3, war_v^*, drj_v)$$

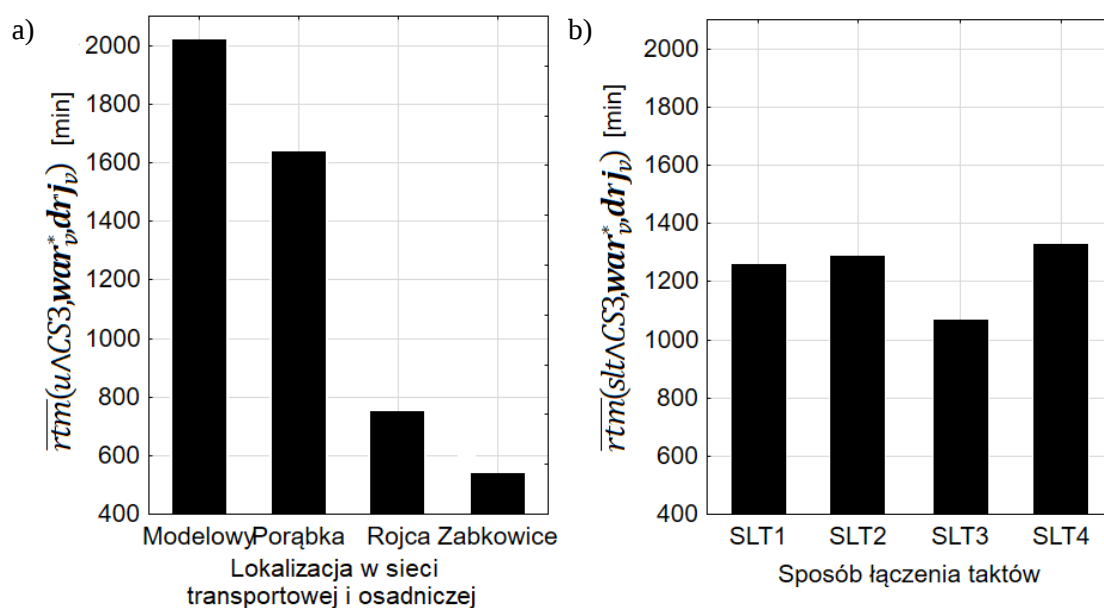
Źródło: opracowanie własne

Dla wszystkich badanych przypadków testowych, dla których synchronizację zrealizowano z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy tzn. $CS(v) = CS3$ potwierdzono, że zastosowanie rozkładu jazdy w węźle wyznaczonego na podstawie wartości zmiennej decyzyjnej war_v^* i wyznaczonej proponowaną metodą determinuje istotnie mniejszy średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu opisany miarą $\mu_{tm}(rj_v)$ niż obowiązujący w węźle rozkład jazdy drj_v . Jedynym z badanych atrybutów istotnie wpływającym na zróżnicowanie wartości jest „Lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej”. W węźle Porąbka zastosowanie proponowanego rozkładu jazdy spowodowało uzyskanie największej wartości przyjętej miary $\rho\mu_{tm}(UP \wedge CS3, drj_v)$ tzn. średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu został skrócony przeciętnie o 75%. Dla węzła Modelowego wartość miary $\rho\mu_{tm}(UM \wedge CS3, drj_v)$ jest najmniejsza ze wszystkich badanych węzłów, a zatem średni czas oczekiwania pasażerów został skrócony przeciętnie o 13%. Dla pozostałych węzłów przesiadkowych, tj. dla podzbiorów $V(UZ \wedge CS3)$ i $V(UR \wedge CS3)$, wartości miary $\rho\mu_{tm}(V(sq), drj_v)$ wyniosły około 45%.

Wśród przyczyn wyraźnego zróżnicowania wartości pomiędzy podzbiórami przypadków testowych należy wskazać różne rozkłady jazdy obowiązujące w badanych węzłach przesiadkowych, a stanowiące punkt odniesienia dla wykonanej analizy. Największe zmiany w rozkładzie jazdy wprowadzono w węźle Porąbka i znalazło to odzwierciedlenie w największej względnej wartości różnicy średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu między rozkładami jazdy war_v^* i drj_v . Z kolei dla węzła Modelowego najmniejsza wartość miary $\rho\mu_{tm}(UM \wedge CS3, drj_v)$ była spowodowana m.in. największą wśród przypadków testowych liczbą pasażerów zmieniających środek transportu, przez co wpływ różnic w rozkładzie jazdy na różnicę czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu był mniej widoczny.

Analiza różnic całkowitego czasu oczekiwania charakteryzującego odpowiednio rozkłady jazdy węzle: dotychczas obowiązujący drj_v i zsynchronizowany z zastosowaniem proponowanej metody war_v^* , średnich dla podzbiorów przypadków testowych $\overline{rtm}(sq, war_v^*, drj_v)$

Celem analizy jest określenie skrócenia całkowitego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w okresie funkcjonowania węzła w dobie w wyniku zastosowania rozkładu jazdy zsynchronizowanego z zastosowaniem proponowanej metody war_v^* względem dotychczas obowiązującego rozkładu jazdy w węźle drj_v (oznaczonego jako $rtm(war_v^*, drj_v)$). Dla rozważanego zbioru przypadków testowych wartości miary $rtm(war_v^*, drj_v)$ zależą m.in. od liczby pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym, co wpływa na zwiększenie zróżnicowania wartości miary pomiędzy przypadkami testowymi i związanego z lokalnymi uwarunkowaniami. Należało zatem wyznaczyć wpływ zastosowania rozkładu jazdy zsynchronizowanego proponowaną metodą na zmiany całkowitego czasu oczekiwania, z uwzględnieniem zróżnicowania pomiędzy podzbiorami przypadków testowych wyróżnionych na podstawie stanów atrybutów sq . Dlatego dokonano oceny istotności różnic pomiędzy wartościami miary średniej różnic całkowitego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu dla podzbiorów przypadków testowych (oznaczonymi jako $\overline{rtm}(sq, war_v^*, drj_v)$). Wyniki analizy opisujące wartości miary $\overline{rtm}(sq, war_v^*, drj_v)$, średniego skrócenia całkowitego czasu oczekiwania w podziale na stany atrybutów powodujące istotne różnice w zakresie zmian czasu oczekiwania w węźle między rozkładem jazdy drj a war_v^* przedstawiono na rysunku 6.14.



Rys. 6.14. Zestawienie wartości miary dla podzbiorów $\overline{rtm}(sq, war_v^*, drj_v)$: a) $u \cap CS3$; b) $slt \cap CS3$

Źródło: opracowanie własne

Wykazano, że stany jedynie w dwóch badanych atrybutach: „Lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej” i „Sposób łączenia taktów” charakteryzują się istotnie różnymi wartościami miary $\overline{rtm}(sq, war_v^*, drj_v)$, tj. pomiędzy podzbiorami przypadków testowych wydzielonymi na podstawie stanów atrybutów. Każdy węzeł przesiadkowy charakteryzowany

jest przez inną wartość miary $\overline{rtm}(u \wedge CS3, \mathbf{war}_v^*, \mathbf{drj}_v)$. Największa różnica całkowitego czasu oczekiwania wystąpiła w węźle Modelowym. Zastosowanie zsynchronizowanego z zastosowaniem proponowanej metody rozkładu jazdy w węźle i opisanego wartością zmiennej decyzyjnej $\mathbf{war}_v^*$ pozwala skrócić łączny czas oczekiwania wszystkich pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym w ciągu doby o około 33 godziny względem czasu oczekiwania determinowanego przez obowiązujący w węźle przesiadkowym rozkład jazdy $\mathbf{drj}_v$. Najmniejsza różnica całkowitego czasu oczekiwania $\overline{rtm}(u \wedge CS3, \mathbf{war}_v^*, \mathbf{drj}_v)$ wystąpiła w węźle Ząbkowice. Skrócono łączny czas oczekiwania wszystkich pasażerów zmieniających środek transportu w ciągu doby średnio o 9 godzin.

W zakresie oceny wpływu stanów atrybutu „Sposób łączenia taktów” wyróżnia się jedynie sposób *SLT3*. Wartość miary $\overline{rtm}(SLT3 \wedge CS3, \mathbf{war}_v^*, \mathbf{drj}_v)$ dla sposobu łączenia taktów *SLT3* wynosi 17,8 godzin i jest istotnie mniejsza od różnic całkowitego czasu oczekiwania pasażerów $\overline{rtm}(slt \wedge CS3, \mathbf{war}_v^*, \mathbf{drj}_v)$ charakteryzujących pozostałe podzbiory $V(slt \wedge CS3)$. W przypadku pozostałych sposobów łączenia taktów wartość średnia całkowitego czasu oczekiwania pasażerów dla podzbioru przypadków testowych wyniosła 21,6 godzin.

6.5. Badania wpływu uwzględnienia odchylek od rozkładu jazdy w synchronizacji na średni czas oczekiwania pasażerów

Ocena porównawcza czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym i charakteryzującego rozkłady jazdy wyznaczone dla par odpowiadających sobie przypadków testowych, należących do zbioru par $\mathbf{rCSV}$, tzn. różniących się stanem w atrybucie „Czynniki o charakterze stochastycznym” stanowiła podstawę weryfikacji hipotezy badawczej postawionej w pracy. Niniejsza analiza pozwoliła zbadać słuszność stwierdzenia, że synchronizacja rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym, uwzględniająca odchyłki od rozkładu jazdy i realizowana z zastosowaniem przeszukiwania lokalnego, pozwala skrócić średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus w tym węźle, względem rozwiązań wyznaczonych z pominięciem danych o odchyłkach od rozkładu jazdy. W ramach badania różnic średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu charakteryzujących rozkłady jazdy w węźle wyznaczone dla zbioru par odpowiadających sobie przypadków testowych przeprowadzone zostały cztery analizy:

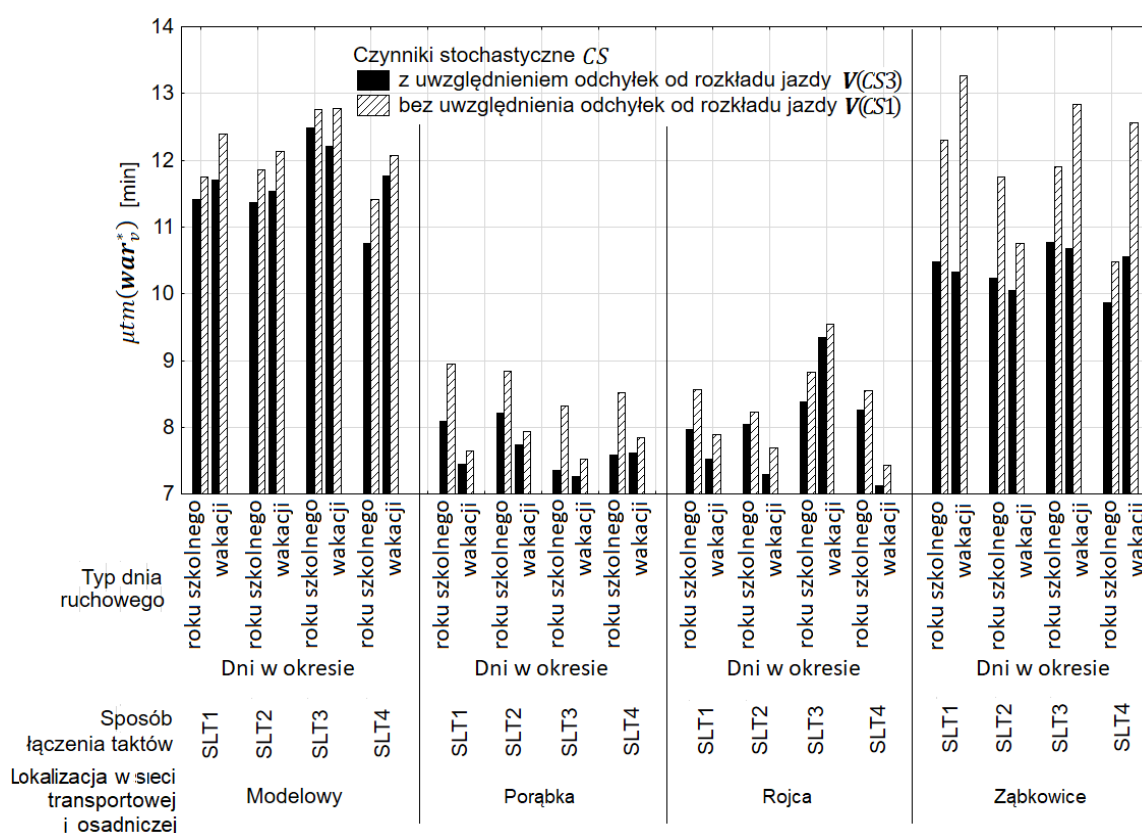
1. średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu charakteryzującego rozkład jazdy w węźle determinowany przez zmienną decyzyjną $\mathbf{war}_v^*$ (oznaczoną jako $\mu tm(\mathbf{war}_v^*)$) dla wszystkich elementów zbioru V .
2. różnic całkowitego w dobie czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w dobie i charakteryzującego pary rozkładów jazdy wyznaczone na podstawie zmiennych decyzyjnych w węźle przesiadkowym dla par przypadków testowych różniących się uwzględnieniem odchylek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji (oznaczonych jako $rtm(\mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_{v'}^*)$).
3. średniej dla podzbiorów przypadków testowych $V(sq)$ wyróżnionych na podstawie stanów atrybutów z wartości miary $\mu tm(\mathbf{war}_v^*)$ charakteryzującej przypadki testowe (oznaczonej w ujęciu ogólnym jako $\overline{\mu tm}(sq, \mathbf{rj}_v)$), gdzie sq oznacza stany atrybutów,

które posiadają przypadki przyporządkowane do zbioru. Przypadki testowe przypisane do różnych grup opisuje różny stan atrybutu rozważanego w analizie).

4. średniej dla podzbiorów par przypadków testowych $rCSV(sq)$ wyróżnionych na podstawie stanów atrybutów z wartości względnej różnicy średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym $\mu_{tm}(war_v^*, war_{v'}^*)$ determinowanej przez rozkłady jazdy charakteryzujące pary elementów (v, v') należące do zbioru $rCSV$ (oznaczonej w ujęciu ogólnym jako $\overline{\mu_{tm}}(rCSV(sq))$).

Analiza wartości miary $\mu_{tm}(war_v^*)$ dla wszystkich elementów zbioru V

Wartości miary $\mu_{tm}(war_v^*)$ charakteryzującej rozwiązania wyznaczone przy pomocy proponowanej metody dla badanego zbioru przypadków testowych V przedstawiono na rysunku 6.15.



Rys. 6.15. Zestawienie dla wszystkich elementów zbioru V wartości miary $\mu_{tm}(war_v^*)$

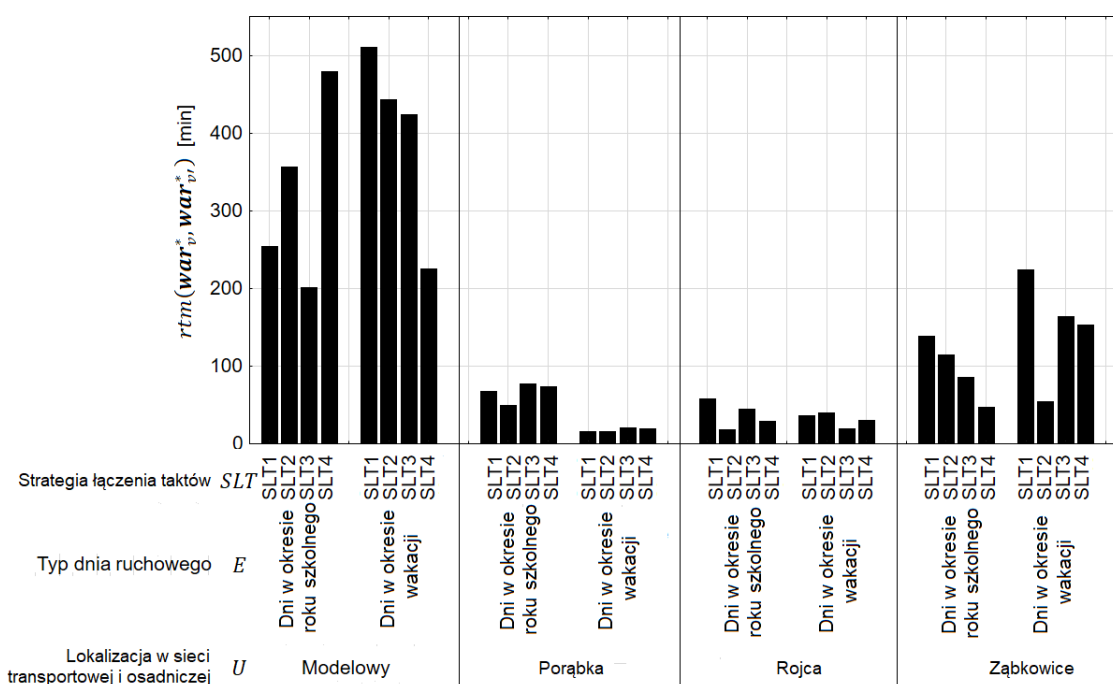
Źródło: opracowanie własne

Potwierdzono istotne statystycznie różnice między wartościami miary $\mu_{tm}(war_v^*)$ charakteryzującej rozkład jazdy w węźle determinowany przez wartości zmiennej decyzyjnej wyznaczone dla badanych par elementów $(v, v') \in rCSV$ różniących się przypisanym stanem w atrybucie „Czynniki o charakterze stochastycznym”. Za każdym razem krótszy czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym charakteryzował rozkład jazdy zsynchronizowany z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy niż rozkład jazdy zsynchronizowany z pominięciem odchyłek od rozkładu jazdy. Dla poszczególnych par elementów różnice w wartościach są nieco inne, przy czym widoczny

jest wpływ oddziaływania poszczególnych stanów pozostałych atrybutów na wskazane zróżnicowanie. Dlatego wpływ ten został poddany analizie w niniejszym podrozdziale.

Analiza różnic całkowitego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym między parami elementów $(v, v') \in rCSV$ $rtm(\mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_{v'}^*)$

Podstawą analizy jest średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu charakteryzujący rozkład jazdy w węźle wyznaczony proponowaną metodą, dla każdego badanego przypadku testowego (oznaczonego jako $\mu tm(\mathbf{war}_v^*)$). Następnie dla każdej pary odpowiadających sobie przypadków testowych tzn. należących do zbioru $rCSV$ i różniących się uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji na podstawie wartości miary $\mu tm(\mathbf{war}_v^*)$ wyznaczono (zgodnie ze schematem przedstawionym w podrozdziale 5.7) różnice łącznego czasu oczekiwania wszystkich pasażerów zmieniających w ciągu doby w węźle przesiadkowym środek transportu z pociągu na autobus (oznaczonego jako $rtm(\mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_{v'}^*)$). Dodatkowo wartości miary oznaczają skrócenie czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w wyniku uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji. Wyniki analizy dla wszystkich badanych w pracy par przypadków testowych przedstawiono na rysunku 6.16.



Rys. 6.16. Zestawienie dla wszystkich par odpowiadających sobie przypadków testowych $(v, v') \in rCSV$ wartości miary $rtm(\mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_{v'}^*)$

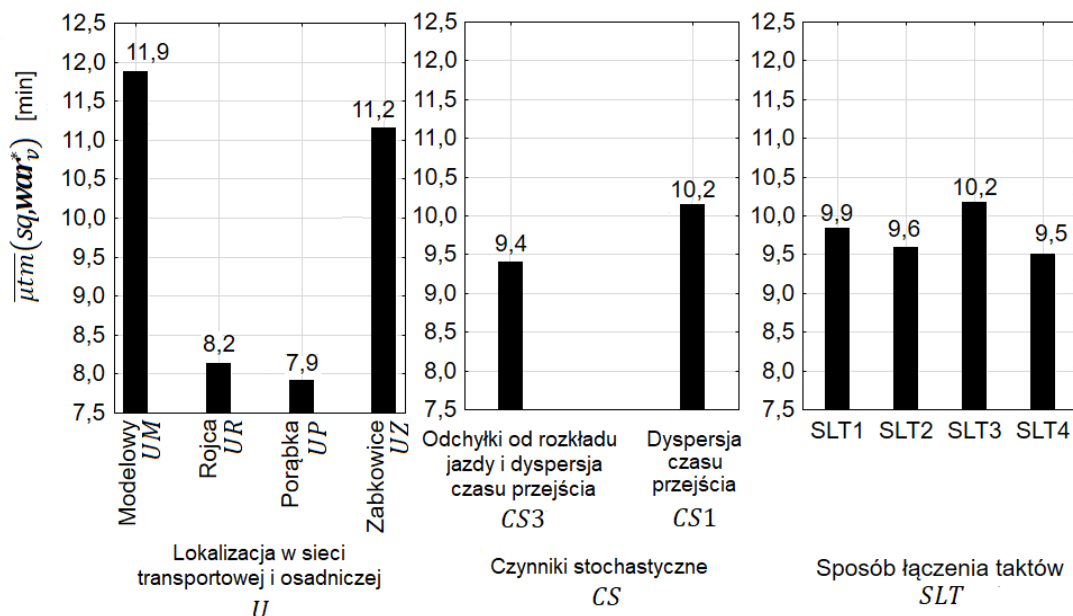
Źródło: opracowanie własne

Łączny czas, jaki pasażerowie zmieniający środek transportu w całym okresie funkcjonowania węzła w dobie zaoszczędzą na skutek wprowadzenia rozkładu jazdy zsynchronizowanego z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy waha się od kilkunastu do kilkuset minut. Wartości miary charakteryzujące pary przypadków testowych zależą od liczby pasażerów zmieniających środek transportu w okresie funkcjonowania węzła. Wyniki na rysunku 6.16. uporządkowano na podstawie stanów atrybutów charakteryzujących

badane pary przypadków, w taki sposób, że pary opisane wspólnymi stanami umieszczono na wykresie bliżej siebie. Dla potrzeb określenia wpływu stanów atrybutów na zróżnicowanie wyników wyznaczono wartości średnie dla grup par przypadków testowych opisanych tymi samymi stanami atrybutów tzn. $rCSV(sq)$ (oznaczone jako $\overline{rtm}(CS3, war_v^*, war_{v'}^*)$) z wartości miary $rtm(war_v^*, war_{v'}^*)$ charakteryzujących poszczególne pary (v, v') i opisujących skrócenie łącznego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w całym okresie funkcjonowania węzła w dobie, a wynikające z zastosowania rozkładu jazdy zsynchronizowanego z uwzględnieniem odchylek od rozkładu jazdy. W porównaniu z rozkładem jazdy zsynchronizowanym bez uwzględnienia odchylek od rozkładu jazdy. Atrybutem, dla którego pomiędzy stanami występują największe różnice wartości średnich miary $\overline{rtm}(CS3, war_v^*, war_{v'}^*)$ jest „Lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej”. Jako drugi najistotniejszy atrybut wskazano sposób łączenia taktów. Stan SLT1 zapewnia większe od pozostałych stanów danego atrybutu wartości miary $\overline{rtm}(CS3, war_v^*, war_{v'}^*)$.

Analiza wartości miary $\overline{\mu tm}(sq, war_v^*)$ średniej dla podzbiorów $rCSV(sq)$ wyróżnionych na podstawie stanów atrybutów

Analizę wpływu stanów atrybutów na średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym (oznaczony jako $\mu tm(war_v^*)$) przeprowadzono na podstawie wartości średnich dla grup przypadków testowych $rCSV(sq)$ wyróżnionych na podstawie stanów atrybutów z wartości miary $\mu tm(war_v^*)$ (oznaczonych jako $\overline{\mu tm}(sq, war_v^*)$). Wyniki analizy różnic w wartościach miary $\overline{\mu tm}(sq, war_v^*)$ pomiędzy podzbiórami przypadków testowych wyróżnionymi na podstawie stanów poszczególnych badanych atrybutów przedstawiono na rysunku 6.17.



Rys. 6.17. Zestawienie wartości miary $\overline{\mu tm}(sq, war_v^*)$ dla podzbiorów przypadków testowych wydzielonych na podstawie stanów poszczególnych atrybutów powodujących istotny wpływ na zróżnicowanie wyników

Źródło: opracowanie własne

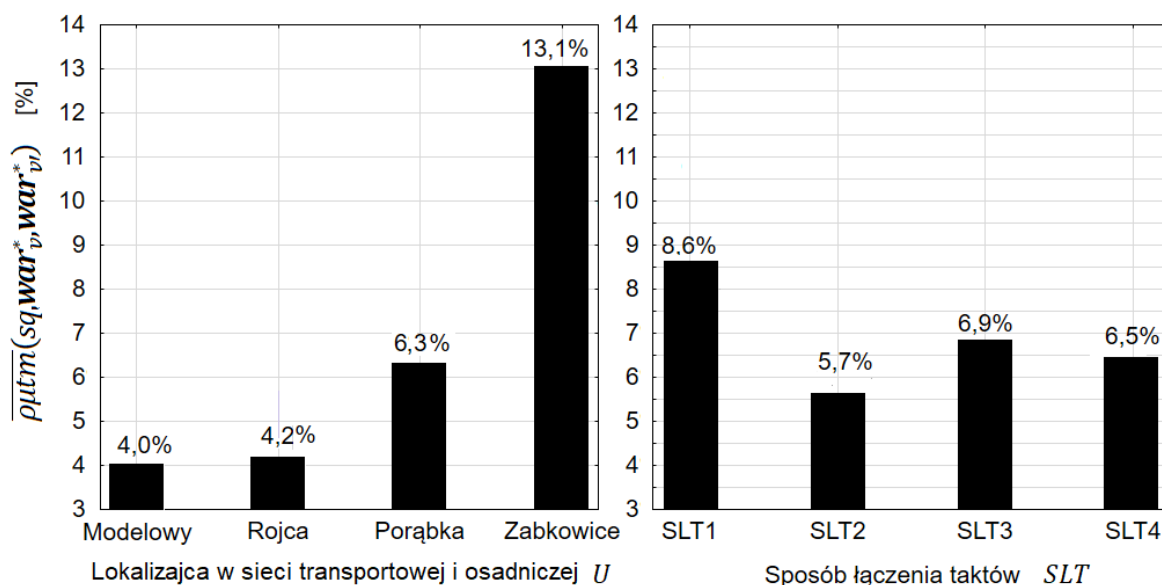
W wyniku przeprowadzonej analizy potwierdzono istotny wpływ stanów atrybutów: „Lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej”, „Czynniki o charakterze stochastycznym” i „Sposób łączenia taktów” na wartości średnie czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węzle przesiadkowym z pociągu na autobus a tym samym wartości miary $\overline{\mu tm}(sq, \mathbf{war}_v^*)$. Wykazano, że jedynie atrybut „Typ dni ruchowych E ” nie ma istotnego wpływu na zróżnicowanie średnich czasów oczekiwania pasażerów $\overline{\mu tm}(sq, \mathbf{war}_v^*)$ pomiędzy podzbiorami przypadków testowych $rCSV(e)$.

Największe różnice pomiędzy wartościami średnimi dla podzbiorów przypadków testowych występują dla grupowania według stanów w atrybucie „Lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej”. Najkrótszy czas oczekiwania występuje w węzłach Rojca i Porąbka a największy w węzle Modelowym. Przypadki testowe opisane określonymi stanami poszczególnych atrybutów, tj. węzły Modelowy UM i Ząbkowice UZ , zsynchronizowane z pominięciem odchyłek od rozkładu jazdy $CS1$ jak i opisane sposobem łączenia taktów $SLT3$ cechuje dłuższy średni czas oczekiwania $\mu tm(\mathbf{war}_v^*)$ niż przypadki testowe opisane innymi, pozostałymi stanami w dla wskazanych atrybutów.

Drugim atrybutem pod względem wielkości różnic pomiędzy wartościami miary $\overline{\mu tm}(sq, \mathbf{war}_v^*)$ dla podzbiorów wyróżnionych na podstawie stanów jest atrybut „Czynniki stochastyczne”. Dla przypadków testowych, o przypisanym stanie $CS3$, tzn. dla których uwzględniono odchyłki od rozkładu jazdy średni czas oczekiwania opisany wartościami miary $\mu tm(\mathbf{war}_v^*)$ jest istotnie krótszy niż średni czas oczekiwania pasażerów dla przypisanego stanu $CS1$, w którym pominięto odchyłki od rozkładu jazdy. Różnica wartości miary $\overline{\mu tm}(sq, \mathbf{war}_v^*)$ wyznaczona na podstawie dwóch podzbiorów $V(CS3)$ i $V(CS1)$ wynosi 0,8 min. Wskazana różnica stanowi 7,8% wartości i zapewnia skrócenie czasu oczekiwania średnio o 140 min łącznie dla wszystkich pasażerów w ciągu doby. Wartość miary $\mu tm(\mathbf{war}_v^*)$ agregowanej do wartości średniej dla podzbiorów $\overline{\mu tm}(sq, \mathbf{war}_v^*)$ zależy również od zastosowanego sposobu łączenia taktów. Średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu charakteryzujący przypadki testowe opisane sposobami łączenia taktów $SLT2$ i $SLT4$ jest najmniejszy a dla przypadków opisanych sposobem łączenia taktów $SLT3$ największy.

Analiza wartości miary $\overline{\rho \mu tm}(sq, \mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_{v'}^*)$ względnych różnic średniego czasu oczekiwania dla podzbiorów $rCSV(sq)$ wyróżnionych na podstawie stanów atrybutów

Celem analizy było określenie wpływu atrybutów na różnice pomiędzy parami odpowiadających sobie przypadków testowych $(v, v') \in rCSV$ oceniane na podstawie średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węzle w całym okresie funkcjonowania w ciągu doby charakteryzującego rozwiązania wyznaczone z zastosowaniem proponowanej metody synchronizacji (oznaczonego jako $\mu tm(\mathbf{war}_v^*)$). Dla potrzeb badania przyjęto miarę średniej dla podzbioru par przypadków testowych opisanych sq -tym stanem w rozważanym atrybucie względnej różnicy pomiędzy wartościami miary $\mu tm(\mathbf{war}_v^*)$ charakteryzującej każdy z elementów rozważanych par (oznaczoną jako $\overline{\rho \mu tm}(sq, \mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_{v'}^*)$). Wskazana miara $\overline{\rho \mu tm}(sq, \mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_{v'}^*)$ pozwala w sposób bezpośredni porównywać wyniki dla wszystkich par przypadków testowych $rCSV$, niezależnie od lokalnych uwarunkowań i charakterystyk poszczególnych węzłów przesiadkowych. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 6.18.



Rys. 6.18. Wartości miary $\overline{\rho\mu tm}(sq, war_v^*, war_{v'}^*)$ dla podzbiorów przypadków testowych wydzielonych na podstawie stanów atrybutów $rCSV(sq)$

Źródło: opracowanie własne

Podstawą analizy jest skrócenie średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środki transportu w węźle przesiadkowym na skutek zastosowania rozkładu jazdy opisanego wartością zmiennej decyzyjnej war_v^* i zsynchronizowanego z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy w porównaniu z rozkładem jazdy zsynchronizowanym z pominięciem odchyłek od rozkładu jazdy. W wyniku przeprowadzonego badania potwierdzono, że wartości miary $\overline{\rho\mu tm}(sq, war_v^*, war_{v'}^*)$ zależą od stanów atrybutów przypisanych do rozważanej pary odpowiadających sobie przypadków testowych.

Atrybuty, dla których występują istotne różnice wartości miary $\overline{\rho\mu tm}(sq, war_v^*, war_{v'}^*)$ pomiędzy podzbiorami przypadków testowych wydzielonych na podstawie stanów atrybutów to „Lokalizacja w sieci transportowej i osadniczej” oraz „Sposób łączenia taktów”. Największa względna różnica między czasem oczekiwania charakteryzującym rozkład jazdy zsynchronizowany z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy względem czasu oczekiwania charakteryzującego rozkład jazdy zsynchronizowany z pominięciem odchyłek od rozkładu jazdy wystąpiła w węźle Zabkowice a najmniejsza w węzłach: Modelowym i Rojca. W przypadku sposobów łączenia taktów największe skrócenie czasu oczekiwania, czyli największa wartość miary $\overline{\rho\mu tm}(sq, war_v^*, war_{v'}^*)$ występuje dla strategii SLT1 a najmniejsza dla SLT2. Stany poszczególnych atrybutów cechuje odmienny wpływ na rejestrowane wartości w obu wskazanych analizach tj. miar $\overline{\mu tm}(sq, war_v^*)$ i $\overline{\rho\mu tm}(sq, war_v^*, war_{v'}^*)$. Uzyskane wyniki potwierdzają brak powiązania między średnim czasem oczekiwania pasażerów zmieniających środki transportu w węźle przesiadkowym z pociągu na autobus a wielkością skrócenia średniego czasu oczekiwania powodowanego uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji względem braku uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy.

7. Ocena wyników pracy

7.1. Ocena realizacji celu pracy

Rozprawa dotyczy problematyki synchronizacji rozkładów jazdy w węzłach przesiadkowych, spełniających przyjęte w metodzie założenia i uwzględniającej oddziaływanie czynników o charakterze stochastycznym. Synchronizacja rozkładu jazdy w okresie funkcjonowania węzła realizowana była na styku transportu kolejowego i autobusowej komunikacji miejskiej, z których oba pełnią własne zadania w zaspokojeniu potrzeb mobilnościowych mieszkańców, łącząc generatory ruchu. Modyfikacje dotyczyły rozkładu jazdy w autobusowej komunikacji miejskiej bez stosowania buforowania czasu zatrzymania a linie komunikacyjne w kierunkach jazdy cechowała rytmiczność w okresach $h(j\alpha, o)$ i wspólne fragmenty tras. Celem naukowym rozprawy było opracowanie metody synchronizacji pozwalającej zbadać wpływ uwzględnienia podczas konstrukcji rozkładów jazdy odchyłek od rozkładu jazdy, występujących w węźle przesiadkowym na zmianę czasu podróży pasażerów zmieniających środek transportu w tym węźle z transportu kolejowego na autobusową komunikację miejską, w ciągu doby.

W ramach realizacji celu w rozprawie dokonano identyfikacji aktualnej problematyki dotyczącej realizacji podróży transportem zbiorowym w kontekście budowy rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym (rozdział 1 i 2). Wykonano przegląd metod i algorytmów stosowanych w synchronizacji rozkładów jazdy (rozdział 2). W pracy sformułowano model węzła przesiadkowego i jego otoczenia dostosowany do potrzeb opisu procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym dla potoku pasażerów w ujęciu stochastycznym (rozdział 3). Zdefiniowano zadanie optymalizacyjne, w którym jako kryterium oceny jakości rozwiązania przyjęto średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z transportu kolejowego na autobusową komunikację miejską w skali doby rozpatrywany jako destymulanta (rozdział 4). W opracowanej, autorskiej metodzie synchronizacji rozkładów jazdy zastosowano opracowany model formalny węzła przesiadkowego i jego otoczenia, określono schemat postępowania w zakresie zgromadzenia, przygotowania i analizy danych wejściowych, do proponowanej metody. Przedstawiono procedurę obliczeniową w ramach synchronizacji rozkładów jazdy, charakteryzując działania i kroki postępowania realizowane w poszczególnych etapach opracowanego algorytmu i dostosowanego do przyjętego zadania optymalizacyjnego. W zdefiniowanym algorytmie zintegrowano metodę metaheurystyczną i modelowanie symulacyjne. Zastosowano przeszukiwanie lokalne, w tym przeszukiwanie z tabu oraz metodę Monte Carlo. Synchronizację rozkładów jazdy realizowano poprzez badanie kolejno każdego z segmentów docelowych bez względu na zakres zmian rozkładu jazdy dokonany podczas analizy wcześniejszych segmentów. Dodatkowo w ramach proponowanego algorytmu zastosowano metodę wielokrotnych startów rozumianą w pracy jako realizacja przeglądu lokalnego rozwiązań sąsiednich dla każdego segmentu będąca kolejną próbą skrócenia średniego czasu

oczekiwania bez względu na rezultaty modyfikacji rozkładów jazdy dla linii komunikacyjnych obsługujących wcześniej rozważane segmenty.

Jako cel użyteczny pracy przyjęto opracowanie narzędzia wspomagającego synchronizację rozkładów jazdy realizowaną według proponowanej metody, uwzględniającej odchyłki od rozkładu jazdy, występujące w węźle przesiadkowym. Na potrzeby badań eksperymentalnych opracowaną metodę zaimplementowano w języku Visual Basic w formie narzędzi wspomagających kolejne etapy realizacji procedury synchronizacji rozkładów jazdy (rozdział 5). Dla potrzeb przeprowadzenia oceny wyników oraz charakterystyki porównawczej rozwiązań wyznaczonych dla rozpatrywanych przypadków testowych określono zbiór miar charakteryzujących średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w okresie funkcjonowania węzła z transportu kolejowego na autobusową komunikację miejską. Pozwoliło to określić wpływ uwzględniania odchyłek od rozkładu jazdy w synchronizacji na czas oczekiwania pasażerów podczas zmiany środka transportu (rozdział 6).

Realizacja synchronizacji rozkładów jazdy w wybranych węzłach przesiadkowych zlokalizowanych na terenie GZM wraz z analizą rezultatów stanowiła weryfikację proponowanej metody. Scharakteryzowano badane węzły przesiadkowe, w tym strukturę regularnych odchyłek od rozkładu jazdy w węźle oraz przygotowano zbiór danych wejściowych do proponowanej metody. Wykazano zasadność stosowania opracowanej struktury algorytmu (rozdział 6). Następnie omówione zostały rezultaty zastosowania proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy do zbioru węzłów przesiadkowych funkcjonujących w systemie transportowym GZM. Dla rozpatrywanych przypadków testowych rozkłady jazdy zsynchronizowane przy pomocy proponowanej metody poddano analizie porównawczej w odniesieniu do zbioru dopuszczalnych rozkładów jazdy, obowiązujących rozkładów jazdy w badanych węzłach przesiadkowych oraz rozkładów jazdy zsynchronizowanych przy pomocy proponowanej metody, z pominięciem odchyłek od rozkładów jazdy. Przedstawione wyniki analizy porównawczej par przypadków testowych, różniących się stanem w atrybucie „czynniki o charakterze stochastycznym”, potwierdzają wpływ uwzględniania odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji na różnicę średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu. Wskazane różnice determinowane są przez dobór rozkładów jazdy dostosowanych do danych wejściowych i ocenianych przy pomocy przyjętej funkcji kryterium. Wykazano w tym zakresie, że w zależności od przypisanych stanów w atrybutach opisujących przypadki testowe, występują wyraźne różnice średniego czasu oczekiwania pasażerów i wielkości skrócenia czasu oczekiwania związanego z wprowadzeniem rozkładu jazdy zsynchronizowanego z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy (rozdział 6).

Zrealizowane działania i uzyskane wyniki potwierdziły, że zakres badań przyjęty w dysertacji był konieczny i wystarczający do osiągnięcia celów pracy. Opracowanie w ramach rozprawy autorskiej metody synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym obejmowało konstrukcję algorytmu, dobór parametrów procedury postępowania oraz testowanie, weryfikację i walidację proponowanej metody. W części aplikacyjnej pracy, w celu ułatwienia praktycznej implementacji zaproponowanej metody

przygotowano dedykowane narzędzie wspierające synchronizację rozkładów jazdy, stanowiące element użyteczny przeprowadzonych badań.

Opracowana metoda uwzględnia podczas konstrukcji rozkładów jazdy regularne odchyłki, występujące w węzle przesiadkowymi różnicowanie czasu przebycia dróg przejścia. Pozwala to tym samym zapewnić synchronizację rozkładów jazdy w rzeczywistych warunkach funkcjonowania węzła przesiadkowego. W metodzie rozpatrywane są podróże w poszczególnych relacjach a linie komunikacyjne cechują wspólne segmenty i rytmiczność w okresach $h(j\alpha, o)$. Zrealizowane w ramach rozprawy badanie wpływu zastosowania proponowanej metody, w tym stanów atrybutów dla rozważanego zbioru przypadków testowych na czas podróży pasażerów zmieniających środek transportu w ciągu doby, w tym węzle z pociągu na autobus komunikacji miejskiej stanowi realizację celu naukowego pracy.

Zakres przeprowadzonych badań i analiz w zakresie walidacji metody, poprzez jej zastosowanie do synchronizacji rozkładów jazdy dla zbioru przypadków testowych, z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy, występujących w rozważanych węzłach przesiadkowych, przeprowadzonej przy pomocy samodzielnie opracowanego narzędzia dowodzi osiągnięcia celu użytecznego pracy.

Proponowana metoda synchronizacji rozkładów jazdy bezpośrednio wpisuje się w kierunki badań podejmowane aktualnie w literaturze światowej, ponieważ zorientowana jest na zwiększanie dopasowania planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej ze stanowisk przystankowych do zgłaszanego w skali doby zapotrzebowania na realizację podróży pasażerów wchodzących na stanowiska przystankowe w węzle przesiadkowym, na którym oczekują na wejście do pojazdu.

Proponowana metoda uwzględnia postulaty zgłaszane przez pasażerów transportu zbiorowego zarówno zmieniających środek transportu z pociągu na autobus, jak i pozostałych pasażerów korzystających z linii komunikacyjnych obsługujących węzeł przesiadkowy. Zostało to zapewnione poprzez brak buforowania czasu zatrzymania autobusów w węzle przesiadkowym i rytmiczny w okresach rozkład jazdy w komunikacji miejskiej θYJA . Dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w okresach uwzględniono niezależne wartości stałego interwału $h(j\alpha, o)$ oraz dostosowano zmiany częstotliwości kursowania pomiędzy okresami do interwałów $h(j\alpha, o)$ w kolejnych okresach o .

Zgodnie z przyjętymi w literaturze aktualnymi kierunkami badań w metodzie, w funkcji kryterium uwzględniana jest liczba osób zmieniających środek transportu w węzłach przesiadkowych z pociągów na autobusy komunikacji miejskiej w ciągu doby, w poszczególnych relacjach podróży. Podstawą oceny rozwiązań, dla potrzeb synchronizacji jest czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu związany z rozkładem jazdy, determinowanym przyjętą w rozprawie zmienną decyzyjną. Przyjętym celem synchronizacji jest minimalizacja średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej. W metodzie rozpatrywane są wszystkie kursy zapewniające połączenie węzła przesiadkowego z segmentami źródłowym i docelowym w rozważanych relacjach podróży.

Przedstawione cechy i uwzględniana konfiguracja czynników stanowią o oryginalności proponowanej metody, która została zaimplementowana w autorskim narzędziu wspomagającym synchronizację rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym. Opracowany zbiór programów umożliwia realizację budowy rozkładów jazdy, zgodnie z procedurami zdefiniowanymi w kolejnych etapach proponowanej metody. Zastosowanie opracowanego narzędzia, wspomagającego realizację obliczeń w proponowanej metodzie synchronizacji rozkładów jazdy stanowi osiągnięcie przyjętego w rozprawie celu utylitarnego zgodnie z zamierzeniami.

Wyniki oceny istotności różnic w strukturze odchyłek od rozkładów jazdy potwierdziły zasadność prowadzenia odrębnych badań dla linii komunikacyjnych w poszczególnych typach dni ruchowych, okresach o . Dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym potwierdzono istotność różnic dla poszczególnych zbiorów danych w 88% przypadków w okresie roku szkolnego ER i 78% w dni w okresie wakacji EW , a w 75% podczas badania wpływu pozostałych czynników. Zgodność danych empirycznych z teoretycznym rozkładem prawdopodobieństwa geometrycznym, Poissona, dwumianowym i Bernoullego odrzucono dla 70% analizowanych zbiorów danych. Pomimo nieznacznego udziału połączeń przyspieszonych, (nie przekracza 3%) występuje duże zróżnicowanie udziałów liczby połączeń punktualnych dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym, determinowane również przez lokalne uwarunkowania węzła. Dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy ja w okresach o i typach dni ruchowych e potwierdzono istotne różnice dla 95% analiz porównawczych rozważanych zbiorów danych. Dla wybranych teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa tj. mieszaniny dwóch rozkładów normalnych, uogólnionego wartości ekstremalnej, Jonsona SB, normalnego i trójkątnego najlepsze dopasowanie potwierdzono z mieszaniną dwóch rozkładów normalnych. Zgodność danych empirycznych z teoretycznym rozkładem prawdopodobieństwa odrzucono dla 2% zbadanych zbiorów danych. Ponadto na podstawie analizy podobieństwa wartości średniej dla zbiorów odchyłek od rozkładu jazdy w kolejnych okresach o dokonano grupowania linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy. W dni robocze w okresie roku szkolnego ER wyróżniono 5 a w dni robocze w okresie wakacji EW 3 skupienia. Różnice pomiędzy skupieniami wynikają z różnic pomiędzy szczytami komunikacyjnymi $O2$ i $O4$ oraz okresami pozaszczytowymi $O1$, $O3$, $O5$ w wartościach średnich opisujących odchyłki od rozkładu jazdy. Na podstawie przyjętej miary wykryto, występowanie odmiennych tendencji dla poszczególnych typów dni ruchowych e . Dotyczących różnic wartości średnich opisujących kolejne okresy o .

Analizę wpływu odchyłek od rozkładu jazdy na czas podróży zrealizowano dla rozważanego w pracy zbioru par przypadków testowych $rCSV$. Czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym wynika m.in. z rozkładu jazdy. Dla każdego przypadku testowego rozważano rozkład jazdy zsynchronizowany z zastosowaniem proponowanej metody oraz danych wejściowych i ograniczeń wynikających z przypisanych stanów atrybutów. W każdej parze odpowiadające sobie przypadki testowe różnią się jedynie uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji. Następnie z zastosowaniem zbioru pojedynczych realizacji procesu zmiany środka transportu w ujęciu stochastycznym dla potoku pasażerów ZS_v , niezależnego od stosowanego podczas

synchronizacji, wyznaczono dla każdego rozkładu jazdy w węźle średni czas oczekiwania. W każdej z badanych par przypadków testowych potwierdzono występowanie istotnych różnic czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus. Dla każdej pary przypadków testowych w badanym zbiorze **rCSV** krótszy średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym charakteryzował rozkład jazdy zsynchronizowany z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy niż rozkład jazdy zsynchronizowany z pominięciem odchyłek od rozkładu jazdy. Zależnie od rozważanej pary przypadków testowych średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu zmniejszono od 2% do 22%, przy czym skrócenie czasu oczekiwania nie zależy od czasu oczekiwania w węźle.

Analiza porównawcza różnic czasu oczekiwania wykazała istnienie dyspersji wartości dla rozważanego w pracy zbioru par przypadków testowych **rCSV**. Dla każdego atrybutu zbiór **rCSV** podzielono na podzbiory. Pozwoliło to zbadać wpływ stanów atrybutów na wielkość zmian czasu oczekiwania pasażerów w wyniku uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy w synchronizacji względem rozwiązań wyznaczonych z pominięciem danych o odchyłkach. Zróżnicowanie wartości pomiędzy poszczególnymi stanami stanowiło podstawę wyróżnienia atrybutów, które w największym stopniu wpływają na wielkość zmian czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym, wynikających z uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy w synchronizacji.

Czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w największym stopniu zależy od lokalizacji węzła w sieci transportowej i osadniczej. Pomiedzy podzbiorymi par przypadków testowych wyróżnionych na podstawie stanów tego atrybutu **rCSV(u)** występują największe różnice wartości miary charakteryzującej czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w całym okresie funkcjonowania węzła (oznaczonej jako $\overline{utm}(sq, \mathbf{war}_v^*)$). Czas oczekiwania jest mniejszy w węzłach Porąbka i Rojca niż w węzłach Modelowy i Ząbkowice, Drugim, w kolejności malejącej istotności, jest atrybut „czynniki o charakterze stochastycznym CS”. Różnica wartości średnich czasu oczekiwania $\overline{utm}(sq, \mathbf{war}_v^*)$ w wyniku uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji względem rozwiązań wyznaczonych z pominięciem danych o odchyłkach wyniosła 0,8 min. Wskazana różnica stanowi 7,8% wartości średniego czasu oczekiwania w węźle i zapewnia skrócenie całkowitego czasu oczekiwania pasażerów średnio o 140 min w ciągu doby. W sposób istotny na zróżnicowanie średniego czasu oczekiwania wpływa również atrybut „sposób łączenia taktów”. Dla sposobów łączenia taktów *SLT2* i *SLT4* wartości średniego czasu oczekiwania są najmniejsze a dla *SLT3* największe. Nie stwierdzono istnienia związków między wartościami średnimi czasu oczekiwania a wielkością zmiany średniego czasu oczekiwania wynikającej z uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy podczas zastosowania proponowanej metody. Największe względne różnice wartości miary średniej występują dla węzła Ząbkowice i sposobu łączenia taktów *SLT1* a najmniejsze dla węzłów Modelowy i Rojca oraz sposobów łączenia taktów *SLT2* i *SLT4*.

Wyniki badań zrealizowanych w ramach rozprawy i scharakteryzowanych w niniejszym podrozdziale obejmujących:

- analizę porównawczą odchyłek od rozkładu jazdy pomiędzy liniami komunikacyjnymi w kolejnych okresach o , w tym ocenę zgodności rozkładów empirycznych opisujących odchyłki z teoretycznymi rozkładami prawdopodobieństwa,
- ocenę wpływu uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy w synchronizacji, realizowanej przy pomocy proponowanej metody, na średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających w węźle przesiadkowym w ciągu doby środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej,
- określenie wpływu lokalnych uwarunkowań funkcjonowania węzłów przesiadkowych i przyjętych w pracy zasad budowy rozkładu jazdy odwzorowanych w postaci zbioru stanów atrybutów na zróżnicowanie zmian średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z pociągu na autobus, wynikających z zastosowania proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy

potwierdzają realizację trzech szczegółowych celów przyjętych w pracy, stanowiąc tym samym dane istotne na etapie opracowywania i weryfikacji metody, charakterystyki zróżnicowania uzyskanych rezultatów synchronizacji rozkładów jazdy z zastosowaniem proponowanej metody oraz charakterystykę procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym na obszarze GZM. Osiągnięcie celów szczegółowych stanowi wkład w rozwój nauki, uzupełnienie luki badawczej i jest podstawą do realizacji dalszych badań.

Istotne, oryginalne osiągnięcia metodyczne i praktyczne pracy to:

- sformułowanie zadania optymalizacyjnego i formalizację procesu zmiany środka transportu dla potoku pasażerów rozpatrywanego w ujęciu stochastycznym,
- opracowanie uniwersalnego algorytmu metody synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym, uwzględniającej regularne odchyłki od rozkładu jazdy, dyspersję czasu przebycia dróg przejścia, umożliwiającą na styku dwóch podsystemów transportu synchronizację rozkładów jazdy poprzez dostosowanie planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej w kursach dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy i charakteryzowanych przez rytmiczność w okresach $h(j\alpha, o)$, bez buforowania czasu zatrzymania, do rozkładów jazdy w transporcie kolejowym $\theta Y \mathcal{K}$,
- zbadanie wpływu zastosowania przeszukiwania z tabu na poprawę rozwiązania wyznaczonego przy pomocy proponowanej metody,
- weryfikacja i zastosowanie proponowanej metody,
- oszacowanie dla rozwiązań wyznaczonych proponowaną metodą synchronizacji rozkładów jazdy różnic średniego czasu oczekiwania w odniesieniu do zbioru dopuszczalnych rozkładów jazdy dla badanych węzłów przesiadkowych,
- charakterystykę dla badanych węzłów przesiadkowych cech związanych z funkcjonowaniem tych obiektów w systemie transportu zbiorowego,
- analizę porównawczą odchyłek od planowanych momentów: przyjazdów pociągów i odjazdów autobusów komunikacji miejskiej w poszczególnych typach dni ruchowych e , okresach o dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy $j\alpha$ i dla relacji w transporcie kolejowym $j\mathcal{K}$,

- klasyfikację linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w komunikacji miejskiej na podstawie odchyłek od planowanych momentów odjazdów ze stanowisk przystankowych w węźle przesiadkowym,
- dobór parametrów teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa opisującego rozkład odchyłek od rozkładu jazdy dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w okresach o ,
- zbadanie czasu przebycia dróg przejścia w wybranych węzłach przesiadkowych,
- dobór parametrów teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa opisującego rozkład czasu przejścia poszczególnych dróg przejścia,
- zbadanie wpływu uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji na zmiany średniej czasu oczekiwania pasażerów względem rozwiązań wyznaczonych proponowaną metodą z pominięciem odchyłek od rozkładu jazdy wraz ze wskazaniem wpływu stanów atrybutów na zróżnicowanie zmian średniego czasu oczekiwania,
- zbadanie wpływu przyjętych w pracy stanów atrybutów na zróżnicowanie średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym, zrealizowane na podstawie oceny rozwiązań wyznaczonych z zastosowaniem proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy,
- opracowanie zasad i schematu postępowania w zakresie gromadzenia, przygotowania i analizy danych wejściowych do proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy wraz ze wskazaniem przyjętych w dysertacji zasad odwzorowania organizacji węzła przesiadkowego.

7.2. Weryfikacja tezy i rekomendacje końcowe

Badania zrealizowane w ramach pracy, pozwoliły zweryfikować słuszność sformułowanej hipotezy poprzez analizę porównawczą średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z pociągu na autobus komunikacji miejskiej w ciągu doby, determinowany przez rozkłady jazdy wyznaczony dla par przypadków testowych ***rCSV*** z zastosowaniem proponowanej metody. Jedno z pary rozwiązań wyznaczono z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy a drugie z pominięciem danych o odchyłkach od rozkładu jazdy.

Na podstawie uzyskanych w rozprawie wyników badań obejmujących potwierdzenie dla każdej z rozważanego zbioru par przypadków testowych ***rCSV*** istotnych statystycznie różnic średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle dla rozwiązań wyznaczonych proponowaną metodą stanowi podstawę stwierdzenia słuszności hipotezy badawczej postawionej w dysertacji.

Synchronizacja rozkładów jazdy uwzględniająca odchyłki od rozkładu jazdy występujące w węźle przesiadkowym i realizowana z zastosowaniem przeszukiwania lokalnego pozwala skrócić średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus w tym węźle.

Wartość średnia skrócenia czasu oczekiwania $\overline{\rho_{utm}}(rCSV)$ wyniosła 7,8%.

Uzyskane podczas realizacji prac badawczych wyniki obejmują:

- potwierdzenie braku związku między średnim czasem oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu $\mu_{tm}(\mathbf{war}_v^*)$ dla poszczególnych przypadków testowych a wartościami względnej poprawy średniego czasu oczekiwania w rezultacie uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji rozkładów jazdy charakteryzującymi pary (v, v') przypadków testowych. W analizie zidentyfikowano odmienny wpływ stanów badanych atrybutów na uzyskane wyniki.
- potwierdzenie istotnego statystycznie wpływu stanów atrybutów dotyczących lokalizacji węzła w sieci transportowej i osadniczej oraz sposobów łączenia taktów na zróżnicowanie wartości miary względnej różnicy średniego czasu oczekiwania na skutek uwzględnienia w proponowanej metodzie odchyłek od rozkładu jazdy względem rozwiązań wyznaczonych z pominięciem odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji, oznaczonej jako $\rho_{utm}(\mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_{v'}^*)$. Wartości miary $\rho_{utm}(\mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_{v'}^*)$ zawierają się w przedziale odpowiednio od 4% (węzeł Modelowy) do 13% (węzeł Ząbkowice) oraz od 5,7% (Sposób *SLT2*) do 8,6% (*SLT1*). Wykazano brak wpływu stanów atrybutu dotyczącego typów dni ruchowych e .
- potwierdzenie istotności statystycznej różnic pomiędzy zbiorami odchyłek od rozkładu jazdy. Pojedynczy zbiór obejmuje odchyłki od rozkładu jazdy zarejestrowane odpowiednio dla relacji w transporcie kolejowym w okresie o i typie dni ruchowych e a w komunikacji miejskiej dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy $j\alpha$, w okresie o i typie dni ruchowych e . W danej grupie analiz porównywano odpowiadające sobie zbiory, różniące się stanami w rozważanym atrybucie. Pomiędzy zbiorami odchyłek od rozkładu jazdy charakteryzującymi poszczególne relacje w transporcie kolejowym różnice potwierdzono w 83% porównywanych par. Natomiast w 75% badanych relacji w transporcie kolejowym potwierdzono istnienie różnic pomiędzy zbiorami odchyłek występującymi odpowiednio w okresie roku szkolnego ER i w okresie wakacji EW oraz w poszczególnych okresach o . W komunikacji miejskiej różnice pomiędzy porównywanymi parami zbiorów odchyłek od rozkładu jazdy potwierdzono pomiędzy poszczególnymi:
 - stanami w atrybucie „Typ dni ruchowych E ” w 90% par,
 - okresami o w 95% par,
 - kierunkami jazdy $j\alpha$ w 97% par.
- stwierdzenie braku zgodności rozkładu empirycznego odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów w poszczególnych relacjach w transporcie kolejowym $j\kappa$ w okresach o z teoretycznymi rozkładami prawdopodobieństwa: geometrycznym, Poissona, dwumianowym i Bernoullego.
- potwierdzenie zgodności rozkładów empirycznych odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów komunikacji miejskiej w kursach dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy $j\alpha$ w okresach o z mieszaniną dwóch rozkładów normalnych.
- potwierdzenie zgodności rozkładów empirycznych czasu przebycia poszczególnych dróg przejścia p w okresach o z mieszaniną dwóch rozkładów normalnych.

Autorskim wkładem w rozwój nauki w zakresie synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym jest:

- opracowanie metody synchronizacji rozkładów jazdy pozwalającej:
 - uzupełnić dotychczasową lukę badawczą w literaturze w zakresie badań wpływ uwzględniania odchyłek od rozkładu jazdy na zmianę czasu podróży pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z pociągów na autobusy komunikacji miejskiej względem rozwiązań wyznaczonych z pominięciem odchyłek od rozkładu jazdy,
 - wyznaczyć rozwiązania spełniające zbiór przyjętych w pracy założeń, zasad budowy rozkładów jazdy i synchronizacji, w szczególności stały interwał w komunikacji miejskiej dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w kolejnych okresach *o* oraz zsynchronizowany rozkład jazdy w całym okresie funkcjonowania węzła poprzez realizację procedury zorientowanej na obsłudze relacji podróży a nie odrębnych liniach komunikacyjnych m.in. w wyniku uwzględnienia wspólnych odcinków tras linii komunikacyjnych,
 - zapewnić, poprzez synchronizację rozkładów jazdy, dopasowanie momentów realizacji kursów w rzeczywistych warunkach funkcjonowania węzła przesiadkowego do potrzeb minimalizacji średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej,
 - zanalizować wyniki zastosowania w praktyce integracji podejścia stochastycznego w synchronizacji rozkładów jazdy realizowanej poprzez połączenie modelowania symulacyjnego i przeszukiwania lokalnego,
 - odwzorować w opracowanym modelu zróżnicowane uwarunkowania lokalne organizacji i funkcjonowania węzła przesiadkowego w sieci transportowej i osadniczej, zapewniając szeroki zakres zastosowania,
 - poprawić funkcjonowanie istniejących i projektowanych węzłów przesiadkowych, zwłaszcza narażonych na występowanie odchyłki od rozkładów jazdy, co jest powszechnym problemem w kluczowych ośrodkach i aglomeracjach,
 - przyczynić się do poprawy funkcjonowania węzłów przesiadkowych, jakości obsługi pasażerów i zmniejszenia uciążliwości związanych z czasem oczekiwania podczas zmiany środka transportu, a tym samym stanowiąc wkład w zwiększenie atrakcyjność transportu zbiorowego i zmniejszenie uzależnienia od transportu indywidualnego, wpłynąć w dłuższej perspektywie na zwiększenie udziału transportu zbiorowego w podróżach, wpisując się w cele zrównoważonego rozwoju miast a w kontekście społecznym w zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych, poprawy warunków w ruchu drogowym i jakości życia mieszkańców,
 - dostosować planowane momenty odjazdów autobusów do potrzeb pasażerów zmieniających środek transportu, co jest szczególnie istotne w obliczu rosnących wyzwań,
 - przyczynić się do zwiększenia integracji różnych podsystemów transportu zbiorowego tj. transportu kolejowego i autobusowej komunikacji miejskiej, co jest ważne dla zwiększania efektywności systemu transportowego obszarów funkcjonalnych.

- opracowanie narzędzia wspomagającego procedurę obliczeniową synchronizacji rozkładów jazdy realizowanej według proponowanej metody, co może stanowić w przyszłości istotny wkład w poprawę zarządzania transportem miejskim,
- zbadanie wpływu uwzględniania odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji na średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z transportu kolejowego na komunikację miejską względem czasu rozkładu jazdy zsynchronizowanego z pominięciem odchyłek od rozkładu jazdy,
- zbadanie odchyłek od rozkładu jazdy związanych z wybranymi węzłami przesiadkowymi w GZM, w tym zgodności rozkładów empirycznych z teoretycznymi,
- zbadanie struktury czasu przebycia dróg przejścia p w okresach o ,
- zbadanie wpływu stanów wybranych atrybutów charakteryzujących badane węzły przesiadkowe na wartości i zmiany średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym.

Przedstawione elementy podkreślają wagę badanego problemu, głęboko osadzonego w aktualnych wyzwaniach transportowych oraz wkład wyników pracy w rozwój teorii i praktyki w zakresie transportu zbiorowego.

7.3. Kierunki dalszych badań

Na podstawie uzyskanych wyników badań i sformułowanych w pracy wniosków zidentyfikowano kilka kierunków realizacji **dalszych prac badawczych** stanowiących rozwinięcie podjętego w rozprawie tematu. Są to:

- 1) analiza wpływu szczegółowych charakterystyk składających się na rolę węzła w sieci transportowej i osadniczej na wielkość skrócenia średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu opisanego miarą $\rho_{utm}(\mathbf{war}_v^*, \mathbf{war}_{v'}^*)$ i związanego z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji,
- 2) realizacja synchronizacji rozkładu jazdy, w której zastosowana miara oceny jakości rozwiązania uwzględnia subiektywną ocenę czasu przez poszczególnych pasażerów i zróżnicowanie zachowań podróżnych w procesie zmiany środka transportu,
- 3) rozbudowanie metody o opis dodatkowych elementów związanych z procesem zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym w ujęciu potoku pasażerów, istotnych z perspektywy pasażera i operatora,
- 4) dostosowanie metody do realizacji synchronizacji rozkładów jazdy zapewniającej osiągnięcie zbliżonych rezultatów, na podstawie wybranych z dotychczas zastosowanego zbioru danych wejściowych.

Pierwszym ze wskazanych obszarów jest identyfikacja węzłów, dla których stosowanie proponowanej metody jest zasadne lub szczególnie korzystne. Działania w zakresie analizy lokalnych uwarunkowań węzła powinny obejmować określenie zakresu wartości, w którym występuje skrócenie czasu oczekiwania, na skutek uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy podczas synchronizacji, względem rozwiązań wyznaczonych z pominięciem odchyłek od rozkładu jazdy. Analiza wrażliwości powinna obejmować określenie wpływu wartości

charakterystyk na potwierdzenie istotności i wielkość skrócenia średniego czasu oczekiwania. Należy rozważyć w tym zakresie analizę następujących charakterystyk:

- parametrów rozkładu prawdopodobieństwa odrębnie dla każdego z badanych czynników o charakterze stochastycznym,
- opisu odchyłek od rozkładu jazdy przy pomocy innych teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa,
- liczby i układu przestrzennego segmentów,
- liczby pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym i zróżnicowania czasowo-przestrzennego wielkości potoków pasażerów,
- liczby linii komunikacyjnych, liczby kursów i interwału $h(j\alpha, o)$ związanych z obsługą zapotrzebowania na podróż w określonej relacji,
- rozkładu jazdy w transporcie kolejowym.

Dalsze działania w **drugim obszarze badawczym** powinny dotyczyć oceny zasadności uwzględnienia w metodzie subiektywnego postrzegania przez pasażerów procesu zmiany środka transportu i składowych czasu podróży. Podstawę analizy stanowi związek między oczekiwanym przez pasażerów planowanym czasem zmiany środka transportu w węźle a występowaniem odchyłek od rozkładu jazdy. Badania mogłyby obejmować ocenę skutków przyjęcia wag odwzorowujących zróżnicowane wśród pasażerów postrzeganie czasu, na zmiany w zakresie wyznaczanych rozwiązań. Istotne w tym kontekście jest uwzględnienie w metodzie konsekwencji niezrealizowania planowanej przesiadki, preferencji pożądaných i unikania uciążliwości w zakresie niedopasowanego czasu przesiadania, tj. zbyt krótkiego zwiększającego zawodność i zbyt długiego pogarszającego konkurencyjność względem podróży samochodem osobowym. Działania w ramach dalszych badań proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy powinny koncentrować się na ocenie zasadności stosowania metody rozszerzonej o preferencje pasażerów. Prace musiałyby być prowadzone równolegle ze szczegółowym badaniem preferencji pasażerów, zorientowanym na dobór wartości wag do zastosowania podczas synchronizacji rozkładów jazdy.

Ponadto można badać rezultaty rozszerzenia opisu o prawdopodobieństwo wyboru przez pasażerów linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy i dróg przejścia. Zróżnicowanie wyborów dokonywanych przez pasażerów determinowane może być rozkładem jazdy w węźle, przewidywanym czasem oczekiwania do odjazdu autobusu w najbliższym kursie, odrębnie dla każdej linii komunikacyjnej w kierunku jazdy lub relacji podróży, układem tras linii komunikacyjnych, dostępnością przestrzenną transportu pasażerskiego, preferencjami w zakresie sposobów pokonywania ostatniej mili. Ocena wpływu zróżnicowania wyborów dokonywanych przez pasażerów zmieniających środek transportu pozwoliłaby określić zasadność uwzględniania tego zjawiska w metodzie. Badanym parametrem mógłby być udział pasażerów dokonujących wyboru w odniesieniu do pasażerów, którzy w dotarciu do segmentu docelowego zaakceptują każdą z dostępnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy. Prace powinny być poprzedzone badaniami terenowymi, określającymi skalę zjawiska akceptacji przez pasażerów tylko wybranych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w kontynuowaniu podróży i wpływ czynników na decyzje pasażerów o wyborze poszczególnych kursów.

Jako **trzeci obszar badawczy** wskazano rozbudowanie metody poprzez uwzględnienie dodatkowych elementów związanych z funkcjonowaniem transportu zbiorowego i obsługą węzła przesiadkowego. Wskazać należy na pogłębienie dotychczasowych badań z zastosowaniem proponowanej metody. Uzupełnienie mogłoby obejmować zarówno rozszerzenie wskazanego zakresu przyjętych danych wejściowych jak i przyjęcie innych funkcji kryterium uwzględnianych zamiennie lub równocześnie z funkcją przyjętą w rozprawie. Celem synchronizacji w tak rozbudowanej metodzie mogłoby być poszukiwanie rozkładów jazdy pozwalających m.in. maksymalizować niezawodność realizacji zaplanowanej zmiany środka transportu, minimalizować czas oczekiwania wszystkich podróżnych w węźle przesiadkowym, tj. z uwzględnieniem innych grup pasażerów, nierozpatrywanych w dysertacji. Rezultaty pozwoliłyby określić zasadność stosowania metody synchronizacji rozkładów jazdy oraz wielkość skrócenia czasu oczekiwania dla wskazanego, rozszerzonego lub zmienionego zakresu danych wejściowych charakteryzujących węzły przesiadkowe.

Uzyskanie korzystnych rezultatów dla przyjętego w dysertacji zakresu zastosowania metody synchronizacji rozkładów jazdy stanowi uzasadnienie, dla uzupełnienia opisu procesu zmiany środka transportu w węzłach przesiadkowych o dalsze aspekty planowania i organizacji transportu zbiorowego. Wśród elementów, o które można rozbudować proponowaną metodę synchronizacji rozkładów jazdy wskazać należy:

- uwzględnienie w ocenie rozkładów jazdy dodatkowo czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym z autobusów komunikacji miejskiej na połączenia kolejowe, jak i wewnątrz poszczególnych podsystemów transportu,
- dopuszczenie modyfikacji rozkładu jazdy w transporcie kolejowym, z uwzględnieniem zasad i ograniczeń związanych z prowadzeniem ruchu pociągów,
- dopuszczenie podczas budowy rozkładów jazdy odstępstwa w określonych granicach od stałego interwału w okresach $h(j\alpha, o)$,
- uwzględnienie w synchronizacji rozkładów jazdy wymagań związanych z budową zadań transportowych,
- rozbudowanie, uzupełnienie opracowanego zadania optymalizacyjnego w taki sposób, aby stanowiło składową optymalizacji wielokryterialnej, obejmującej dodatkowe aspekty budowy rozkładów jazdy realizowanej z perspektywy różnych interesariuszy,
- stosowanie buforowania czasu zatrzymania w węźle i opóźniania odjazdów w celu gwarantowania zmiany środka transportu,
- opracowanie metody synchronizacji rozkładów jazdy pozwalającej na bazie dotychczasowych rezultatów, równocześnie synchronizować rozkład jazdy w wielu węzłach przesiadkowych, w sieci transportu zbiorowego z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy.

W ramach każdego ze wskazanych obszarów badawczych dodatkowych informacji powinna dostarczyć analiza wrażliwości. Uzyskane wyniki wskażą zakres wartości charakterystyk opisujących lokalne uwarunkowania węzłów przesiadkowych, dla których stosowanie

proponowanej, rozbudowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy w największym stopniu pozwoli skrócić czas oczekiwania.

Ostatnim obszarem dalszych badań jest opracowanie uproszczonej wersji proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy na bazie zrealizowanych w rozprawie analiz i uzyskanych wyników. Na podstawie wybranego podzbioru danych wejściowych, uproszczona metoda pozwalałaby zsynchronizować rozkłady jazdy, uzyskując podobne rezultaty jakie osiągnięto w niniejszej pracy. Dalsze badania powinny wskazać zakres wartości charakterystyk związanych z węzłem przesiadkowym, dla których stosowanie uproszczonej metody jest zalecane. Ponadto ocena porównawcza metody synchronizacji rozkładów jazdy w wersjach obecnej i uproszczonej pozwoliłaby wskazać różnice czasu oczekiwania pasażerów charakteryzujących wyznaczone pary rozwiązań.

Literatura

- [1] T. Abdallah, *Sustainable Mass Transit: Challenges and Opportunities in Urban Public Transportation*, 2. wyd., Amsterdam: Elsevier, 2023, ISBN: 978-0-443-15271-9.
- [2] M. Abdolmaleki, N. Masoud, and Y. Yin, „Transit timetable synchronization for transfer time minimization”, *Transportation Research Part B: Methodological*, t. 131, pp. 143–159, 2020. ISSN 0191-2615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.12.002>.
- [3] O. P. Agarwal, G. Padam, and C. Ibraimova, *Formulating an Urban Transport Policy: Choosing Between Options*. Washington, DC, USA: International Bank for Reconstruction and Development, 2014.
- [4] K. Aghabayk, N. Parishad, and N. Shiwakoti, "Investigation on the impact of walkways slope and pedestrians' physical characteristics on pedestrians' normal walking and jogging speeds," *Safety Science*, vol. 133, 2021, Art. no. 105012, ISSN 0925-7535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105012>
- [5] Z. H. Ahmed and M. Yousefikhoshbakht, "An improved tabu search algorithm for solving heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem with time windows," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 64, pp. 349–363, 2023. ISSN: 1110-0168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.008>.
- [6] R. Akuh, M. Zhong, A. Raza, and Y. Dong, „A method for evaluating the balance of land use and multimodal transport system of new towns/cities using an integrated modeling framework”, *Multimodal Transportation*, t. 2, no. 1, 2023. ISSN 2772-5863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.multra.2022.100063>.
- [7] E. Algaba, V. Fragnelli, N. Llorca, and J. Sánchez-Soriano, „Horizontal cooperation in a multimodal public transport system: The profit allocation problem”, *European Journal of Operational Research*, t. 275, no. 2, pp. 659–665, 2019. ISSN 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.050>
- [8] S. Ali, J. Kodi, P. Alluri, and T. Sando, "Exploring the operational benefits of transit signal priority: A microsimulation-based analysis," *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2023. ISSN 2046-0430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2023.01.003>.
- [9] B. Alidaee and H. Wang, "Uncapacitated (Facility) Location Problem: A Hybrid Genetic-Tabu Search Approach," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 10, pp. 1619–1624, 2022. ISSN: 2405-8963. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.622>.
- [10] B. Amberg, B. Amberg, and N. Kliewer, „Robust Efficiency in Urban Public Transportation: Minimizing Delay Propagation in Cost-Efficient Bus and Driver Schedules”, *Transportation Science*, t. 53, no.1, pp. 89–112, 2019. DOI: 10.1287/trsc.2017.0757

- [11] E. V. Andersson, A. Peterson, and J. T. Törnquist Krasemann, „Quantifying railway timetable robustness in critical points”, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, t. 3, nr 3, pp. 95–110, 2013. DOI:10.1016/j.jrtpm.2013.12.002
- [12] A. Aziz, M. S. Nawaz, M. Nadeem, and L. Afzal, "Examining suitability of the integrated public transport system: A case study of Lahore," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 117, pp. 13–25, 2018. ISSN 0965-8564 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.08.003>.
- [13] H. Badia, J. Argote-Cabanero and C. F. Daganzo, „How network structure can boost and shape the demand for bus transit”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, t. 103, pp. 83–94, 2017. ISSN 0965-8564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.05.030>.
- [14] H. Badia, J. Argote-Cabanero, and C. F. Daganzo, "How network structure can boost and shape the demand for bus transit," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 103, pp. 83–94, 2017. DOI: 10.1016/j.tra.2017.05.030.
- [15] A. Barchański, R. Żochowska, M. J. Kłos, and P. Soczówka, „Klasyfikacja węzłów przesiadkowych na przykładzie obszaru GZM – ujęcie wielokryterialne”, *Transport Miejski i Regionalny*, no. 2, pp. 14–22, 2020.
- [16] A. Barchański, R. Żochowska, i M. Kłos, „A method for the identification of critical interstop sections in terms of introducing electric buses in public transport”, *Energies*, t. 15, Art. nr 20, 2022, doi: 10.3390/en15207543.
- [17] A. Barchański, „Commuter rail service quality: a case study of Rhine-Ruhr metropolitan region”, in Challenges and solutions for present transport systems, G. Sierpiński, H. Masoumi, and E. Macioszek, Red., in *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 609. Springer, 2023, pp. 107–125. doi: 10.1007/978-3-031-24159-8_6.
- [18] A. Barchański, „Passengers satisfaction with commuter rail: a case study of Rhine-Ruhr Metropolitan Region”, w Advanced solutions and practical applications in road traffic engineering, E. Macioszek, A. Granà, i G. Sierpiński, Red., w *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 604. Springer, 2023, pp. 28–46. doi: 10.1007/978-3-031-22359-4_3.
- [19] M. Bauer and K. Bauer, "Effect of travel time variability on the operating cost of a tram line," in *Proceedings of the 38th International Business Information Management Association Conference (IBIMA): Innovation Management and Sustainable Economic Development in the Era of Global Pandemic*, K. S. Soliman, Ed. Seville, Spain: International Business Information Management Association (IBIMA), 2021, pp. 8196–8207, ISBN 978-0-9998551-7-1.
- [20] M. Bauer, "Aktualne tendencje w zakresie organizacji ruchu i infrastruktury transportu publicznego," *Biuletyn Komunikacji Miejskiej*, no. 144, pp. 6–15, 2017, ISSN 1234-9399.
- [21] M. Bauer, "Oczekiwania względem punktualności pojazdów komunikacji miejskiej," *Logistyka*, no. 3, pp. 411–420, 2014.
- [22] H. Becker, M. Balać, F. Ciari, and K. W. Axhausen, "Assessing the welfare impacts of Shared Mobility and Mobility as a Service (MaaS)," *Transportation Research*

- Part A: Policy and Practice*, vol. 131, pp. 228–243, 2020. DOI: 10.1016/j.tra.2019.09.027.
- [23] V. Benezech and N. Coulombel, „The value of service reliability”, *Transportation Research Part B: Methodological*, t. 58, pp. 1–15, 2013. DOI: 10.1016/j.trb.2013.09.009
 - [24] M. W. Bhagat-Conway and S. Zhang, „Rush hour-and-a-half: Traffic is spreading out post-lockdown”, *PLoS ONE*, t. 18, no.9, s. e0290534, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal>
 - [25] M. Bieńczyk, S. Fierek i M. Kiciński, „Regionalny model podróży na potrzeby planu zrównoważonego rozwoju transportu publicznego”, *Logistyka*, nr 4, s. 1673–1682, 2014. [pone.0290534.s001](https://doi.org/10.1016/j.pone.0290534.s001)
 - [26] R. W. Bohannon and A. W. Andrews, "Normal walking speed: a descriptive meta-analysis," *Physiotherapy*, vol. 97, no. 3, pp. 182–189, 2011. ISSN 0031-9406. DOI:10.1016/j.physio.2010.12.004
 - [27] P. M. Bösch, F. Becker, H. Becker, and K. W. Axhausen, "Cost-based analysis of autonomous mobility services," *Transport Policy*, vol. 64, pp. 76–91, 2018. DOI: 10.1016/j.tranpol.2017.09.005.
 - [28] H. Bouscasse and M. de Lapparent, „Perceived comfort and values of travel time savings in the Rhône-Alpes Region”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, t. 124, pp. 370–387, 2019. ISSN 0965-8564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.04.006>.
 - [29] Z. Bryniarska and S. Puławska-Obiedowska, „Analiza postrzegania jakości transportu publicznego wśród kobiet i mężczyzn w Krakowie”, *Transport Miejski i Regionalny*, nr 5, pp. 13–18, 2020. ISSN 1732-5153
 - [30] R. Buehler, J. Pucher, i O. Dümmler, „Verkehrsverbund: The evolution and spread of fully integrated regional public transport in Germany, Austria, and Switzerland”, *International Journal of Sustainable Transportation*, t. 13, no. 1, pp. 36–50, 2019. ISSN 1556-8318. DOI: <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1431821>.
 - [31] V. Cacchiani and P. Toth, „Nominal and robust train timetabling problems”, *European Journal of Operational Research*, t. 219, no.3, pp. 727–737, 2012. ISSN 0377-2217. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.11.003
 - [32] L. Cai, X. Wang, Z. Luo, and Y. Liang. A hybrid adaptive large neighborhood search and tabu search algorithm for the electric vehicle relocation problem. *Computers & Industrial Engineering*. 167. 2022. 108005. ISSN 0360-8352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108005>
 - [33] R. Calçada and S. Kaewunruen, *Rail Infrastructure Resilience: A Best-Practices Handbook*, Kidlington: Elsevier, 2022, ISBN: 978-0-12-821043-7.
 - [34] T. Campisi, A. Canale, G. Tesoriere, and M. Renčelj, "The newest public transport system applied to turbo roundabouts," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, vol. 173, no. 6, pp. 315–322, 2020. DOI: 10.1680/jensu.19.00054.

- [35] Z. Cao, A. Ceder, D. Li, and S. Zhang, „Optimal synchronization and coordination of actual passenger-rail timetables”, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, t. 23, no.3, pp. 231–249, 2019. DOI:<https://doi.org/10.1080/15472450.2018.1488132>.
- [36] E. Cascetta, *Transportation Systems Analysis: Models and Applications*, 2nd ed., Nowy Jork: Springer, 2009, ISBN: 978-0-387-75856-5. DOI 10.1007/978-0-387-75857-2
- [37] A. Ceder, „Syncing sustainable urban mobility with public transit policy trends based on global data analysis,” *Scientific Reports*, vol. 11, Art. no. 14597, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93741-4>
- [38] A. Ceder, *Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior*, 2nd ed., Londyn: Taylor & Francis, 2016, ISBN: 978-1-4665-6391-9.
- [39] K. Chen, X. Song, and X. Ren, "Modeling social interaction and intention for pedestrian trajectory prediction," *Physica A*, vol. 570, 2021, Art. no. 125790, ISSN 0378-4371, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125790>
- [40] Z. Chen, X. Zhao, and R. Shi, "Walking Speed Modeling on Transfer Passengers in Subway Passages," in *Proceedings of the 2016 International Conference on Civil, Transportation and Environment (ICCTE 2016)*, pp. 639–643. DOI: 10.2991/iccte-16.2016.107.
- [41] Q. Chen, Y. Bai, and N. Zheng, "Simulation and Optimization of Pedestrian Regular Evacuation in Comprehensive Rail Transit Hub—A Case Study in Beijing," *Promet – Traffic & Transportation*, vol. 32, no. 3, pp. 383–397, 2020. DOI: 10.7307/ptt.v32i3.3318.
- [42] X. Chou, L. M. Gambardella, and R. Montemanni, "A Tabu Search Algorithm for the Probabilistic Orienteering Problem," *Computers & Operations Research*, vol. 126, pp. 107–116, 2021. ISSN: 0305-0548.<https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105107>.
- [43] M. S. Chowdhury and S. I.-J. Chien, „Optimizing fare and headway to facilitate timed transfer considering demand elasticity”, *Transportation Planning and Technology*, t. 42, nr 1, s. 56–69, 2019. ISSN 0308-1060. DOI: <https://doi.org/10.1080/03081060.2018.1541282>
- [44] S. Chowdhury, Y. Hadas, V. A. Gonzalez, and B. Schot, "Public transport users' and policy makers' perceptions of integrated public transport systems," *Transport Policy*, vol. 61, pp. 75–83, 2018. ISSN 0967-070X DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.10.001>.
- [45] A. Comi, M. Sassano, and A. Valentini, "Monitoring and controlling real-time bus services: A reinforcement learning procedure for eliminating bus bunching," *Transp. Res. Procedia*, vol. 62, 2022, pp. 302–309, ISSN 2352-1465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.02.038>.
- [46] K. Czekąła and Z. Bryniarska, „Ocena wskaźnikowa wybranych węzłów przesiadkowych publicznego transportu zbiorowego w Krakowie”, *Transport Miejski i Regionalny*, no.6, pp. 5–10, 2017. ISSN: 1732-5153.
- [47] W. Daamen, *Modeling Passenger Flows in Public Transport Facilities*. Ph.D. dissertation, Delft, Netherlands, 2004.

- [48] J. de Dios Ortuzar and L. G. Willumsen, *Modeling Transport*, 4th ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2011. ISBN: 978-0-470-76039-0.
- [49] E. Deakin, *Transportation, Land Use, and Environmental Planning*, Amsterdam: Elsevier, 2020, ISBN: 978-0-12-815167-9.
- [50] Q. Ding, X. Wang, Q. Shan, and X. Zhang, "Modeling and Simulation of Rail Transit Pedestrian Flow," *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, vol. 11, no. 5, pp. 99–106, 2011. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1570-6672\(10\)60145-6](https://doi.org/10.1016/S1570-6672(10)60145-6).
- [51] X. Dou, Y. Yan, X. Guo, and X. Gong, „Time control point strategy coupled with transfer coordination in bus schedule design”, *Journal of Advanced Transportation*, t. 50, no.7, pp. 1336–1351, 2016. DOI: 10.1002/atr.1404.
- [52] A. A. Drabicki, M. F. Islam, and A. Szarata, "Investigating the impact of public transport service disruptions upon passenger travel behaviour—results from Krakow city," *Energies*, vol. 14, no. 16, 2021, Art. no. 4889, DOI: 10.3390/en14164889.
- [53] A. Drabicki, R. Kucharski, O. Cats, i A. Szarata, "Modelling the effects of real-time crowding information in urban public transport systems," *Transportmetrica A: Transport Science*, vol. 17, no. 4, pp. 675–713, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1080/23249935.2020.1809547>
- [54] W. Dźwigoń, "Analysis of transition times of pedestrians and passengers in an interchange node," *Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska*, vol. 92, pp. 31–40, 2016, ISSN 0209-3324. DOI: 10.20858/sjsutst.2016.92.4.
- [55] W. Dźwigoń, "Straty czasu związane z przesiadką na węźle komunikacyjnym," *Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, vol. 17, no. 6, pp. 570–573, 2016.
- [56] H. Elbaz, A. E. Alaoui, and G. Bencheikh, „The synchronization bus timetabling problem, modeling and resolution by the multi-agent approach”, w *Proceedings of the 2018 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)*, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GOL.2018.8378098.
- [57] A. Elbery, Y. Bichiou, H. A. Rakha, J. Du, F. Dvorak, and M. Klenk, "City-Level Agent-Based Multi-modal Modeling of Transportation Networks: Model Development and Preliminary Testing," in *Smart Cities, Green Technologies and Intelligent Transport Systems. SMARTGREENS VEHITS 2018. Communications in Computer and Information Science*, vol. 992, B. Donnellan, C. Klein, M. Helfert, and O. Gusikhin, Eds. Springer, Cham, 2019, pp. 263–285. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-26633-2_14
- [58] M. Eltvéd, P. Lemaitre, and N. C. Petersen, "Estimation of transfer walking time distribution in multimodal public transport systems based on smart card data," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 132, p. 103332, 2021. ISSN 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103332>
- [59] M. Estrada, J. Mension, and M. Salicrú, „Operation of transit corridors served by two routes: Physical design, synchronization, and control strategies,” *Transportation*

Research Part C: Emerging Technologies, vol. 130, Art. no. 103283, 2021, ISSN 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103283>.

- [60]. D. Ettema, M. Friman, and T. Gärling, *Handbook of Sustainable Travel*. Dordrecht, Netherlands: Springer Netherlands, 2013. ISBN: 978-94-007-7034-8. DOI: 10.1007/978-94-007-7034-8
- [61] Y. Feng, Z. Cao, and S. Zhang, „Shuttle Bus Timetable Adjustment in Response to Behind-Schedule Commuter Railway Disturbance”, *Sustainability*, t. 14, nr 24, art. nr 16708, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142416708>
- [62] R. Filippova and N. Buchoud, *A Handbook on Sustainable Urban Mobility and Spatial Planning: Promoting Active Mobility*, Genewa: United Nations Economic Commission for Europe, 2020, eISBN: 978-92-1-004859-0.
- [63] R. Filippova and N. Buchoud, *A Handbook on Sustainable Urban Mobility and Spatial Planning: Promoting Active Mobility*. Geneva, Switzerland: United Nations Publications, 2020. ISBN: 978-92-1-004859-0.
- [64] C. Fleurent, R. Lessard, and L. Séguin, „Transit timetable synchronization: Evaluation and optimization,” in *Proceedings of the 9th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport (CASPT)*, San Diego, CA, USA, 2004.
- [65] P. Fouilhoux, O. J. Ibarra-Rojas, S. Kedad-Sidhoum, and Y. A. Rios-Solis, „Valid inequalities for the synchronization bus timetabling problem,” *European Journal of Operational Research*, vol. 251, no. 2, pp. 442–450, 2016, ISSN 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.006>.
- [66] M. C. Fu, *Handbook of Simulation Optimization*, Nowy Jork: Springer, 2015, ISBN: 978-1-4939-1384-8.
- [67] P. Gałka, K. Grzelec, K. Hebel, E. Judge and O. Wyszomirski, „Urban public transport as a tool of sustainable mobility policy – the example of Poland,” *Ekonomia Międzynarodowa*, nr 31, s. 154–184, 2020. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- [68] A. Garcia-Martinez, R. Cascajo, S. R. Jara-Diaz, S. Chowdhury, and A. Monzon, „Transfer penalties in multimodal public transport networks”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, t. 114, cz. A, s. 52–66, 2018. ISSN 0965-8564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.01.016>.
- [69] R. García-Ródenas, M. L. López-García, J. A. López-Gómez and L. J. Linares, „Passenger Centric Train Timetabling Problem with elastic demand”, *Transportation Research Procedia*, t. 47, pp. 465–472, 2020. ISSN 2352-1465. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.127.
- [70] K. Gkiotsalitis N. Maslekar, „Towards transfer synchronization of regularity-based bus operations with sequential hill-climbing”, *Public Transport*, t. 10, no.2, pp. 335–361, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12469-018-0178-2>
- [71] K. Gkiotsalitis, "Coordinating feeder and collector public transit lines for efficient MaaS services," *EURO Journal on Transportation and Logistics*, vol. 11, art. no. 100057, 2022. DOI: 10.1016/j.ejtl.2021.100057.

- [72] K. Gkiotsalitis, O. A. L. Eikenbroek, and O. Cats, „Robust network-wide bus scheduling with transfer synchronizations,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, no. 11, pp. 4582–4592, Nov. 2020, DOI: 10.1109/TITS.2019.2941847.
- [73] K. Gkiotsalitis, O. Cats, i T. Liu, „A review of public transport transfer synchronisation at the real-time control phase”, *Transport Reviews*, t. 43, nr 1, pp. 88–107, 2023. ISSN 0144-1647. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2022.2035014>.
- [74] K. Gkiotsalitis, *Public Transport Optimization*. Cham: Springer Nature, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-12444-0.
- [75] F. Glover, "Tabu Search—Part I," *ORSA Journal on Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 190–206, 1989. DOI: 10.1287/ijoc.1.3.190.
- [76] F. Glover, M. Laguna, and R. Martí, "Principles of Tabu Search," in *Approximation Algorithms and Metaheuristics*, T. F. Gonzalez, Ed., Chapman & Hall/CRC, 2007, ch. 23, pp. 23-1–23-12.
- [77] P. Gołębiowski, J. Żak, and P. Kisielewski, "The selected problems of public transport organization using mathematical tools on the example of Poland," *Tehnički Glasnik*, vol. 14, no. 3, pp. 375–380, 2020, ISSN 1848-5588. DOI: <https://doi.org/10.31803/tg-20200706182110>
- [78] L. Groenendijk, J. Rezaei, and G. Correia, "Incorporating the travellers' experience value in assessing the quality of transit nodes: A Rotterdam case study," *Case Studies on Transport Policy*, vol. 6, no. 4, pp. 564–576, 2018. ISSN 2213-624X DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2018.07.007>.
- [79] K. Grzelec, K. Hebel, M. Helbin, H. Kołodziejski, i O. Wyszomirski, „Free fare public transport as a determinate on pupils travel behavior and preferences in their daily travels towards sustainable mobility - the case of Gdynia (Poland)”, *Zeszyty Naukowe. Transport - Politechnika Śląska*, Art. nr 121, 2023, doi: 10.20858/sjsutst.2023.121.7.
- [80] Q. Guemri, P. Nduwayo, R. Todosijević, S. Hanafi, and F. Glover, "Probabilistic Tabu Search for the Cross-Docking Assignment Problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 277, no. 3, pp. 875–885, 2019. ISSN: 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.03.030>.
- [81] X. Guo, H. Sun, J. Wu, J. Jin, J. Zhou, i Z. Gao, „Multiperiod-based timetable optimization for metro transit networks”, *Transportation Research Part B: Methodological*, t. 96, s. 46–67, 2017. ISSN 0191-2615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.11.005>.
- [82] M. H. Hà, T. D. Nguyen, T. N. Duy, H. G. Pham, T. Do, and L.-M. Rousseau, „A new constraint programming model and a linear programming-based adaptive large neighborhood search for the vehicle routing problem with synchronization constraints”, *Computers & Operations Research*, t. 124, art. no.105085, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105085>

- [83] S. Hanafi, Y. Wang, F. Glover, W. Yang, and R. Hennig, "Tabu search exploiting local optimality in binary optimization," *European Journal of Operational Research*, vol. 308, no. 3, pp. 1037–1055, 2023. ISSN: 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.01.001>.
- [84] J. Harbering, *Planning a Public Transportation System with a View Towards Passengers' Convenience*. Ph.D. dissertation, Göttingen, Germany, 2015.
- [85] S. Hörl, M. Balac, and K. W. Axhausen, "Pairing discrete mode choice models and agent-based transport simulation with MATSim," presented at the 98th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, 2019. Available: <https://trid.trb.org/view/1572428>
- [86] S. Hörl, M. Balać, and K. W. Axhausen, "A first look at bridging discrete choice modeling and agent-based microsimulation in MATSim," *Procedia Computer Science*, vol. 130, pp. 900–907, 2018. DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.087.
- [87] R. Hrelja, J. Khan, and F. Pettersson, „How to create efficient public transport systems? A systematic review of critical problems and approaches for addressing the problems”, *Transport Policy*, t. 98, pp. 186–196, 2020. ISSN 0967-070X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.10.012>.
- [88] B. Y. Hu, H. Zhao, X. L. Sun, D. X. Wang, and N. Liu, „Synchronous transfer model between bus lines and rural passenger lines”, *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, t. 13, no.2, pp. 73–79, 2019. DOI: 10.1061/JHTRCQ.0000381.
- [89] K. Huang, J. Wu, H. Sun, X. Yang, Z. Gao, and X. Feng, „Timetable synchronization optimization in a subway–bus network”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, t. 608, art. no.128273, 2022. ISSN 0378-4371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.128273>.
- [90] O. J. Ibarra-Rojas and J. C. Muñoz, „Synchronizing different transit lines at common stops considering travel time variability along the day”, *Transportmetrica A: Transport Science*, t. 12, no.8, pp. 751–769, 2016. ISSN 2324-9935. DOI: <https://doi.org/10.1080/23249935.2016.1174964>
- [91] O. J. Ibarra-Rojas, F. López-Irarragorri, and Y. A. Rios-Solis, „Multiperiod Bus Timetabling”, *Transportation Science*, t. 50, no.3, pp. 805–822, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1287/trsc.2014.0578>
- [92] M. Izdebski, *Modelowanie i analiza problemów decyzyjnych przydziału pojazdów do zadań w zagadnieniach transportowych*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2018.
- [93] M. Jacyna and D. Pyza, "Decision-making problems in shaping the sustainable development of the transport system," *Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, vol. 20, no. 6, pp. 61–67, 2019. DOI: <https://doi.org/10.24136/atest.2019.126>
- [94] M. Jacyna, M. Kłodawski, M. Wasiak, and J. Żak, *Planning the development of sustainable transport system with simulation tools*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2019, ISBN 978-83-8156-037-5.

- [95] M. Jacyna, *Modelowanie i ocena systemów transportowych*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009, ISBN: 978-83-7207-808-7.
- [96] M. Jacyna, P. Gołębiowski, M. Krześniak and J. Szkopiński, *Organizacja ruchu kolejowego*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019, ISBN: 978-83-01-20689-5.
- [97] M. Jacyna, *Wspomaganie decyzji w praktyce inżynierskiej: metody, algorytmy, przykłady*, 1st ed. Warszawa: PWN, 2022, ISBN 978-83-0122-255-0.
- [98] R. Janecki, G. Karoń, A. Sobota, R. Żochowska, M. J. Kłos, and P. Soczówka, *Koncepcja Kolei Metropolitalnej dla Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii z wykorzystaniem metod inżynierii systemów*, Katowice, 2018.
- [99] S. Jara-Díaz, A. Monzón, R. Cascajo, and A. Garcia-Martinez, „An international time equivalency of the pure transfer penalty in urban transit trips: Closing the gap”, *Transport Policy*, t. 125, pp. 48–55, 2022. ISSN 0967-070X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.04.019>.
- [100] J. P. Jensen, *Public Transport Optimisation Emphasising Passengers' Travel Behaviour*. Ph.D. dissertation, Kongens Lyngby, Denmark, 2015.
- [101] S. L. Jones Jr., red., *Urban Public Transportation Systems 2013*, Paryż: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2013, ISBN: 978-0-7844-7804-2.
- [102] G. O. Kagho, M. Balać, and K. W. Axhausen, "Agent-Based Models in Transport Planning: Current State, Issues, and Expectations," *Procedia Computer Science*, vol. 170, pp. 726–732, 2020. ISSN 1877-0509. DOI:10.1016/j.procs.2020.03.164
- [103] N. H. Kasehyani *et al.*, "Evaluation of pedestrian walking speed in rail transit terminal," *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 11, no. 9, pp. 26–36, 2019.
- [104] P. Kisielewski and B. Ulman, „Planowanie rozkładów jazdy komunikacji miejskiej w aspekcie punktualności i synchronizacji kursów,” *Autobusy*, vol. 12, pp. 648–653, 2016.
- [105] P. Kisielewski and P. Talarek, "Badania symulacyjne wybranego węzła komunikacyjnego dużego miasta," *Symulacja w Badaniach i Rozwoju*, vol. 8, no. 2, pp. 25–36, 2017. ISSN 2081-6154.
- [106] M. J. Kłos, P. Soczówka, A. Barchański, and J. Górecki, „Analiza czasów podróży zróżnicowanymi środkami transportu na obszarze Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii”, w *Współczesne problemy transportu : Opracowanie monograficzne*. [Dokument elektroniczny], K. Banet, Red., Kraków: Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, 2019, pp. 55–68.
- [107] Z. Kłos-Adamkiewicz and E. Załoga, *Miejski transport zbiorowy: kształtowanie wartości usługi dla pasażera w świetle wyzwań nowej kultury mobilności*, Warszawa: BEL Studio, 2017, ISBN: 978-83-7798-249-5.
- [108] Komisja Europejska, *Miasta przyszłości: Wyzwania, wizje, perspektywy*, Bruksela, 2011, ISBN: 978-92-79-23157-5. DOI: 10.2776/53888

- [109] A. Konak and S. Kulturel-Konak, "Simulation optimization using tabu search: An empirical study," in *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Orlando, FL, USA, 2005, pp. 1–7. DOI: 10.1109/WSC.2005.1574344.
- [110] A. Kostecka et al., *Studium transportowe subregionu centralnego województwa śląskiego. Raport 3a.*, Sopot, Gdańsk, Kraków, 2017.
- [111] K. Kowalska, P. Sobczak, and G. Sierpiński, "Zmiany w rozkładzie jazdy PKP i ich wpływ na mobilność w województwie śląskim," *Technika Transportu Szynowego*, no. 10, pp. 1013–1022, 2013. ISSN: 1232-3829. DOI: 10/2013. 1013-1022 ISSN: 1232-3829
- [112] K. Krawiec and A. Barchański, „Towards zero-emission bus fleets in Poland: the perspective of the organisers of transport”, w *European green deal challenges and solutions for mobility and logistics in cities : 19th European Transport Congress of the EPTS Foundation e.V*, October 7 - 8, 2021, Maribor, Slovenia. Conference proceedings [online], T. Letnik, Red., Maribor: Zum urbanizem, planiranje, projektiranje d.o.o., 2021, s. 97–207. [Online]. Dostępne na: <https://www.fgpa.um.si/wp-content/uploads/2021/12/Conference-Proceedings.pdf>
- [113] V. Krivda, J. Petru, D. Macha, and J. Novak, "Use of Microsimulation Traffic Models as Means for Ensuring Public Transport Sustainability and Accessibility," *Sustainability*, vol. 13, no. 5, pp. 2709-2747, 2021. DOI:<https://doi.org/10.3390/su13052709>
- [114] M. Kruszyna, „Powiązanie funkcjonalności węzła przesiadkowego z planowaniem przewozów w sieci transportowej”, *Transport Miejski i Regionalny*, no. 4, pp. 5–9, 2018. ISSN: 1732-5153.
- [115] M. Kruszyna, „Studia nad integracją głównej stacji kolejowej z siecią tramwajową we Wrocławiu”, *Transport Miejski i Regionalny*, no.9, pp. 2–5, 2008. ISSN: 1732-5153.
- [116] M. Kruszyna, „Znaczenie węzłów przesiadkowych w miejskim transporcie zbiorowym”, *Transport Miejski i Regionalny*, no.1, pp. 11–14, 2012. ISSN: 1732-5153.
- [117] M. Kruszyński, *Metodyka wielokryterialnego wspomagania decyzji w problematyce zarządzania transportem miejskim*. Ph.D. dissertation, Poznań, Poland: Politechnika Poznańska, 2014.
- [118] A. Krych, *Badania kompleksowe, modelowanie i planowanie ruchu. Słownik terminologiczny*, *Annały inżynierii ruchu i planowania transportu*, vol. 2 (XI). Poznań: Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej, 2018.
- [119] R. Kujala, C. Weckström, M. N. Mladenović, and J. Saramäki, „Travel times and transfers in public transport: Comprehensive accessibility analysis based on Pareto-optimal journeys”, *Computers, Environment and Urban Systems*, t. 67, pp. 41–54, 2018. ISSN 0198-9715. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.08.012>.

- [120] Y.-H. Kuo, J. M. Y. Leung, and Y. Yan, „Public transport for smart cities: Recent innovations and future challenges”, *European Journal of Operational Research*, t. 306, no.3, pp. 1001–1026, 2023. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.06.057.
- [121] M. Kutz, *Handbook of Transportation Engineering*, vol. 768. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2004.
- [122] J. Kwaśnikowski and G. Gramza, „Wybrane elementy oceny jakości ruchu tramwajów przez pasażerów w publicznym transporcie zbiorowym,” *Logistyka*, nr 4, pp. 1–12, 2011
- [123] N. A. Kyriakakis, I. Sevastopoulos, M. Marinaki, and Y. Marinakis, "A hybrid Tabu search–Variable neighborhood descent algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem with time windows in humanitarian applications," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 164, p. 107868, 2022. ISSN: 0360-8352. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107868>.
- [124] X. Lai, J. Teng, P. Schonfeld, and L. Ling, „Resilient schedule coordination for a bus transit corridor,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2020, Art. no. 5398298, pp.1-12. 2020, DOI: 10.1155/2020/5398298.
- [125] A. M. Law, *Simulation Modeling and Analysis*, 5. wyd., Nowy Jork: McGraw-Hill Education, 2015, ISBN: 978-0-07-340132-4.
- [126] E. Lee, A. U. Z. Patwary, W. Huang, and H. K. Lo, "Transit interchange discount optimization using an agent-based simulation model," *Procedia Computer Science*, vol. 170, pp. 702–707, 2020. ISSN 1877-0509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.168>.
- [127] A. Lee, N. van Oort, and R. van Nes, „Service reliability in a network context: Impacts of synchronizing schedule in long headway services,” in *Proceedings of the 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC, USA, 2014.
- [128] K. Lee, Y. Jiang, A. Ceder, J. Dauwels, R. Su, and O. A. Nielsen, „Path-oriented synchronized transit scheduling using time-dependent data,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 136, Art. no. 103505, 2022, ISSN 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103505>.
- [129] B. Li, "Measuring travel time reliability and risk: A nonparametric approach," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 130, pp. 152–171, 2019. ISSN: 0191-2615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.10.009>.
- [130] L. Li, H. Zhang, X. Wang, W. Lu, and Z. Mu, „Urban transit coordination using an artificial transportation system”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, t. 12, nr 2, pp. 374–383, 2010. DOI: 10.1109/TITS.2010.2048313.
- [131] Y. Li, X. Yang, J. Wu, H. Sun, X. Guo, and L. Zhou, "Discrete-event simulations for metro train operation under emergencies: A multi-agent based model with parallel computing," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 573, p. 125964, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125964>.
- [132] J. Liang, J. Wu, Y. Qu, H. Yin, X. Qu, and Z. Gao, „Robust bus bridging service design under rail transit system disruptions”, *Transportation Research Part E*:

Logistics and Transportation Review, t. 132, pp. 97–116, 2019. ISSN 1366-5545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.10.008>

- [133] T. Liu and A. Ceder, „Integrated public transport timetable synchronization and vehicle scheduling with demand assignment: A bi-objective bi-level model using deficit function approach,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 117, pp. 935–955, 2018, ISSN 2352-1465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.020>.
- [134] T. Liu and A. Ceder, „Synchronization of public transport timetabling with multiple vehicle types”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, t. 2539, no.1, pp. 84–93, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3141/2539-10>
- [135] L. Liu and H. J. Miller, „Measuring risk of missing transfers in public transit systems using high-resolution schedule and real-time bus location data”, *Urban Studies*, t. 58, no.15, pp. 3140–3156, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1177/0042098020919323>
- [136] X. Liu, M. Huang, H. Qu, and S. Chien, „Minimizing metro transfer waiting time with AFCS data using simulated annealing with parallel computing”, *Journal of Advanced Transportation*, t. 2018, art. nr 4218625, 2018. DOI: 10.1155/2018/4218625.
- [137] R. Liu, S. Li, and L. Yang, „Collaborative optimization for metro train scheduling and train connections combined with passenger flow control strategy”, *Omega*, t. 90, art. no.101990, 2020. ISSN 0305-0483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.10.020>
- [138] M. Liu, W. Zeng, P. Chen, and X. Wu, "A Microscopic Simulation Model for Pedestrian-Pedestrian and Pedestrian-Vehicle Interactions at Crosswalks," *PLoS ONE*, vol. 12, no. 7, p. e0180992, 2017. DOI: 10.1371/journal.pone.0180992.
- [139] D. Lois, A. Monzón and S. Hernández, „Analysis of satisfaction factors at urban transport interchanges: Measuring travellers’ attitudes to information, security and waiting”, *Transport Policy*, t. 67, pp. 49–56, 2018. ISSN 0967-070X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.04.004>.
- [140] D. López and A. Lozano, "Comparing the accuracy of real-time transit arrival estimations with a Kalman Filter motion model in different transit networks models," *Transportation Research Procedia*, vol. 78, 2024, pp. 111–118, ISSN 2352-1465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.02.015>.
- [141] J. López Baeza *et al.*, "Modeling Pedestrian Flows: Agent-Based Simulations of Pedestrian Activity for Land Use Distributions in Urban Developments," *Sustainability*, vol. 13, no. 16, p. 9268, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13169268>
- [142] S. Luke, *Essentials of Metaheuristics*, 2. wyd., Fairfax: George Mason University, 2016, ISBN: 978-1-300-54962-8.
- [143] P. Ma and B. Wang, "The escape of pedestrians with view radius," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 392, no. 1, pp. 215–220, 2013. DOI:

- [144] B. Madej, K. Pruciak and R. Madej, *Publiczny transport miejski: zasady tworzenia rozkładów jazdy w komunikacji lokalnej (miejskiej i aglomeracyjnej)*, Warszawa: Akademia Transportu i Przedsiębiorczości, 2017, ISBN: 978-83-944575-3-2.
- [145] P. Manser, H. Becker, S. Hörl, and K. W. Axhausen, "Designing a large-scale public transport network using agent-based microsimulation," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 137, pp. 1–15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.04.011>.
- [146] S. Marshall and D. Banister, *Land Use and Transport: European Research Towards Integrated Policies*, Londyn: Emerald Publishing, 2008, ISBN: 978-0-0804-4891-6.
- [147] R. Martí, P. M. Pardalos and M. G. C. Resende, red., *Handbook of Heuristics*, Cham: Springer, 2018.. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07124-4_24
- [148] J. Meisssonier and C. Richer, „Rush hour: Why despite flexible working workers resist change?”, *Applied Mobilities*, t. 7, no.3, pp. 267–279, 2021. DOI: 10.1080/23800127.2020.1860512
- [149] Y. Meliani, Y. Hani, S. L. Elhaq, and A. El Mhamedi, "A tabu search based approach for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with three-dimensional loading constraints," *Applied Soft Computing*, vol. 126, p. 109239, 2022. ISSN: 1568-4946. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109239>.
- [150] A. Merkisz-Guranowska, I. Jacyna-Golda, M. Kłodawski, and R. Jachimowski, *Kształtowanie systemów w wybranych obszarach transportu i logistyki: praca zbiorowa*, M. Jacyna, Ed. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2014.
- [151] M. D. Meyer, *Transportation Planning Handbook*, 4th ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2016. ISBN: 978-111-876239-4.
- [152] Z. Michalewicz and D. B. Fogel, *Jak to rozwiązać, czyli nowoczesna heurystyka*, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2006, ISBN: 83-204-3108-5.
- [153] W. Miechowicz, M. Kiciński, I. Miechowicz, and A. Merkisz-Guranowska, "The Attractiveness of Regional Transport as a Direction for Improving Transport Energy Efficiency," *Energies*, vol. 17, no. 19, 2024, Art. no. 4844, ISSN 1996-1073. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en17194844>
- [154] A. Mikulska and W. Starowicz, "Analiza preferencji i satysfakcji pasażerów transportu publicznego w Kielcach," *Transport Miejski i Regionalny*, no. 3, pp. 23–29, 2015, ISSN 1732-5153.
- [155] B. Milewska, M. Jacyna, and I. Semenov, "Zakłócenia w transporcie drogowym spowodowane niepożądanymi zdarzeniami okolicznościowymi i niespodziewanymi," in *Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference Logistics Systems - Theory and Practice*, M. Siergiejczyk, J. Żak, and K. Lewczuk, Eds. 2024, pp. 133–149.
- [156] R. Nair, C. Coffey, F. Pinelli, and F. Calabrese, "Large-Scale Transit Schedule Coordination Based on Journey Planner Requests," *Transportation Research Record*, vol. 2351, no. 1, pp. 65–75, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3141/2351-08>

- [157] F. Nasirian and M. Ranjbar, „Public transport fleet scheduling for minimizing total transfer waiting time”, *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, t. 28, no.2, s. 113–128, 2017. DOI: 10.22068/ijiepr.28.2.113.
- [158] V. Naumov, „Genetic-based algorithm of the public transport lines synchronization in a transfer node”, *Transportation Research Procedia*, t. 47, pp. 315–322, 2020. ISSN 2352-1465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.104>.
- [159] S. Nesmachnow, J. Muraña, and C. Risso, „Exact and Metaheuristic Approach for Bus Timetable Synchronization to Maximize Transfers”, w *Smart Cities. ICSC-CITIES 2020*, S. Nesmachnowi L. Hernández Callejo, red., seria Communications in Computer and Information Science, t. 1359, Cham: Springer, 2021, pp. 183–198. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69136-3_13
- [160] A. Nickkar, Y.-J. Lee, and M. Meskar, „Developing an optimal algorithm for demand responsive feeder transit service accommodating temporary stops”, *Journal of Public Transportation*, t. 24, art. no.100021, 2022. ISSN 1077-291X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpubtr.2022.100021>
- [161] O. A. Nielsen, M. Eltvéd, M. K. Anderson, and C. G. Prato, „Relevance of detailed transfer attributes in large-scale multimodal route choice models for metropolitan public transport passengers”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, t. 147, pp. 76–92, 2021. ISSN 0965-8564 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.02.010>.
- [162] H. Niu, X. Tian, and X. Zhou, „Demand-driven train schedule synchronization for high-speed rail lines”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, t. 16, no.5, pp. 2642–2652, 2015. DOI: 10.1109/TITS.2015.2423661.
- [163] O. A. Nnene, J. W. Joubert, and M. H. P. Zuidgeest, "An agent-based evaluation of transit network design," *Procedia Computer Science*, vol. 151, pp. 757–762, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.102>.
- [164] O. A. Nnene, J. W. Joubert, and M. H. P. Zuidgeest, "Transit network design with meta-heuristic algorithms and agent-based simulation," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 3, pp. 13–18, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.06.003>.
- [165] K. Nosal and W. Starowicz, "Evaluation of influence of mobility management instruments implemented in separated areas of the city on the changes in modal split," *Archives of Transport*, vol. 35, no. 3, pp. 41–52, 2015, DOI: 10.5604/08669546.1185188.
- [166] S. Oleksiuk, "Podsystem zarządzania transportem publicznym w ramach Inteligentnego Systemu Transportowego (ITS) w Bielsku-Białej," *Transport Miejski i Regionalny*, no 11-12, s. 15–26, 2019.
- [167] I. I. Otković, A. Deluka-Tibljaš, and S. Šurdonja, "Validation of the Calibration Methodology of the Micro-Simulation Traffic Model," *Transportation Research Procedia*, vol. 45, pp. 684–691, 2020. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.054.
- [168] J. Oziomek and A. Rogowski, „Zagadnienie synchronizacji linii komunikacyjnych w transporcie publicznym”, *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, t. 17, no.1–2, pp. 44–47, 2016.

- [169] J. Parbo, O. A. Nielsen and C. G. Prato, „Passenger Perspectives in Railway Timetabling: A Literature Review”, *Transport Reviews*, t. 36, no.4, pp. 500–526, 2016. ISSN 1464-5327. DOI:10.1080/01441647.2015.1113574
- [170] J. Parbo, O. A. Nielsen, and C. G. Prato, „User perspectives in public transport timetable optimisation”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, t. 48, pp. 269–284, 2014. ISSN 0968-090X DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.09.005>.
- [171] F. Pinna and R. Murrau, "Age factor and pedestrian speed on sidewalks," *Sustainability*, vol. 10, 2018, Art. no. 4084, DOI:10.3390/su10114084
- [172] M. Pitsiava-Latinopoulou and P. Iordanopoulos, "Intermodal Passengers Terminals: Design standards for better level of service," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 48, pp. 3297–3306, 2012. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.06.1295
- [173] V. Poorjafari, W. L. Yue, and N. Holyoak, "Application of simulated annealing in transit schedule synchronization," *Int. J. Model. Optim.*, vol. 4, no. 6, pp. 476–482, 2014, DOI: 10.7763/IJMO.2014.V4.416.
- [174] D. Pyza, M. Ziembicki, and M. Buczkowska, "The quality of transport services in public transport in the aspect of their implementation by electric buses," in *Transport Means 2019. Sustainability: Research and Solutions. Proceedings of 23rd International Scientific Conference*, R. Kersys, Ed. Kaunas: Publishing House „Technologija”, 2019, pp. 936–940.
- [175] D. Pyza, *Modelowanie systemów przewozowych w zastosowaniu do projektowania obsługi transportowej podmiotów gospodarczych*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW, 2012, *Prace Naukowe, Transport*, vol. 85, ISSN 1230-9265.
- [176] D. Pyza, *Systemy przewozowe: problemy obsługi, potencjał i jego utrzymanie*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2019.
- [177] S. Rahdar, R. Ghanbari, and K. Ghorbani-Moghadam, "Tabu search and variable neighborhood search algorithms for solving interval bus terminal location problem," *Applied Soft Computing*, vol. 116, p. 108367, 2022. ISSN: 1568-4946. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108367>
- [178] B. Render, R. M. Stair, M. E. Hanna and T. S. Hale, *Quantitative Analysis for Management*, 13. wyd., Harlow: Pearson Education Limited, 2018, ISBN: 978-1-292-21765-9.
- [179] P. P. Repoussis, D. C. Paraskevopoulos, C. D. Tarantilis, and G. Ioannou, "A reactive greedy randomized variable neighborhood tabu search for the vehicle routing problem with time windows," in *Hybrid Metaheuristics. HM 2006. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4030, Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. https://doi.org/10.1007/11890584_10
- [180] M. Rieser, "Modeling Public Transport with MATSim," in *Multi-Agent Transport Simulation MATSim*, A. Horni, K. Nagel, and K. W. Axhausen, Eds. London, UK: Ubiquity Press, 2016, pp. 105–110. DOI: 10.5334/baw.
- [181] J. Rincón-Novoa, S. Rojas-Berrio and Ó. Robayo-Pinzón, „Citizen experience in public transport: A systematic review and future research agenda”, *International*

- Journal of Consumer Studies*, t. 46, no.2, pp. 540–557, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijcs.12699>
- [182] T. Robenek, S. S. Azadeh, Y. Maknoon, and M. Bierlaire, „Hybrid cyclicity: Combining the benefits of cyclic and non-cyclic timetables,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 75, pp. 228–253, 2017, ISSN 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.12.015>.
 - [183] T. Robenek, S. S. Azadeh, Y. Maknoon, M. de Lapparent, and M. Bierlaire, „Train timetable design under elastic passenger demand”, *Transportation Research Part B: Methodological*, t. 111, pp. 19–38, 2018. DOI: [10.1016/j.trb.2018.03.002](https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.03.002).
 - [184] „Rozkład jazdy PKP,” PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., dostępne na: <https://rozklad-pkp.pl/>. [Data dostępu: 7 mar. 2025].
 - [185] A. Rudnicki, *Jakość komunikacji miejskiej*, Kraków: Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji (SITK), 1999.
 - [186] M. Samà, A. D’Ariano, F. Corman, and D. Pacciarelli, „A variable neighbourhood search for fast train scheduling and routing during disturbed railway traffic situations”, *Computers & Operations Research*, t. 78, pp. 480–499, 2017. ISSN 0305-0548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.02.008>.
 - [187] K. Sangeeth and A. Lokre, "Factors influencing pedestrian speed in Level of Service (LOS) of pedestrian facilities," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 3, p. 100066, 2019. ISSN 2590-1982. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trip.2019.100066>
 - [188] P. Sawicki and H. Sawicka, "Zastosowanie metod symulacji i stochastycznego wspomaganie decyzji do usprawnienia procesu logistycznego," in *Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej*, A. Lichota and K. Majewska, Eds., vol. T. Kraków: Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, 2013, pp. 309–324, ISBN 978-83-7464-646-8.
 - [189] P. Sawicki and S. Fierek, "The impact of long-term travel demand changes on mixed decision problems of mass transit lines construction and vehicles' depots location," *Technical Transactions*, no. 6, pp. 103–112, 2018, ISSN 0011-4561. DOI: [10.4467/2353737XCT.18.090.8695](https://doi.org/10.4467/2353737XCT.18.090.8695)
 - [190] P. Sawicki, *Wielokryterialna optymalizacja procesów w transporcie*. Radom: Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowego Instytutu Badawczego, 2013, ISBN 978-83-7789-222-0. P. Sawicki, *Wielokryterialna optymalizacja procesów w transporcie*. Radom: Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowego Instytutu Badawczego, 2013, ISBN 978-83-7789-222-0.
 - [191] P. L. Schiller and J. Kenworthy, *An Introduction to Sustainable Transportation: Policy, Planning and Implementation*. London, UK: Routledge, 2017. ISBN: 978-1-84407-665-9.
 - [192] A. Schöbel, *Optimization in Public Transportation: Stop Location, Delay Management and Tariff Zone Design in a Public Transportation Network*, Nowy Jork: Springer, 2007.

- [193] M. Schröder and I. Solchenbach, „Optimization of transfer quality in regional public transit”, *Berichte des Fraunhofer ITWM*, no.84, pp. 1–16, 2006. ISSN 1434-9973
- [194] M. Shahmanzari and D. Aksen, "A Multi-Start Granular Skewed Variable Neighborhood Tabu Search for the Roaming Salesman Problem," *Applied Soft Computing*, vol. 102, p. 107024, 2021. ISSN: 1568-4946. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.107024>.
- [195] P. Shang, R. Li, Z. Liu, K. Xian, and J. Guo, „Timetable Synchronization and Optimization Considering Time-Dependent Passenger Demand in an Urban Subway Network”, *Transportation Research Record*, t. 2672, no.8, pp. 243–254, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198118772958>
- [196] Z. Shang, S. Zhao, J. K. Hao, X. Yang, and F. Ma, "Multiple phase tabu search for bipartite boolean quadratic programming with partitioned variables," *Computers & Operations Research*, vol. 102, pp. 141–149, 2019. ISSN: 0305-0548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.10.009>.
- [197] M. S. Sharifi, *Analysis and Modeling of Pedestrian Walking Behaviors Involving Individuals with Disabilities*. Ph.D. dissertation, Logan, UT, USA, 2016. <https://digitalcommons.usu.edu/etd/4959>
- [198] J. K. Sharma, *Operations Research: Theory and Applications*, 6. wyd., New Delhi: Laxmi Publications Pvt. Ltd., 2017, ISBN: 978-93-85935-14-5.
- [199] Y. Shen i S. Wang, „Maximal Synchronization of Feeder Buses to Metro Using Particle Swarm Optimization”, w *Bio-Inspired Computing – Theories and Applications. BIC-TA 2015*, M. Gong, L. Pan, T. Song, K. Tang, and X. Zhang, red., seria Communications in Computer and Information Science, t. 562, Berlin, Heidelberg: Springer, 2015, pp. 350–361. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-49014-3_32
- [200] A. Silva, L. C. Coelho, and M. Darvish, "Quadratic assignment problem variants: A survey and an effective parallel memetic iterated tabu search," *European Journal of Operational Research*, vol. 292, no. 3, pp. 1066–1084, 2021. ISSN: 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.11.035>.
- [201] Y. I. Silva-Soto and O. J. Ibarra-Rojas, „Timetabling with flexible frequencies to synchronise groups of bus lines at common stops”, *Transportmetrica A: Transport Science*, t. 17, no.4, pp. 978–1001, 2021. DOI: 10.1080/23249935.2020.1822952
- [202] P. Soczówka, R. Żochowska, and A. Barchański, „Nodes in the railway network as potential places of integration of public transport”, w *Nodes in Transport Networks - Research, Data Analysis and Modelling : 16th Scientific and Technical Conference Transport Systems. Theory and Practice 2019, TSTP 2019*, Katowice, Poland, September 16-18, 2019. Selected Papers, E. Macioszek, N. Kang, i G. Sierpiński, Red., w *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Springer, 2020, pp. 63–81. doi: 10.1007/978-3-030-39109-6_6.
- [203] K. Solecka, *Wielokryterialna ocena wariantów zintegrowanego systemu miejskiego transportu publicznego*. Ph.D. dissertation, Kraków, Poland: Politechnika Krakowska, 2013.

- [204] R. Sroka, *Problem synchronizacji interwałowej w miejskiej komunikacji publicznej*. Ph.D. dissertation, Wrocław, Poland: Politechnika Wrocławska, 2005.
- [205] W. Starowicz, "Zarządzanie mobilnością wyzwaniem polskich miast," *Transport Miejski i Regionalny*, no. 1, pp. 42–47, 2011, ISSN 1732-5153.
- [206] W. Starowicz, *Jakość przewozów w miejskim transporcie zbiorowym: podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych*. Kraków: Wydawnictwo PK, 2007, ISBN 978-83-7242-427-3. W. Starowicz, *Jakość przewozów w miejskim transporcie zbiorowym: podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych*. Kraków: Wydawnictwo PK, 2007, ISBN 978-83-7242-427-3.
- [207] Y. Sun and R. Xu, „Rail transit travel time reliability and estimation of passenger route choice behavior: Analysis using automatic fare collection data”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, t. 2275, pp. 58–67, 2012. DOI: 10.3141/2275-07
- [208] H. Suzuki, R. Cervero, and K. Iuchi, *Transforming Cities with Transit: Transit and Land-Use Integration for Sustainable Urban Development*. Washington, DC, USA: International Bank for Reconstruction and Development, 2013. ISBN: 978-0-8213-9750-3. DOI: 10.1596/978-0-8213-9745-9
- [209] A. Szarata, K. Nosal, U. Duda-Wiertel, i Ł. Franek, "The impact of the car restrictions implemented in the city centre on the public space quality," *Transportation Research Procedia*, vol. 27, pp. 752–759, 2017, ISSN 2352-1465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.018>.
- [210] A. Szarata, *Zintegrowane węzły przesiadkowe w procesie kształtowania zrównoważonej mobilności w miastach*. Kraków: Wydawnictwo Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Oddział, 2019, ISBN 978-83-6349-211-3.
- [211] E. Szczepański, *Wielokryterialne wspomaganie decyzji w dystrybucji ładunków w miastach z uwzględnieniem danych losowych*. Ph.D. dissertation, Warszawa, Poland: Politechnika Warszawska, 2016.
- [212] E. Szczepański, R. Jachimowski, and T. Rudyk, "Simulation studies of fleet vehicle selection in terms of pollutant emissions," *Civil and Environmental Engineering Reports*, vol. 34, no. 1, pp. 1–12, 2024, doi: 10.19206/CE-169802.
- [213] C. Szymula and N. Bešinović, "Passenger-centered vulnerability assessment of railway networks," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 136, pp. 30–61, 2020. ISSN 0191-2615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.03.008>
- [214] B. Tahmasbi and H. Haghshenas, „Public transport accessibility measure based on weighted door-to-door travel time”, *Computers, Environment and Urban Systems*, t. 76, pp. 163–177, 2019. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2019.04.003.
- [215] M. Takamatsu and A. Taguchi, „Bus Timetable Design to Ensure Smooth Transfers in Areas with Low-Frequency Public Transportation Services”, *Transportation Science*, t. 54, no.5, pp. 1238–1250, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1287/trsc.2019.0918>
- [216] D. Teodorović and M. Janić, *Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling*, 2nd ed., Oksford: Elsevier, 2022, ISBN: 978-0-323-90813-9.

- [217] D. Teodorović and P. Lučić, „Schedule synchronization in public transit using the fuzzy ant system”, *Transportation Planning and Technology*, t. 28, no.1, s. 47–76, 2005. DOI: 10.1080/0308106052000340387
- [218] T. Thongwan, A. Kangrang, and H. Prasanchum, "Multi-objective future rule curves using conditional tabu search algorithm and conditional genetic algorithm for reservoir operation," *Heliyon*, vol. 5, no. 9, p. e02401, 2019. ISSN: 2405-8440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02401>.
- [219] X. Tian and H. Niu, „A bi-objective model with sequential search algorithm for optimizing network-wide train timetables”, *Computers & Industrial Engineering*, t. 127, pp. 1259–1272, 2019. ISSN 0360-8352 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.012>.
- [220] X. Tian and H. Niu, „A dynamic programming approach to synchronize train timetables”, *Advances in Mechanical Engineering*, t. 9, no.6, pp. 1–11, 2017. DOI: 10.1177/1687814017712364
- [221] R. Tolley, *Sustainable Transport: Planning for Walking and Cycling in Urban Environments*, Cambridge: Woodhead Publishing, 2003, ISBN: 0-8493-1783-5.
- [222] A. Tønnesen, M. Knapskog, T. P. Uteng, and K. V. Øksenholt, „The integration of active travel and public transport in Norwegian policy packages: A study on ‘access, egress and transfer’ and their positioning in two multilevel contractual agreements”, *Research in Transportation Business & Management*, t. 40, 2021. ISSN 2210-5395 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100546>.
- [223] C. W. Tsang, T. K. Ho, and K. H. Ip, „Train Schedule Coordination at an Interchange Station Through Agent Negotiation”, *Transportation Science*, t. 45, no.2, pp. 258–270, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1287/trsc.1100.0344>
- [224] M. S. Umam, M. Mustafid, and S. Suryono, "A hybrid genetic algorithm and tabu search for minimizing makespan in flow shop scheduling problem," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 9, pp. 7459–7467, 2022. ISSN: 1319-1578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.08.025>.
- [225] *Ustawa z dnia 16 grudnia 2010 r. o publicznym transporcie zbiorowym*, Dz.U. 2011, nr 5, poz. 13 ze zm.
- [226] M. van Hagen, *Waiting Experience at Train Stations*. Ph.D. dissertation, Delft, Netherlands, 2011. ISBN: 978-90-5972-506-5.
- [227] E. Vitale Brovarone and G. Cotella, „Improving Rural Accessibility: A Multilayer Approach”, *Sustainability*, t. 12, nr 7, pp. 2876, 2020. DOI: [doi:10.3390/su12072876](https://doi.org/10.3390/su12072876)
- [228] Y. Wang, A. D’Ariano, J. Yin, L. Meng, T. Tang, and B. Ning, „Passenger demand oriented train scheduling and rolling stock circulation planning for an urban rail transit line,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 118, pp. 193–227, 2018. . ISSN 0191-2615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.10.006>.
- [229] Y. Wang, D. Li, and Z. Cao, „Integrated timetable synchronization optimization with capacity constraint under time-dependent demand for a rail transit network”, *Computers & Industrial Engineering*, t. 142, art. no.106374, 2020. ISSN 0360-8352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106374>.

- [230] X. Wang, E. Yao, and S. Liu, "Simulation of Metro Congestion Propagation Based on Route Choice Behaviors Under Emergency-Caused Delays," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 20, pp. 4210–4226, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9204210>
- [231] Z. Wang, F. Chen, and Z. Shi, "Agent-Based Realization of Social Force Model and Simulation of Pedestrians in Subway Passageway," *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, vol. 41, no. 4, pp. 90–95, 2013. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2013.04.015.
- [232] Y. Wang, T. Tang, B. Ning, and L. Meng, „Integrated optimization of regular train schedule and train circulation plan for urban rail transit lines,” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 105, pp. 83–104, 2017, ISSN 1366-5545. DOI <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.06.001>.
- [233] J. Wang, Z. Yuan, Z. Cao, and Z. Lu, „Optimal bus bridging schedule with transfer passenger demand during disruptions of urban rail transit,” *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, vol. 147, no. 10, p. 04021071, Oct. 2021, DOI: 10.1061/JTEPBS.000056}.
- [234] T. R. Waśniewski, J. Żak, K. Jóźwiak, and A. Świdorski, "Problematyka planowania transportu ładunków niebezpiecznych z wykorzystaniem narzędzi symulacyjnych," *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, z. 124, pp. 181–191, 2019. ISSN: 2956-9257
- [235] J. Wei, K. Long, J. Gu, Q. Ju, and P. Zhu, „Optimizing Bus Line Based on Metro-Bus Integration”, *Sustainability*, t. 12, no. 4, pp..1493, 2020. DOI:10.3390/su12041493
- [236] Wielkopolskie Biuro Planowania Przestrzennego oraz Urząd Marszałkowski Województwa Wielkopolskiego, *Plan zagospodarowania przestrzennego Poznańskiego Obszaru Metropolitalnego*, Poznań, 2017.
- [237] Y. Wu, H. Yang, J. Tang, and Y. Yu, „Multi-objective re-synchronizing of bus timetable: Model, complexity and solution”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, t. 67, pp. 149–168, 2016. ISSN 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.02.007>.
- [238] Y. Wu, J. Tang, Y. Yu, and Z. Pan, „A stochastic optimization model for transit network timetable design to mitigate the randomness of traveling time by adding slack time,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 52, pp. 15–31, 2015, ISSN 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.12.012>.
- [239] W. Wu, R. Liu, and W. Jin, „Designing robust schedule coordination scheme for transit networks with safety control margins”, *Transportation Research Part B: Methodological*, t. 93, pp. 495–519, 2016. ISSN 0191-2615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.07.009>.
- [240] W. Wu, R. Liu, W. Jin, and C. Ma, „Stochastic bus schedule coordination considering demand assignment and rerouting of passengers,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 121, pp. 275–303, 2019, ISSN 0191-2615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.01.010>.

- [241] P. Y. Wu, R. Y. Guo, L. Ma, B. Chen, J. Wu, and Q. Zhao, "Simulation of pedestrian route choice with local view: A potential field approach," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 92, 2021, pp. 687–709, ISSN 0307-904X DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.11.036>
- [242] Y. Wu, Y. Zhu, and T. Cao, „Mathematical analysis and an exact solution combined with preprocessing method for resynchronizing of bus timetable problem”, *Mathematical Problems in Engineering*, t. 2018, art. no.9621908, 2018. DOI: 10.1155/2018/9621908.
- [243] O. Wyszomirski, red., *Transport miejski: Ekonomika i organizacja*, Gdańsk: Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, 2010, ISBN: 978-83-7326-507-3.
- [244] M. Xiao, S. Chien, and D. Hu, „Optimizing coordinated transfer with probabilistic vehicle arrivals and passengers' walking time”, *Journal of Advanced Transportation*, t. 50, no.8, pp. 2306–2322, 2016. ISSN: 2042-3195. DOI: 10.1002/atr.1460
- [245] J. Xiong, Z. He, W. Guan, and B. Ran, „Optimal timetable development for community shuttle network with metro stations”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, t. 60, pp. 540–565, 2015. ISSN 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.10.007>.
- [246] Y. Xue *et al.*, "Simulation Analysis of Bus Passenger Boarding and Alighting Behavior Based on Cellular Automata," *Sustainability*, vol. 14, no. 4, p. 2429, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14042429>
- [247] D. Yao, L. Xu and J. Li, „Transit Service Level, Traffic Demand Management and Public Transit Attraction: A Dual Test Based on Objective Choice and Subjective Will”, *Journal of Systems & Management*, t. 29, no.1, pp. 31–40, 2020. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2542.2020.01.004
- [248] M. Yap and O. Cats, „Taking the path less travelled: Valuation of denied boarding in crowded public transport systems”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, t. 147, pp. 1–13, 2021. ISSN 0965-8564 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.02.007>.
- [249] M. Yap, D. Luo, O. Cats, N. van Oort, and S. Hoogendoorn, „Where shall we sync? Clustering passenger flows to identify urban public transport hubs and their key synchronization priorities”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, t. 98, pp. 433–448, 2019. ISSN 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.12.013>.
- [250] M. Yap, N. van Oort, R. van Nes, and B. van Arem, "Identification and quantification of link vulnerability in multi-level public transport networks: A passengerperspective," *Transportation*, vol. 48, pp. 1161–1180, 2018. ISSN: 1572-9435. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-018-9892-5>
- [251] M. Yap, *Robust Public Transport from a Passenger Perspective: A Study to Evaluate and Improve the Robustness of Multi-Level Public Transport Networks*. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2014.
- [252] J. Yin, A. D'Ariano, Y. Wang, L. Yang, and T. Tang, „Timetable coordination in a rail transit network with time-dependent passenger demand”, *European Journal of*

- Operational Research*, t. 295, no.1, pp. 183–202, 2021. ISSN 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.02.059>.
- [253] C. Yu, N. Lahrichi, and A. Matta, "Optimal budget allocation policy for tabu search in stochastic simulation optimization," *Computers & Operations Research*, vol. 150, p. 106046, 2023. ISSN: 0305-0548. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106046>.
 - [254] H. Yue, J. Zhang, W. Chen, X. Wu, X. Zhang, and C. Shao, "Simulation of the influence of spatial obstacles on evacuation pedestrian flow in walking facilities," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 571, p. 125844, 2021. ISSN 0378-4371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125844>
 - [255] Zarząd Transportu Metropolitalnego, "Oficjalna strona Zarządu Transportu Metropolitalnego," dostępne na: <https://rj.metropoliaztm.pl/>, dostęp: 04 kwietnia 2019.
 - [256] Y. Zeng, R. Ye, W. Song, S. Luo, F. Meng, and G. Vizzari, "Entropy analysis of the laminar movement in bidirectional pedestrian flow," *Physica A*, vol. 566, 2021, Art. no. 125655, ISSN 0378-4371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125655>
 - [257] D. Zhang and X. Wang, „Schedule optimization to improve trunk-local bus transfer efficiency in small conurbations: A case study of New York’s capital region,” *Journal of Central South University*, vol. 23, no. 7, pp. 1817–1822, Jul. 2016, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-016-3235-5>
 - [258] S. Zhang, A. A. Ceder, and Z. Cao, „Integrated optimization for feeder bus timetabling and procurement scheme with consideration of environmental impact”, *Computers & Industrial Engineering*, t. 145, art. no.106501, 2020. ISSN 0360-8352 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106501>
 - [259] H. Zhang, F. Liu, Y. Zhou, and Z. Zhang, "A hybrid method integrating an elite genetic algorithm with tabu search for the quadratic assignment problem," *Information Sciences*, vol. 539, pp. 347–374, 2020. ISSN: 0020-0255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.06.036>.
 - [260] S. Zhang, J. Zhang, M. Chraïbi, and W. Song, "A speed-based model for crowd simulation considering walking preferences," *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.*, vol. 95, 2021, Art. no. 105624, ISSN 1007-5704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2020.105624>
 - [261] C. Zhang, M. Wang, J. Dong, W. Lu, Y. Liu, A. Ni, and X. Yu, „Factors and mechanism affecting the attractiveness of public transport: Macroscopic and microscopic perspectives”, *Journal of Advanced Transportation*, t. 2022, art. no. 5048678, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/5048678>
 - [262] L. Zhang, M. Xu, and S. Wang, "Mitigating vulnerability of a multimodal public transit system for sustainable megacities: a real-time operational control method," *Sustainable Cities and Society*, vol. 101, 2024, Art. no. 105142, ISSN 2210-6707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105142>.
 - [263] S. Zhao, H. Yang, and Y. Wu, „An integrated approach of train scheduling and rolling stock circulation with skip-stopping pattern for urban rail transit lines,”

Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 128, Art. no. 103170, 2021, ISSN 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103170>

- [264] L. Zhou, X. Yang, H. Wang, J. Wu, L. Chen, H. Yin, and Y. Qu, „A robust train timetable optimization approach for reducing the number of waiting passengers in metro systems”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, t. 558, art. no.124927, 2020. ISSN 0378-4371. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124927>
- [265] R. Zhou, Y. Cui, Y. Wang, and J. Jiang, "A modified social force model with different categories of pedestrians for subway station evacuation," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 110, p. 103837, 2021. ISSN 0886-7798.DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103837>.
- [266] Y. Zhu, H. N. Koutsopoulos, and N. H. Wilson, "A probabilistic passenger-to-train assignment model based on automated data," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 104, pp. 1–21, 2017. DOI: 10.1016/j.trb.2017.06.002.
- [267] Y. Zhu, *Passenger-Oriented Timetable Rescheduling in Railway Disruption Management*. Ph.D. dissertation, TRAIL Research School, Delft, Netherlands, 2019. ISBN: 978-90-5584-259-9.<https://doi.org/10.4233/uuid:10f84fa1-f5a2-4c3b-b40b-914d8858f536>
- [268] L. Zou, Z. Wang, and R. Guo, "Real-time prediction of transit origin–destination flows during underground incidents," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 163, 2024, Art. no. 104622, ISSN 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104622>.
- [269] R. Żochowska, M. J. Kłos, P. Soczówka, and M. Pilch, "Assessment of Accessibility of Public Transport by Using Temporal and Spatial Analysis," *Sustainability*, vol. 14, no. 23, p. 16127, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142316127>

Spis rysunków

Rys. 1.1.	Składowe czasu podróży ze zmianą środka transportu w węźle przesiadkowym.	14
Rys. 1.2.	Rozpatrywane w dysertacji etapy procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym z transportu kolejowego na komunikację miejską	15
Rys. 1.3.	Pojęcia z zakresu planowania podróży przyjęte w pracy do opisu procesu zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym.....	18
Rys. 2.1.	Zestawienie kategorii i kryteriów oceny atrakcyjności węzłów przesiadkowych	36
Rys. 2.2.	Klasyfikacja opóźnień w transporcie zbiorowym	38
Rys. 2.3.	Ogólny schemat procedury przeszukiwania lokalnego	43
Rys. 2.4.	Przykład analizy zbioru rozwiązań dopuszczalnych z zastosowaniem różnych metod przeszukiwania lokalnego	44
Rys. 2.5.	Algorytm przeprowadzania powtarzalnych eksperymentów z zastosowaniem techniki symulacji Monte Carlo	46
Rys. 2.6.	Etapy budowy modelu symulacyjnego.....	47
Rys. 2.7.	Przykłady realizacji procesu zmiany środka transportu z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy.....	51
Rys. 2.8.	Klasyfikacja wybranych metod stosowanych w synchronizacji rozkładów jazdy	62
Rys. 3.1.	Model węzła przesiadkowego i jego otoczenia dla potrzeb odwzorowania procesu zmiany środka transportu	72
Rys. 3.2.	Przykład odwzorowania cech układu tras linii komunikacyjnych istotnych w proponowanej metodzie synchronizacji	80
Rys. 3.3.	Przykład opisu rozkładu jazdy dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy z zastosowaniem parametrów przyjętych w pracy	88
Rys. 3.4.	Przykład obszaru oddziaływania węzła przesiadkowego.....	89
Rys. 3.5.	Graficzna reprezentacja zależności między momentami odjazdów autobusów w kursach dla pięciu linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy a obsługą połączenia węzła z segmentem dla przykładowej sytuacji	91
Rys. 3.6.	Charakterystyka procesu zmiany środka transportu w ujęciu stochastycznym dla pojedynczego pasażera dla przykładowej sytuacji opisującej wyniki badań własnych.....	96
Rys. 4.1.	Przykład zastosowania przyjętego w pracy sposobu doboru rozkładu jazdy dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy na podstawie wektora war ze wskazaniem funkcji zależnych od zmiennej decyzyjnej.....	102
Rys. 4.2.	Przykład doboru wartości miary $hmja, o, o', war$ spełniających zdefiniowane w pracy ograniczenia dla różnych sposobów łączenia taktów	108
Rys. 4.3.	Przykład opisu procesu zmiany środka transportu w węźle jako zadanie optymalizacyjne: a) geometria węzła i segmenty; b) zgłoszenia na stanowisku przystankowym pasażerów przesiadających się; c) obsługa węzła przez trzy linie komunikacyjne	116
Rys. 5.1.	Schemat metody synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym w aspekcie czasu podróży pasażerów zmieniających środek transportu z pociągu na autobus komunikacji miejskiej	119
Rys. 5.2.	Rezultaty etapów metody ze wskazaniem zakresu zastosowania wyników częściowych w dalszych działaniach w metodzie synchronizacji rozkładów jazdy	122
Rys. 5.3.	Schemat ogólny sposobu przygotowania danych wejściowych do proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy	123

Rys. 5.4.	Schemat procedury selekcji odchylek od rozkładu jazdy rejestrowanych na peronach i stanowiskach przystankowych wchodzących w skład węzła	124
Rys. 5.5.	Schemat ogólny algorytmu doboru stałego interwału w kursach dla linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w okresach hja, o	126
Rys. 5.6.	Schemat sposobu odwzorowania w proponowanej metodzie oddziaływania czynników o charakterze stochastycznym na funkcjonowanie węzła przesiadkowego	128
Rys. 5.7.	Schemat budowy bieżącego rozwiązania war * 3 w etapie 3 proponowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy	130
Rys. 5.8.	Schemat zastosowania w pracy metody przeszukiwania lokalnego w synchronizacji rozkładów jazdy w etapie 4	132
Rys. 5.9.	Schemat przeszukiwania rozwiązań sąsiednich obejmującego modyfikację rozkładów jazdy dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy realizowanego w etapie 4	134
Rys. 5.10.	Zbiór atrybutów charakteryzujących węzły przesiadkowe wraz ze stanami przypisanymi w atrybutach i będących podstawą definicji przypadków testowych	139
Rys. 5.11.	Przynależność elementów zbioru zmiennej determinującej rozkład jazdy w węzle przesiadkowym do podzbiorów rozpatrywanych w rozprawie	141
Rys. 5.12.	Logika postępowania w etapie 5 przyjęta w zakresie przygotowania i realizacji analizy porównawczej par rozkładów jazdy wyznaczonych dla przypadków testowych	144
Rys. 5.13.	Logika przepływu danych podczas przeszukiwania zbioru rozwiązań w ramach poszczególnych programów składowych autorskiego narzędzia wspomagającego synchronizację rozkładów jazdy	148
Rys. 5.14.	Zastosowanie arkuszy wyników realizacji procedur proponowanej metody w kolejnych etapach algorytmu	152
Rys. 5.15.	Przykład struktury danych stosowanej w opracowanych programach: a) Identyfikacja kierunków jazdy łączących poszczególne segmenty z węzłem przesiadkowym (arkusz SL); b) Zestawienie liczby pasażerów dla poszczególnych relacji podróży (Arkusz MacierzOD); c) Rezultat obliczeń w programie Etap3BiezacyRJ (arkusz RozAe4)	154
Rys. 6.1.	Wyniki grupowania węzłów przesiadkowych w GZM metodą aglomeracji	157
Rys. 6.2.	Lokalizacja badanych węzłów przesiadkowych na planie gmin wchodzących w skład GZM	159
Rys. 6.3.	Układ geometryczny badanych węzłów przesiadkowych: a) Rojca; b) Porąbka; c) Ząbkowice	162
Rys. 6.4.	Wybrane charakterystyki segmentów docelowych dla badanych węzłów	163
Rys. 6.5.	Schemat atrybutów różnicujących użytkowników węzła przesiadkowego	165
Rys. 6.6.	Zastosowany w badaniu węzłów schemat procesu ruchu pasażerów zaimplementowany w modelu symulacyjnym	165
Rys. 6.7.	Schemat Charakterystyka wartości średniej ze zbioru odchylek od rozkładu jazdy w okresach o dla skupień linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w poszczególnych typach dni ruchowych e : a) dni robocze w okresie roku szkolnego ER , b) dni robocze w okresie wakacji EW	172
Rys. 6.8.	Przykład przebiegu zmian wartości funkcji kryterium w kolejnych iteracjach realizacji algorytmu przeszukiwania lokalnego dla $v \in V$: a) $FCwarv *$ dla kolejnych bieżących rozwiązań warv * ; b) $FCwarvu$ w kolejnych iteracjach w przeszukiwaniu lokalnym i z tabu	178

Rys. 6.9.	Wybrane wyniki analizy przebiegu przeszukiwania lokalnego: a) Prawdopodobieństwo poprawy rozwiązania $\mathbf{warv} *$ podczas badania segmentów wyznaczone na podstawie powtórzeń; b) Wartości $FC\mathbf{warv}$ dla wszystkich rozwiązań dla przypadku testowego zbadanych proponowaną metodą	180
Rys. 6.10.	Przykład badania powtarzalności rezultatów uzyskanych poprzez przeszukiwanie lokalne dla pary przypadków testowych $v, v' \in \mathbf{rCSV}$: a) struktura wartości miary $\mu\mathbf{tmwarv} *$ charakteryzujących powtórzenia synchronizacji w podziale na ocenę rozwiązań 26 zbiorami $\mathbf{ZSv}$; b) zagregowana struktura wartości miary $\mu\mathbf{tmwarv} *$ dla pary v, v' ; c) Analiza wartości średnich opisujących strukturę wartości miary $\mu\mathbf{tmwarv} *$ dla pary v, v'	184
Rys. 6.11.	Zestawienie wartości miary $\partial\mu\mathbf{tmv}$ dla podzbioru $\mathbf{VCS3}$	187
Rys. 6.12.	Zestawienie wartości miary $\mathbf{rtmwarv} *, \mathbf{warv} * L$ dla podzbioru $\mathbf{VCS3}$	188
Rys. 6.13.	Wyniki analizy wartości miary $\mu\mathbf{tmrjv}$ dla rozkładów jazdy $\mathbf{warv} *$ i $\mathbf{drjv}$: a) zestawienie wartości miary $\mu\mathbf{tmu} \wedge e \wedge \mathbf{CS3}, \mathbf{rjv}$; b) zestawienie wartości miary $\rho\mathbf{tmu} \wedge \mathbf{CS3}, \mathbf{warv} *, \mathbf{drjv}$	190
Rys. 6.14.	Zestawienie wartości miary dla podzbiorów $\mathbf{rtmsq}, \mathbf{warv} *, \mathbf{drjv}$: a) $u \wedge \mathbf{CS3}$; b) $\mathbf{slt} \wedge \mathbf{CS3}$	191
Rys. 6.15.	Zestawienie dla wszystkich elementów zbioru $\mathbf{V}$ wartości miary $\mu\mathbf{tmwarv} *$..	193
Rys. 6.16.	Zestawienie dla wszystkich par odpowiadających sobie przypadków testowych $v, v' \in \mathbf{rCSV}$ wartości miary $\mathbf{rtmwarv} *, \mathbf{warv}' *$	194
Rys. 6.17.	Zestawienie wartości miary $\mu\mathbf{tmsq}, \mathbf{warv} *$ dla podzbiorów przypadków testowych wydzielonych na podstawie stanów poszczególnych atrybutów powodujących istotny wpływ na zróżnicowanie wyników	195
Rys. 6.18.	Wartości miary $\rho\mathbf{tmsq}, \mathbf{warv} *, \mathbf{warv}' *$ dla podzbiorów przypadków testowych wydzielonych na podstawie stanów atrybutów $\mathbf{rCSVsq}$	197

Spis tabel

Tabela 2.1	Analizowane w literaturze wybrane czynniki różnicujące prędkość przejścia...	40
Tabela 2.2	Zestawienie determinant zmiennych wpływających na czas przesiadania i skutków ich oddziaływania w węzłach przesiadkowych.....	52
Tabela 2.3	Wyniki zmian czasu oczekiwania na skutek uwzględniania różnych czynników stochastycznych podczas synchronizacji rozkładów jazdy.....	56
Tabela 2.4.	Zestawienie charakterystyki badań synchronizacji rozkładów jazdy rozpatrywanych w literaturze.....	57
Tabela 2.5	Zestawienie wybranych artykułów o tematyce synchronizacji rozkładów jazdy z uwzględnieniem zastosowanej struktury modelu.....	63
Tabela 2.6	Klasyfikacja wybranych artykułów w tematyce synchronizacji rozkładów jazdy na podstawie algorytm rozwiązania zastosowanego w metodzie	64
Tabela 5.1	Zestawienie zakresu zastosowania danych wejściowych w realizacji działań w kolejnych etapach procedury obliczeniowej	121
Tabela 5.2	Zestawienie miar stosowanych w analizie wyników synchronizacji rozkładów jazdy zrealizowanej proponowaną metodą	145
Tabela 5.3	Zestawienie arkuszy danych wejściowych do metody zaimplementowanej w programie	149
Tabela 5.4	Zestawienie nazw opracowanych plików programu stosowanych na kolejnych etapach metody w zakresie synchronizacji rozkładów jazdy wraz z identyfikacją arkuszy zawierających dane wejściowe do poszczególnych plików.	150
Tabela 6.1	Zestawienie wartości wybranych parametrów charakteryzujących transport zbiorowy w zakresie obsługi węzła przesiadkowego i jego otoczenia	159
Tabela 6.2	Zestawienie ram podziału całego okresu funkcjonowania węzła	162
Tabela 6.3	Zestawienie liczby połączeń kolejowych poddanych analizie dopasowania rozkładów prawdopodobieństwa opisujących odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągów do węzła przesiadkowego <i>Poppjk, o</i>	168
Tabela 6.4	Zestawienie liczby kursów w komunikacji miejskiej po przeprowadzeniu trzyetapowej selekcji danych w podziale na węzły, okresy i typy dni ruchowych	170
Tabela 6.5	Zestawienie badanych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy przypisanych do poszczególnych skupień.....	172
Tabela 6.6	Zestawienie wartości wybranych miar statystyki opisowej i liczebności próby dla zbiorów powtórzeń wielokrotnego zastosowania proponowanej metody dla każdego z badanych przypadków testowych	181

Załącznik 1 Arkusze danych wejściowych i wyników dla programów w ramach narzędzia wspomagającego realizację obliczeń – przykład dla węzła Modelowego badanego w rozprawie

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Nazwa przypadku testowego	Typ dnia ruchowego	Oznaczenie segmentów docelowych											
2	Wzorcowy	Dni robocze w okresie roku szkolnego	:1#2:	:2#2:	:3#2:	:4#2:	:5#2:	:6#1:	:7#1:	:8#1:	:9#1:	:10#1:	:11#1:	:12#1:
3	05:36:24	S8A11#1	8	6	6	3		19	6	1			7	
4	06:40:00	S8A12#2	11		1		2	9	3	2		1		
5	09:02:30	S8A12#3	8		2	1		10	1	1	1		1	
6	10:26:00	S8A13#4	7		3			12	5	6			2	
7	12:35:48	S8A13#5	5		4	6		12	2	10	2		3	1
8	14:20:30	S8A13#6	7	1	10	7		16	2	1	1	3	2	2
9	15:16:00	S8A14#7	13	1	8			13	4	4			3	1
10	16:24:48	S8A14#8	5		6			7	2	2	1			
11	17:16:30	S8A14#9	5					4						
12	18:18:36	S8A15#10	4		1			3	1	2				
13	19:10:12	S8A15#11			2			4	1	2			1	
14	21:29:00	S8A15#12	1		1	1		3	2	1				
15	05:40:00	S8B21#1	8	7	6	3		13	3	4			3	1
16	06:36:30	S8B22#2	4	2	2	1	3	13	2	1	4	1		
17	07:40:00	S8B22#3	24	1	6	8		19	7	5			11	
18	09:15:24	S8B22#4	11					11	1	1				
19	10:50:00	S8B23#5	8		2			4	1	13				
20	12:46:30	S8B23#6	6		9	6		13	3	6	1		3	
21	15:00:36	S8B24#7	20		12			8	2	4			3	
22	16:07:00	S8B24#8	8		4			11	3	6				
23	17:14:00	S8B24#9	11		1	1								
24	18:17:24	S8B25#10	3		3	1		4		3				
25	18:55:36	S8B25#11	1		3			3	1	1				
26	20:44:36	S8B25#12	2		1	1		1	2	2	1			
27	Planowane momenty przyjazdów pociągów	Oznaczenia połączeń w transporcie kolejowym	Wagi relacji podróży											

Rys. Z1-1 Struktura arkusza „MacierzOD” danych wejściowych – Zestawienie planowanych momentów przyjazdów pociągów na tor przy peronie w węźle przesiadkowym dla wszystkich połączeń w transporcie kolejowym wraz ze wskazaniem wagi poszczególnych relacji w których podróż realizują pasażerowie wysiadający z poszczególnych pociągów

Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Linia komunikacyjna	17	17	73	73	94	94	173	173	608	708
2	Kierunek jazdy	A2	B1	A2	B1	A2	B1	A2	B1	A2	B1
3	Obowiązujący rozkład jazdy w węźle przesiadkowym w komunikacji miejskiej	4:23	5:00	5:06	4:37	4:37	4:53	4:50	5:34	5:29	5:12
4		5:11	6:12	5:31	5:18	4:59	5:16	5:46	6:31	6:29	5:43
5		6:11	6:52	6:26	6:01	5:41	5:54	6:27	7:05	7:24	6:13
6		6:56	7:45	6:56	6:31	6:00	6:19	7:30	8:29	8:19	6:48
7		8:06	9:00	7:26	7:16	6:45	6:58	10:04	10:55	9:07	7:25
8		9:33	10:20	7:51	7:46	7:17	7:25	12:35	13:19	12:52	8:03
9		11:59	12:40	8:21	8:13	7:49	8:02	13:28	14:29	13:46	8:38
10		13:08	14:12	8:56	8:58	8:15	8:34	14:54	15:31	14:40	12:03
11		14:26	15:10	9:36	9:48	8:53	9:06	15:25	16:03	15:34	12:33
12		15:50	16:30	10:26	10:28	9:25	9:38	16:18	17:10	16:28	13:08
13		16:53	17:44	11:11	11:13	10:20	10:10	17:40	18:35	17:29	13:43
14		18:14	19:28	11:56	11:58	11:13	11:04	18:52	19:47	18:26	14:18
15		20:57	22:13	12:36	12:48	12:08	11:58	20:13	21:03	19:20	14:48
16		22:01	22:43	13:26	13:28	12:51	13:06	21:23	22:23	20:13	15:18
17				14:21	14:01	13:23	13:36	23:04	23:36	21:07	15:58
18				14:46	14:36	14:03	14:08			22:01	16:23
19				15:26	15:16	14:33	14:51			22:55	17:38
20				15:51	15:46	15:03	15:12				18:43
21				16:21	16:13	15:35	15:53				19:46
22				16:51	16:58	16:13	16:18				20:51
23				17:36	17:38	17:03	16:58				
24				18:16	18:28	18:00	17:48				
25				19:06	19:13	18:48	18:43				
26				19:51	19:58	19:35	19:30				
27				20:31	20:43	20:23	20:32				
28				21:21	21:36	21:13	21:08				
29				22:21	22:36	22:07	21:47				
30				23:21	23:30	22:47	22:54				
31							23:21				

Rys. Z1-2 Struktura arkusza „RozA” danych wejściowych – sposób opisu obowiązującego rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym autobusowej komunikacji miejskiej

Źródło: opracowanie własne

	A	B	C
1	Linia komunikacyjna	S8A1	S8B2
2	Relacja w transporcie kolejowym	A1	B2
3	Planowane momenty przyjazdów pociągów na tory przy peronie w węźle przesiadkowym	05:36:24	05:40:00
4		06:40:00	06:36:30
5		09:02:30	07:40:00
6		10:26:00	09:15:24
7		12:35:48	10:50:00
8		14:20:30	12:46:30
9		15:16:00	15:00:36
10		16:24:48	16:07:00
11		17:16:30	17:14:00
12		18:18:36	18:17:24
13		19:10:12	18:55:36
14		21:29:00	20:44:36

Rys. Z1-3 Struktura arkusza „RozK” danych wejściowych – sposób opisu obowiązującego rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym w transporcie kolejowym

Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D
1	Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	Zbiór segmentów obsługiwanych przez linie komunikacyjne w kierunkach jazdy		
2	17A2	;1#2;	;4#2;	;5#2;
3	17B1	;6#1;	;11#1;	;12#1;
4	73A2	;1#2;	;2#2;	;3#2;
5	73B1	;6#1;	;7#1;	;8#1;
6	94A2	;1#2;	;2#2;	;5#2;
7	94B1	;6#1;	;7#1;	;10#1;
8	173A2	;1#2;	;2#2;	;5#2;
9	173B1	;6#1;	;11#1;	
10	608A2	;1#2;	;2#2;	;5#2;
11	708B1	;6#1;	;7#1;	;9#1;
12				

Rys. Z1-4 Struktura arkusza „LS” danych wejściowych – zestawienie segmentów docelowych obsługiwanych przez poszczególne linie komunikacyjne w kierunkach jazdy
Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D	E	F
1	Segment	Zbiór linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy obsługujących segmenty docelowe				
2	;1#2;	17A2	73A2	94A2	173A2	608A2
3	;2#2;	73A2	94A2	173A2	608A2	
4	;3#2;	73A2				
5	;4#2;	17A2				
6	;5#2;	17A2	94A2	173A2	608A2	
7	;6#1;	17B1	73B1	94B1	173B1	708B1
8	;7#1;	73B1	94B1	708B1		
9	;8#1;	73B1				
10	;9#1;	708B1				
11	;10#1;	94B1				
12	;11#1;	17B1	173B1			
13	;12#1;	17B1				

Rys. Z1-5 Struktura arkusza „LS” danych wejściowych – zestawienie linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy obsługujących poszczególne segmenty docelowe
Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Oznaczenie drogi przejścia w okresie	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2			Dolna a i górna b granica czasu przebycia drogi przejścia na podstawie pierwszego i ostatniego percentyla szacowaną na podstawie przyjętego kroku wyrażonego w sekundach					
2	Numery peronów, stanowisk przystankowych i okresów	Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]						
3	PPO	Wsp1	Średnia 1	Odchylenie 1	Wsp2	Średnia 2	Odchylenie 2	a1	b1	a10	b10	a5	b5
4	111	0,7443	257,42	38,04	0,2557	310,85	62,39	196	366	187	367	192	367
5	112	0,7857	262,61	40,24	0,2143	340,54	66,99	199	390	193	393	198	393
6	113	0,2933	256,38	29,71	0,7067	327,24	54,78	219	408	217	417	217	412
7	114	0,5703	264,12	37,13	0,4297	322,61	57,24	209	392	204	394	209	394
8	115	0,4220	249,71	34,68	0,5780	316,50	56,09	203	393	197	397	202	397
9	121	0,3117	203,39	22,68	0,6883	258,58	48,22	171	329	169	329	169	329
10	122	0,3889	208,44	25,57	0,6111	269,74	48,99	173	338	170	340	170	340
11	123	0,1853	205,51	20,81	0,8147	278,78	48,40	184	354	179	359	184	354
12	124	0,4672	223,92	31,08	0,5328	280,25	52,90	179	350	170	350	175	350
13	125	0,2746	206,84	22,16	0,7254	267,30	44,48	180	334	177	337	177	337
14	211	0,8271	408,13	57,68	0,1729	492,43	90,07	316	552	308	558	313	553
15	212	0,8470	419,16	61,45	0,1530	546,61	99,03	322	595	319	599	319	599
16	213	0,2344	378,14	43,20	0,7656	496,89	66,01	339	597	337	597	337	597
17	214	0,3787	396,16	45,77	0,6213	480,41	78,03	332	590	330	590	330	590
18	215	0,9528	432,87	69,93	0,0472	602,25	144,35	318	572	313	573	318	573
19	221	0,5708	367,47	51,79	0,4292	431,52	73,34	290	520	287	527	287	522
20	222	0,8172	394,51	61,24	0,1828	458,53	94,81	294	533	285	535	290	535
21	223	0,5001	419,44	64,19	0,4999	457,89	77,70	320	564	319	569	319	564
22	224	0,5383	374,89	49,90	0,4617	454,09	72,13	303	544	295	545	300	545
23	225	0,8972	389,53	60,20	0,1028	513,88	100,26	292	535	290	540	290	535

Rys. Z1-6 Struktura arkusza „ParP” danych wejściowych – zestawienie parametrów rozkładu prawdopodobieństwa opisującego strukturę czasu przebycia poszczególnych dróg przejścia w węźle przesiadkowym w okresach
Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	Prawdopodobieństwo																				
2	Relacja w transporcie kolejowym	S8A11	S8A12	S8A13	S8A14	S8A15	S8B21	S8B22	S8B23	S8B24	S8B25										
3	Odchyłka od rozkładu jazdy [min]	0	0,156	-1	0,007	-1	0,050	-2	0,004	-2	0,001	-1	0,011	0	0,318	0	0,059	-1	0,006	-1	0,098
4		2	0,031	0	0,396	0	0,480	-1	0,035	-1	0,041	0	0,396	1	0,111	1	0,082	0	0,397	0	0,584
5		3	0,094	1	0,083	1	0,055	0	0,422	0	0,480	1	0,272	2	0,118	2	0,066	1	0,171	1	0,037
6		4	0,063	2	0,097	2	0,110	1	0,088	1	0,109	2	0,167	3	0,080	3	0,122	2	0,174	2	0,030
7		5	0,063	3	0,104	3	0,052	2	0,088	2	0,088	3	0,073	4	0,073	4	0,135	3	0,107	3	0,053
8		6	0,063	4	0,055	4	0,057	3	0,099	3	0,062	4	0,070	5	0,107	5	0,135	4	0,086	4	0,032
9		7	0,063	5	0,088	5	0,060	4	0,078	4	0,056	5	0,011	6	0,045	6	0,122	5	0,034	5	0,027
10		11	0,094	6	0,035	6	0,020	5	0,072	5	0,045			7	0,031	7	0,115	6	0,016	6	0,016
11		12	0,063	7	0,030	7	0,016	6	0,021	6	0,026			8	0,052	8	0,082	7	0,010	7	0,011
12		13	0,094	8	0,030	8	0,031	7	0,016	7	0,027			9	0,021	9	0,082			8	0,030
13		16	0,031	9	0,009	9	0,015	8	0,033	8	0,025			10	0,028					9	0,018
14		18	0,031	10	0,014	10	0,018	9	0,039	9	0,016			11	0,014					10	0,011
15		20	0,063	11	0,025	11	0,009	10	0,004	10	0,012			12	0,003					11	0,018
16		21	0,094	12	0,014	12	0,007			11	0,010									12	0,002
17				13	0,014	13	0,006			12	0,002									13	0,009
18						14	0,014													14	0,007
19																				15	0,009
20																				16	0,002
21																				17	0,002
22																				18	0,002

Rys. Z1-7 Struktura arkusza „ParK” danych wejściowych – zestawienie wartości prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów na tor przy peronie w węźle przesiadkowym dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym w okresach
Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Oznaczenie linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w okresie	Pierwsza składowa mieszaniny	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Druga składowa mieszaniny	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Dolna a i górna b granica czasu przebycia drogi przejścia na podstawie pierwszego i ostatniego percentyla szacowaną na podstawie przyjętego kroku wyrażonego w sekundach					
2		Waga skupienia 1			Waga skupienia 2								
3	LKTO	Wsp1	Średnia1	Odchylenie1	Wsp2	Średnia2	Odchylenie2	a1	b1	a10	b10	a5	b5
4	173A21	0,545	57,526	58,458	0,455	99,157	62,839	-28	184	-32	188	-32	188
5	173A22	0,564	106,322	61,119	0,436	335,913	152,129	18	519	16	526	16	521
6	173A23	0,675	264,451	73,933	0,325	365,992	38,103	157	414	154	414	154	414
7	173A24	0,638	384,296	126,838	0,362	578,865	96,115	204	690	204	694	204	694
8	173A25	0,785	149,141	85,789	0,215	307,208	35,685	18	340	9	349	14	344
9	173B11	0,545	57,526	58,458	0,455	99,157	62,839	-28	184	-32	188	-32	188
10	173B12	0,564	106,322	61,119	0,436	335,913	152,129	18	519	16	526	16	521
11	173B13	0,675	264,451	73,933	0,325	365,992	38,103	157	414	154	414	154	414
12	173B14	0,638	384,296	126,838	0,362	578,865	96,115	204	690	204	694	204	694
13	173B15	0,785	149,141	85,789	0,215	307,208	35,685	18	340	9	349	14	344
14	17A21	0,294	-83,070	32,935	0,706	82,109	60,262	-115	171	-118	172	-118	172
15	17A22	0,728	233,074	85,084	0,272	386,903	41,915	106	430	103	433	103	433
16	17A23	0,719	221,685	93,056	0,281	372,643	61,596	84	437	82	442	82	437
17	17A24	0,615	16,326	59,710	0,385	185,791	104,219	-69	304	-74	306	-69	306
18	17A25	0,571	161,242	79,694	0,429	319,705	58,349	53	391	51	391	51	391
19	17B11	0,294	-83,070	32,935	0,706	82,109	60,262	-115	171	-118	172	-118	172
20	17B12	0,728	233,074	85,084	0,272	386,903	41,915	106	430	103	433	103	433
21	17B13	0,719	221,685	93,056	0,281	372,643	61,596	84	437	82	442	82	437
22	17B14	0,615	16,326	59,710	0,385	185,791	104,219	-69	304	-74	306	-69	306
23	17B15	0,571	161,242	79,694	0,429	319,705	58,349	53	391	51	391	51	391
24	608A21	0,872	162,632	59,185	0,128	273,969	18,527	69	286	63	293	68	288
25	608A22	0,684	220,612	102,371	0,316	478,170	98,125	71	577	71	581	71	581
26	608A23	0,852	260,516	117,538	0,148	436,201	42,875	76	480	71	481	76	481
27	608A24	0,406	380,489	140,703	0,594	834,809	254,885	210	1187	205	1195	210	1190
28	608A25	0,584	107,515	88,865	0,416	304,909	77,924	-15	397	-22	398	-17	398
29	708B11	0,693	48,311	49,498	0,307	142,664	45,813	-24	189	-32	198	-27	193
30	708B12	0,486	111,142	86,134	0,514	376,109	157,368	-3	581	-4	586	-4	581
31	708B13	0,699	202,149	82,883	0,301	330,606	39,665	80	377	72	382	77	377
32	708B14	0,584	382,558	121,497	0,416	702,874	116,773	216	841	213	843	213	843
33	708B15	0,171	127,354	121,430	0,829	175,338	75,368	21	304	16	305	20	305

Rys. Z1-8 Struktura arkusza „ParA” danych wejściowych – zestawienie parametrów rozkładu prawdopodobieństwa opisującego wystąpienie odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów w kursach dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w okresach

Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Linia komunikacyjna	Liczba kursów w okresach					Interwał kursowania w okresach					Moment rozpoczęcia okresu funkcjonowania węzła i odsunięcia momentu rozpoczęcia okresu 1 dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy				
2	w kierunku jazdy	O1	O2	O3	O4	O5	O1	O2	O3	O4	O5	04:30:00				
3	175B1	4	6	10	6	6	30	30	30	30	60					0
4	175A2	4	6	10	6	5	30	30	30	30	60					0
5	635B1	2	3	5	6	3	60	60	60	30	120					0
6	635A2	3	3	5	6	2	30	60	60	30	120					30
7	84A2	1	3	5	3	6	60	60	60	60	60					60
8	84B1	1	3	5	3	5	60	60	60	60	60					60
9	140B1	2	3	5	3	2	60	60	60	60	120					0
10	637B1	2	3	3	3	3	60	60	100	60	120					0
11	637A2	2	3	3	3	3	60	60	100	60	120					0
12	140A2	1	3	3	3	2	60	60	100	60	120					60
13	237B1	1	1	1	3	0	60	180	300	60	0					60
14	237A2	1	1	1	3	0	60	180	300	60	0					60

Rys. Z1-9 Struktura arkusza „TechRozA” – zestawienie charakterystyk linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy, niezbędnych wraz z wartościami elementów wektora zmiennej decyzyjnej do odwzorowania rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym

Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D	E	F	G
1	Linie komunikacyjne w kierunkach jazdy	175B1	Planowane momenty realizacji pierwszego kursu linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w okresach				
2	Wartości charakterystyczne rozwiązań dopuszczalnych		1	2	3	4	5
3		0	0	0	0	0	0
4		6	1	1	1	1	2
5		12	2	2	2	2	4
6		18	3	3	3	3	6
7		24	4	4	4	4	8
8		30	5	5	5	5	10
9		36	6	6	6	6	12
10		42	7	7	7	7	14
11		48	8	8	8	8	16
12		54	9	9	9	9	18
13		60	10	10	10	10	20
14		66	11	11	11	11	22
15		72	12	12	12	12	24
16		78	13	13	13	13	26
17		84	14	14	14	14	28
18		90	15	15	15	15	30
19		96	16	16	16	16	32
20		102	17	17	17	17	34
21		108	18	18	18	18	36
22		114	19	19	19	19	38
23		120	20	20	20	20	40
24		126	21	21	21	21	42

Rys. Z1-10 Struktura arkusza „SLT2” – zbiór rozwiązań dopuszczalnych określony na podstawie planowanych momentów realizacji pierwszych kursów w kolejnych okresach dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy dla sposobów łączenia taktów SLT1-SLT3

Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Linie komunikacyjne w kierunkach jazdy	175B1	Planowane momenty realizacji pierwszego kursu linii komunikacyjnej w kierunku jazdy w okresach					Liczba rozwiązań sąsiednich względem rozwiązania bieżącego	Położenie rozwiązań sąsiednich dla rozwiązania bieżącego w zestawieniu		
2	Wartości charakterystyczne rozwiązań dopuszczalnych	0	0	0	0	0	0	3	29	31	60
3		5	1	1	1	1	1	1	31		
4		10	2	2	2	2	2	1	31		
5		15	3	3	3	3	3	1	31		
6		20	4	4	4	4	4	1	31		
7		25	5	5	5	5	5	1	31		
8		30	6	6	6	6	6	1	31		
9		35	7	7	7	7	7	1	31		
10		40	8	8	8	8	8	1	31		
11		45	9	9	9	9	9	1	31		
12		50	10	10	10	10	10	1	31		
13		55	11	11	11	11	11	1	31		
14		60	12	12	12	12	12	1	31		
15		65	13	13	13	13	13	1	31		
16		70	14	14	14	14	14	1	31		
17		75	15	15	15	15	15	1	31		
18		80	16	16	16	16	16	1	31		
19		85	17	17	17	17	17	1	31		
20		90	18	18	18	18	18	1	31		
21		95	19	19	19	19	19	1	31		
22		100	20	20	20	20	20	1	31		
23		105	21	21	21	21	21	1	31		

Rys. Z1-11 Struktura arkusza „SLT4”– zbiór rozwiązań dopuszczalnych określony na podstawie planowanych momentów realizacji pierwszych kursów w kolejnych okresach dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy dla sposobu łączenia taktów SLT4
Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Relacja w transporcie kolejowym	17A2	Odstęp czasu między planowanymi odjazdami kolejnych autobusów zapewniających połączenie węzła z segmentem docelowym															
2	Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	S8A1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
3	Planowany odstęp czasu między momentem przyjazdu pociągu i momentem odjazdem autobusu	0	51	71	91	113	128	142	165	177	184	202	225	250	280	311	338	363
4		1	69	85	101	116	130	148	164	167	178	196	216	239	264	285	304	324
5		2	94	107	120	131	142	159	165	168	181	196	214	232	247	261	274	293
6		3	126	135	145	155	165	175	177	184	195	208	222	233	241	250	264	281
7		4	163	171	178	186	194	199	202	210	220	230	237	243	248	258	271	286
8		5	205	211	217	222	229	231	236	244	252	256	259	262	269	278	290	301
9		6	251	256	260	265	268	270	277	283	286	287	288	292	299	308	317	326
10		7	300	303	306	310	311	316	322	323	323	323	326	331	337	344	351	357
11		8	350	353	356	358	360	365	367	366	365	367	370	375	380	385	391	396
12		9	403	405	407	408	411	413	414	412	413	415	419	423	427	430	434	438
13		10	456	458	459	460	463	463	462	463	464	467	470	472	475	478	481	483
14		11	511	512	513	514	515	515	516	517	519	521	523	525	527	529	531	
15		12	567	567	568	569	569	569	569	570	571	573	574	575	576	577	578	579
16		13	623	623	624	624	624	624	625	625	626	627	627	628	628	629	630	630
17		14	680	680	680	680	680	681	681	681	681	682	682	682	683	683	683	683
18		15	737	738	738	738	738	738	738	738	738	738	738	738	738	738	738	739
19		16	795	795	795	795	795	795	795	795	795	795	795	795	795	795	795	795
20		17	853	853	853	853	853	853	853	853	853	853	853	853	853	853	853	853
21		18	910	910	910	910	910	910	910	910	910	910	910	910	910	910	910	910
22		19	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968
23		20	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025

Rys. Z1-12 Struktura arkuszy dla zbioru plików pomocniczych etapu 2 – zestawienie wartości przeciętnych czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w rozważanej parze: relacja w transporcie kolejowym i linia komunikacyjna w kierunku jazdy w kolejnych okresach dla zadanych parametrów opisujących rozkład jazdy
Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Kursy linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy	Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	Obsługiwane segmenty	Nr pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu										
2				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
3	17A21#1	17A2	1#2;4#2;5#2	2,78	1,72	2,13	2,60	1,98	1,87	1,30	1,52	2,58	2,90	Odchyłki od rozkładu jazdy
4	17A21#2	17A2	1#2;4#2;5#2	2,23	1,62	1,78	1,80	2,80	1,97	1,83	2,22	1,98	2,25	
5	17A22#3	17A2	1#2;4#2;5#2	2,12	2,45	4,40	3,45	2,50	0,97	3,12	4,38	3,10	3,37	
6	17A22#4	17A2	1#2;4#2;5#2	2,48	2,55	1,87	2,88	2,85	1,88	2,03	2,80	3,85	2,20	
7	17A22#5	17A2	1#2;4#2;5#2	2,85	2,43	3,08	2,20	2,73	3,15	4,07	3,22	0,52	2,50	
8	17A23#6	17A2	1#2;4#2;5#2	3,97	5,63	2,00	4,10	2,78	3,85	2,22	4,82	3,80	3,35	
9	17A23#7	17A2	1#2;4#2;5#2	2,70	4,83	2,85	5,40	1,23	4,23	3,92	2,93	3,05	1,23	
10	17A23#8	17A2	1#2;4#2;5#2	2,87	3,10	3,98	3,72	3,80	0,48	3,08	2,83	2,67	4,03	
11	17A23#9	17A2	1#2;4#2;5#2	4,97	3,75	3,88	4,48	2,67	2,70	6,62	4,60	2,07	4,77	
12	17A23#10	17A2	1#2;4#2;5#2	3,78	2,72	2,90	5,23	2,50	6,02	5,12	5,72	4,85	1,25	
13	17A24#11	17A2	1#2;4#2;5#2	7,32	8,93	5,08	4,08	4,53	5,92	5,72	7,40	9,13	3,72	
14	17A24#12	17A2	1#2;4#2;5#2	1,70	8,32	6,88	3,42	6,08	8,45	3,20	4,98	0,35	8,37	
15	17A24#13	17A2	1#2;4#2;5#2	9,28	5,30	6,92	4,25	5,35	8,75	10,47	6,72	3,33	3,60	
16	17A25#14	17A2	1#2;4#2;5#2	4,12	2,40	3,92	2,03	1,97	2,78	1,38	2,00	3,78	2,67	
17	17A25#15	17A2	1#2;4#2;5#2	2,88	4,50	1,22	1,72	3,65	2,67	1,70	2,28	3,80	1,87	
18	17B11#1	17B1	6#1;11#1;12#1	1,43	1,78	2,07	2,27	2,03	1,83	2,38	2,55	3,25	1,90	
19	17B12#2	17B1	6#1;11#1;12#1	3,23	2,40	2,47	2,73	2,20	3,68	2,43	1,30	3,02	2,95	
20	17B12#3	17B1	6#1;11#1;12#1	0,93	3,08	2,70	3,68	3,63	1,85	1,80	3,77	3,30	2,82	
21	17B12#4	17B1	6#1;11#1;12#1	3,28	2,13	2,82	3,23	3,30	1,12	3,70	3,25	1,93	2,12	
22	17B13#5	17B1	6#1;11#1;12#1	2,90	3,40	3,25	4,75	3,38	3,65	2,75	4,22	3,92	3,43	
23	17B13#6	17B1	6#1;11#1;12#1	1,73	5,37	2,80	2,60	2,28	5,33	2,97	3,00	2,35	2,57	

Rys. Z1-13 Struktura arkusza „OdH” zestawienie wylosowanych odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów w kursach dla poszczególnych realizacji procesu zmiany środka transportu

Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Połączenie w transporcie kolejowym, z oznaczeniem okresu planowanego momentu przyjazdu	Segment docelowy w podróży pasażerów	Czas wysiadania pasażerów	Nr pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu										
2				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
3	S8A11#1	1#2	14	247	198	281	219	233	237	176	251	209	228	Czas przebycia dróg przejścia przez pasażerów w pojedynczych realizacjach procesu zmiany środka transportu
4	S8A11#1	1#2	2	221	201	225	210	190	202	218	242	208	240	
5	S8A11#1	1#2	4	192	299	227	250	212	209	176	233	266	202	
6	S8A11#1	1#2	8	187	280	254	209	224	238	182	193	195	202	
7	S8A11#1	1#2	4	239	239	188	219	238	249	217	205	244	248	
8	S8A11#1	1#2	18	200	189	204	214	219	257	216	220	242	248	
9	S8A11#1	1#2	2	244	228	180	254	239	244	221	206	193	218	
10	S8A11#1	1#2	8	207	191	248	225	260	251	238	237	221	196	
11	S8A11#1	1#2	6	233	241	222	212	228	223	207	267	228	232	
12	S8A11#1	2#2	12	196	203	251	257	178	242	185	250	210	232	
13	S8A11#1	2#2	2	229	224	225	227	216	201	210	194	216	188	
14	S8A11#1	2#2	14	210	225	258	224	195	268	239	208	226	242	
15	S8A11#1	2#2	16	230	239	203	171	250	245	267	232	207	246	
16	S8A11#1	2#2	12	258	222	232	230	231	241	280	232	239	211	
17	S8A11#1	2#2	16	197	205	237	208	212	239	244	256	250	223	
18	S8A11#1	2#2	8	194	247	216	225	210	217	219	215	254	256	
19	S8A11#1	2#2	2	210	215	228	243	223	231	281	279	225	234	
20	S8A11#1	2#2	16	229	265	244	259	206	278	170	207	219	266	
21	S8A11#1	3#2	10	250	246	230	237	201	255	199	261	196	238	
22	S8A11#1	3#2	16	209	217	233	217	227	266	215	252	255	262	
23	S8A11#1	3#2	14	260	215	225	211	192	228	225	277	261	258	
24	S8A11#1	3#2	10	235	196	208	195	248	198	209	224	229	237	
25	S8A11#1	3#2	12	227	235	206	259	247	205	219	223	221	241	

Rys. Z1-14 Struktura arkusza „OdH” zestawienie wylosowanych wartości czasu przebycia przez poszczególnych pasażerów dróg przejścia w węzle w pojedynczych realizacjach procesu zmiany środka transportu

Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Segment	Nr pojedynczej realizacji procesu zmiany środka transportu										
2	docelowy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
3	1#2	74,35	77,53	77,92	75,88	74,12	77,18	74,17	76,42	73,72	75,03	Momenty wejścia na stanowisko przystankowe pasażeróww pojedynczych realizacjach procesu zmiany środka transportu
4	1#2	73,72	77,38	76,78	75,53	73,20	76,40	74,67	76,07	73,50	75,03	
5	1#2	73,27	79,05	76,85	76,23	73,60	76,55	74,00	75,95	74,50	74,43	
6	1#2	73,25	78,80	77,37	75,62	73,87	77,10	74,17	75,35	73,38	74,50	
7	1#2	74,05	78,05	76,20	75,72	74,03	77,22	74,68	75,48	74,13	75,20	
8	1#2	73,63	77,45	76,70	75,87	73,95	77,58	74,90	75,97	74,33	75,43	
9	1#2	74,10	77,83	76,03	76,27	74,02	77,10	74,72	75,47	73,25	74,67	
10	1#2	73,58	77,32	77,27	75,88	74,47	77,32	75,10	76,08	73,82	74,40	
11	1#2	73,98	78,12	76,80	75,63	73,90	76,82	74,55	76,55	73,90	74,97	
12	2#2	73,47	77,58	77,38	76,48	73,17	77,23	74,28	76,37	73,70	75,07	
13	2#2	73,85	77,77	76,78	75,82	73,63	76,38	74,53	75,27	73,63	74,17	
14	2#2	73,73	77,98	77,53	75,97	73,48	77,70	75,22	75,70	74,00	75,27	
15	2#2	74,10	78,25	76,65	75,12	74,43	77,35	75,72	76,13	73,72	75,37	
16	2#2	74,50	77,90	77,07	76,03	74,05	77,22	75,87	76,07	74,18	74,72	
17	2#2	73,55	77,68	77,22	75,73	73,80	77,25	75,33	76,53	74,43	74,98	
18	2#2	73,37	78,25	76,73	75,88	73,63	76,75	74,78	75,72	74,37	75,40	
19	2#2	73,53	77,62	76,83	76,08	73,75	76,88	75,72	76,68	73,78	74,93	
20	2#2	74,08	78,68	77,33	76,58	73,70	77,90	74,10	75,72	73,92	75,70	
21	3#2	74,33	78,27	77,00	76,12	73,52	77,42	74,48	76,52	73,43	75,13	
22	3#2	73,75	77,88	77,15	75,88	74,05	77,70	74,85	76,47	74,52	75,63	
23	3#2	74,57	77,82	76,98	75,75	73,43	77,03	74,98	76,85	74,58	75,53	
24	3#2	74,08	77,43	76,63	75,42	74,30	76,47	74,65	75,90	73,98	75,12	
25	3#2	73,98	78,12	76,63	76,52	74,32	76,62	74,85	75,92	73,88	75,22	
26	4#2	74,28	77,00	76,83	76,30	73,55	76,67	74,83	75,85	74,10	74,58	

Rys. Z1-15 Struktura arkusza „RMWPS” zestawienie momentów wejścia na stanowiska przystankowe w poszczególnych realizacjach procesu zmiany środka transportu pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym

Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Linia	Okres							Okres							Moment rozpoczęcia funkcjonowania węzła w skali doby	
2	komunikacyjna w kierunku jazdy	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5			4:30	
3	173A2	2	1	3	3	6	Liczba kursów realizowanych w poszczególnych okresach		60	180	100	60	60	Odstęp czasu między realizacją kursów w kolejnych okresach		0	Moment rozpoczęcia okresu pierwszego dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunku jazdy
4	173B1	1	3	3	3	6			60	60	100	60	60			60	
5	17A2	2	3	5	3	2			60	60	60	60	120			0	
6	17B1	1	3	3	3	3			60	60	100	60	120			60	
7	608A2	1	3	2	3	5			60	60	150	60	60			60	
8	708B1	3	3	5	3	3			30	60	60	60	60			30	
9	73A2	3	6	10	6	6			30	30	30	30	60			30	
10	73B1	4	6	10	6	6			30	30	30	30	60			0	
11	94A2	4	6	5	6	5			30	30	60	30	60			0	
12	94B1	3	6	10	6	6			30	30	30	30	60			30	

Rys. Z1-16 Struktura arkusza „RozAe4”–zestawienie wartości charakteryzujących obsługę węzła przesiadkowego prze linie komunikacyjne w kierunkach jazdy i niezbędnych wraz ze zmienną decyzyjną do odwzorowania rozkładu jazdy

Źródło: opracowanie własne

	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK
1		Linia komunikacyjna w kierunku jazdy									
2		173A2	173B1	17A2	17B1	608A2	708B1	73A2	73B1	94A2	94B1
3	Planowane momenty realizacji kursów w czasie systemowym	17	80	27	113	100	40	59	29	21	52
4		77	140	87	173	160	70	89	59	51	82
5		257	200	147	233	220	100	119	89	81	112
6		357	260	207	293	280	160	149	119	111	142
7		457	320	267	393	340	220	179	149	141	172
8		557	420	327	493	490	280	209	179	171	202
9		657	520	387	593	640	340	239	209	201	232
10		717	620	447	653	700	400	269	239	231	262
11		777	680	507	713	760	460	299	269	261	292
12		837	740	567	773	820	520	329	299	291	322
13		897	800	627	893	880	580	359	329	351	352
14		957	860	687	1013	940	640	389	359	411	382
15		1017	920	747	1133	1000	700	419	389	471	412
16		1077	980	867		1060	760	449	419	531	442
17		1137	1040	987			820	479	449	591	472
18			1100				880	509	479	621	502
19							940	539	509	651	532
20								569	539	681	562
21								599	569	711	592
22								629	599	741	622
23								659	629	771	652
24								689	659	801	682
25								719	689	861	712
26								749	719	921	742
27								779	749	981	772
28								839	779	1041	802
29								899	839		862
30								959	899		922
31								1019	959		982
32								1079	1019		1042
33								1139	1079		1102
34									1139		

Rys. Z1-17 Struktura arkusza „RozAe4” – zestawienie dla bieżącego rozwiązania planowanych momentów odjazdów autobusów w kursach dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy odwzorowanych w czasie systemowym przyjętym w modelu

Źródło: opracowanie własne

	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU
1	Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	Okres					Wartości zmiennej decyzyjnej w bieżącym rozwiązaniu Planowane momenty realizacji pierwszych kursów w kolejnych okresach
2		1	2	3	4	5	
3	173A2	17	137	57	57	57	
4	173B1	20	20	20	20	20	
5	17A2	27	27	27	27	87	
6	17B1	53	53	93	53	113	
7	608A2	40	40	40	40	40	
8	708B1	10	40	40	40	40	
9	73A2	29	29	29	29	59	
10	73B1	29	29	29	29	59	
11	94A2	21	21	51	21	21	
12	94B1	22	22	22	22	22	

Rys. Z1-18 Struktura arkusza „RozAe4” - zestawienie dla bieżącego rozwiązania wartości elementów zmiennej decyzyjnej, określającej planowane momenty realizacji pierwszych kursów w kolejnych okresach dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy

Źródło: opracowanie własne

	AV	AW	AX	AY	AZ	BA
1	Odstęp czasu między realizacją kolejnych kursów,				Informacje pomocnicze o lokalizacji bieżącego rozwiązania	
2	z których każdy występuje w innym okresie				w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych w arkuszu SLT	
3	180	100	100	60	658	819
4	60	60	100	60	372	393
5	60	60	60	120	536	625
6	60	100	60	120	975	1254
7	60	60	150	60	822	863
8	60	60	60	60	310	352
9	30	30	30	60	62	123
10	30	30	30	60	0	61
11	30	30	60	30	186	270
12	30	30	30	30	124	147

Rys. Z1-19 Struktura arkusza „RozAe4” zestawienie wartości pomocniczych w budowie rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym i przeszukiwaniu rozwiązań sąsiednich w proponowanej metodzie synchronizacji rozkładów jazdy

Źródło: opracowanie własne

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Linia komunikacyjna w kierunku jazdy										
2	173A2	173B1	17A2	17B1	608A2	708B1	73A2	73B1	94A2	94B1	
3	4:47	5:50	4:57	6:23	6:10	5:10	5:29	4:59	4:51	5:22	
4	5:47	6:50	5:57	7:23	7:10	5:40	5:59	5:29	5:21	5:52	
5	8:47	7:50	6:57	8:23	8:10	6:10	6:29	5:59	5:51	6:22	
6	10:27	8:50	7:57	9:23	9:10	7:10	6:59	6:29	6:21	6:52	
7	12:07	9:50	8:57	11:03	10:10	8:10	7:29	6:59	6:51	7:22	
8	13:47	11:30	9:57	12:43	12:40	9:10	7:59	7:29	7:21	7:52	
9	15:27	13:10	10:57	14:23	15:10	10:10	8:29	7:59	7:51	8:22	
10	16:27	14:50	11:57	15:23	16:10	11:10	8:59	8:29	8:21	8:52	
11	17:27	15:50	12:57	16:23	17:10	12:10	9:29	8:59	8:51	9:22	
12	18:27	16:50	13:57	17:23	18:10	13:10	9:59	9:29	9:21	9:52	
13	19:27	17:50	14:57	19:23	19:10	14:10	10:29	9:59	10:21	10:22	
14	20:27	18:50	15:57	21:23	20:10	15:10	10:59	10:29	11:21	10:52	
15	21:27	19:50	16:57	23:23	21:10	16:10	11:29	10:59	12:21	11:22	
16	22:27	20:50	18:57		22:10	17:10	11:59	11:29	13:21	11:52	
17	23:27	21:50	20:57			18:10	12:29	11:59	14:21	12:22	
18		22:50				19:10	12:59	12:29	14:51	12:52	
19						20:10	13:29	12:59	15:21	13:22	
20							13:59	13:29	15:51	13:52	
21							14:29	13:59	16:21	14:22	
22							14:59	14:29	16:51	14:52	
23							15:29	14:59	17:21	15:22	
24							15:59	15:29	17:51	15:52	
25							16:29	15:59	18:51	16:22	
26							16:59	16:29	19:51	16:52	
27							17:29	16:59	20:51	17:22	
28							18:29	17:29	21:51	17:52	
29							19:29	18:29		18:52	
30							20:29	19:29		19:52	
31							21:29	20:29		20:52	
32							22:29	21:29		21:52	
33							23:29	22:29		22:52	
34								23:29			

Rys. Z1-20 Struktura arkusza „RozkładJazdy” danych wynikowych - zestawienie zsynchronizowanego za pomocą proponowanej metody rozkładu jazdy w węźle przesiadkowym, opisującego planowane momenty odjazdów autobusów w kursach dla linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy

Źródło: opracowanie własne

Załącznik 2 Zestawienie parametrów rozkładów prawdopodobieństwa opisujących odchyłki od rozkładu jazdy dla linii komunikacyjnych w badanych węzłach przesiadkowych

Tabela Z2-1 Zestawienie stosowanych przez ZTM GZM i przyjętych w pracy wyróżników linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy obsługujących badane węzły przesiadkowe

L.p.	Nr linii komunikacyjnej	Kierunek jazdy	Wyróżnik stosowany w pracy	Kierunek jazdy	Wyróżnik stosowany w pracy	Węzeł przesiadkowy
1.	17	Bytom Dworzec	17A2	Siedliska	17B1	Radzionków Rojca
2.	73	Os. Wieczorka	73A2	Stroszek Poczta	73B1	
3.	94	Bytom Dworzec	94A2	Tarnowskie Góry Dworzec	94B1	
4.	173	Bytom Dworzec	173A2	Świerkianiec Park	173B1	
5.	608	Bytom Dworzec	608A2	Linia okrężna		
6.	708	Linia okrężna		Bytom Dworzec	708B1	
7.	34	Strzemieszyce Dworzec Północny	34A1	Sosnowiec Urząd Miasta	34B2	Sosnowiec Porąbka
8.	221	Szczakowa Dworzec PKP	221A1	Sosnowiec Urząd Miasta	221B2	
9.	260	Porąbka Os. Juliusz	260A1	Będzin Kościuszki	260B2	
10.	835	Maczki Kościuszki	835A1	Katowice Piotra Skargi	835B2	
11.	84	Tworzeń Huta Katowice	84A2	Os. Mydlice Pętla	84B1	Dąbrowa Górnicza Ząbkowice
12.	140	Dąbrowa Górnicza Centrum	140A2	Tucznawa Remiza	140B1	
13.	175	Os. Mydlice Pętla	175A2	Podwarpie Pętla	175B1	
14.	237	Tucznawa Remiza	237A2	Tucznawa Remiza	237B1	
15.	635	Os. Mydlice Pętla	635A2	Wojkowice Kościelne Kościół	635B1	
16.	637	Os. Mydlice Pętla	637A2	Siewierz Dom Kultury	637B1	

Źródło: opracowanie własne na podstawie [255], dla danych za 18.03.2019 r.

Tabela Z2-2 Zestawienie stosowanych przez przewoźników kolejowych i przyjętych w pracy linii komunikacyjnych w transporcie kolejowym obsługujących badane węzły przesiadkowe

L.p.	Nr linii komunikacyjnej	Stacja końcowa	Wyróżnik stosowany w pracy	Stacja końcowa	Wyróżnik stosowany w pracy	Węzeł przesiadkowy
1.	S8	Kluczbork	S8A1	Oświęcim	S8B2	Radzionków Rojca
2.	PR105	Olkusz	OLA1	Katowice	OLB1	Sosnowiec Porąbka
3.	S1	Gliwice	S1A1	Częstochowa	S1B1	Dąbrowa Górnicza Ząbkowice
4.	PR LYSICA	Katowice	LYA1	Kielce	LYB1	

Źródło: opracowanie własne na podstawie [184], dla danych za 18.03.2019 r.

Tabela Z2-3 Zestawienie wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych wartości odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów w dni robocze w okresie roku szkolnego na tor przy peronie w węźle Rojca w kolejnych okresach, odrębnie dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym

	Prawdopodobieństwo wystąpienia odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągu									
Relacja w transporcie kolejowym	S8A					S8B				
Wartość odchyłki od rozkładu jazdy [min]	O1	O2	O3	O4	O5	O1	O2	O3	O4	O5
-1	0,0356	0,0358	0,0177	0,0105	0,0128		0,0041		0,0031	
0	0,6512	0,6215	0,5830	0,4881	0,4404	0,6821	0,6568	0,7709	0,8046	0,6298
1	0,1957	0,1483	0,1720	0,1941	0,1963	0,2413	0,1826	0,1321	0,0962	0,2062
2	0,0605	0,0946	0,0707	0,1104	0,1367	0,0580	0,0737	0,0296	0,0351	0,0740
3	0,0356	0,0537	0,0624	0,0657	0,0817	0,0116	0,0369	0,0081	0,0244	0,0421
4	0,0178	0,0217	0,0412	0,0533	0,0569	0,0070	0,0238	0,0350	0,0137	0,0228
5	0,0036	0,0153	0,0212	0,0276	0,0202		0,0180	0,0081	0,0122	0,0114
6		0,0090	0,0224	0,0152	0,0312		0,0041	0,0108	0,0015	0,0091
7			0,0094	0,0200	0,0193			0,0054	0,0092	0,0046
8				0,0152	0,0046					

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-4 Zestawienie wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych wartości odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów w dni robocze w okresie wakacji na tor przy peronie w węźle Rojca w kolejnych okresach, odrębnie dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym

	Prawdopodobieństwo wystąpienia odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągu									
Relacja w transporcie kolejowym	S8A					S8B				
Wartość odchyłki od rozkładu jazdy [min]	O1	O2	O3	O4	O5	O1	O2	O3	O4	O5
-1	0,0143	0,0132	0,0333	0,0250	0,0282					
0	0,2857	0,4474	0,5630	0,5100	0,4601	0,5000	0,7695	0,7584	0,8842	0,8462
1	0,3571	0,2105	0,1593	0,1850	0,2300	0,2571	0,1152	0,1180	0,0368	0,0710
2	0,1714	0,1513	0,0926	0,1150	0,1268	0,0714	0,0372	0,0281	0,0263	0,0237
3	0,1286	0,0855	0,0704	0,0500	0,0704	0,0429	0,0112	0,0112		0,0059
4	0,0286	0,0395	0,0296	0,0800	0,0423	0,0429	0,0074	0,0169	0,0053	0,0118
5	0,0143	0,0197	0,0259	0,0250	0,0235	0,0714	0,0037	0,0112	0,0053	
6		0,0197	0,0148	0,0100	0,0188	0,0143	0,0112	0,0281	0,0105	0,0059
7		0,0066	0,0111				0,0074	0,0169	0,0105	
8		0,0066					0,0149		0,0053	
9							0,0112	0,0056		
10										
11							0,0037	0,0056	0,0053	0,0059
12										
13							0,0074			
14										
15										0,0059
16										0,0059
17									0,0053	
18										
19										

	Prawdopodobieństwo wystąpienia odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągu									
Relacja w transporcie kolejowym	S8A					S8B				
Wartość odchyłki od rozkładu jazdy [min]	O1	O2	O3	O4	O5	O1	O2	O3	O4	O5
20										
21									0,0053	
22										
23										0,0059
24										
25										0,0059
26										0,0059

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-5 Zestawienie wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych wartości odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów w dni robocze w okresie roku szkolnego na tor przy peronie w węźle Porąbka w kolejnych okresach, odrębnie dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym

	Prawdopodobieństwo wystąpienia odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągu									
Relacja w transporcie kolejowym	PRA					PRB				
Wartość odchyłki od rozkładu jazdy [min]	O1	O2	O3	O4	O5	O2	O3	O4	O5	
-1	0,0029	0,0058	0,0076		0,0029	0,0273	0,0147	0,0435	0,0136	
0	0,3110	0,3179	0,4389	0,3977	0,3793	0,6080	0,9338	0,6045	0,6431	
1	0,2849	0,3164	0,3251	0,3228	0,2960	0,2519	0,0294	0,2398	0,2371	
2	0,2413	0,1945	0,1640	0,1729	0,0920	0,0751		0,0771	0,0627	
3	0,1076	0,1292	0,0559	0,1066	0,1063	0,0342	0,0147	0,0351	0,0272	
4	0,0494	0,0363	0,0085		0,0431	0,0034	0,0074		0,0082	
5	0,0029				0,0316				0,0082	
6					0,0345					
7					0,0144					

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-6 Zestawienie wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych wartości odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów w dni robocze w okresie wakacji na tor przy peronie w węźle Porąbka w kolejnych okresach, odrębnie dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym

	Prawdopodobieństwo wystąpienia odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągu									
Relacja w transporcie kolejowym	PRA					PRB				
Wartość odchyłki od rozkładu jazdy [min]	O1	O2	O3	O4	O5	O2	O3	O4	O5	
-1	0,0175	0,0769	0,0372	0,1081	0,0147		0,0936	0,1239	0,0141	
0	0,4912	0,5175	0,5372	0,3919	0,4412	0,5000	0,7537	0,7434	0,8873	
1	0,3509	0,2168	0,2819	0,2973	0,3824	0,1458	0,1133	0,0708	0,0423	
2	0,1404	0,1329	0,0851	0,1622	0,0588	0,1875	0,0246	0,0265	0,0282	
3		0,042	0,0479	0,0135		0,1250	0,0148	0,0088	0,0282	
4		0,014	0,0106	0,027	0,0294	0,0417				

	Prawdopodobieństwo wystąpienia odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągu								
Relacja w transporcie kolejowym	PRA					PRB			
Wartość odchyłki od rozkładu jazdy [min]	O1	O2	O3	O4	O5	O2	O3	O4	O5
5					0,0588				
6									
7					0,0147				
8									
9									
10									
11									
12									
13								0,0088	
14									
15								0,0088	
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28								0,0088	

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-7 Zestawienie wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych wartości odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów w dni robocze w okresie roku szkolnego na tor przy peronie w węźle Ząbkowice w kolejnych okresach, odrębnie dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym

	Prawdopodobieństwo wystąpienia odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągu													
Relacja w transporcie kolejowym	S1A					S1B					ŁysicaA		ŁysicaB	
Wartość odchyłki od rozkładu jazdy [min]	O1	O2	O3	O4	O5	O1	O2	O3	O4	O5	O2	O5	O2	O5
-3											0,0027			
-2				0,0009	0,0016					0,0008	0,0191	0,0143		0,0027
-1	0,0033			0,0089	0,0059	0,0055	0,0075	0,0073	0,0060	0,0045	0,0272	0,0808	0,0492	0,0109
0	0,4340	0,1662	0,0788	0,4014	0,4411	0,4531	0,4376	0,3877	0,4036	0,3184	0,6022	0,5962	0,8361	0,6785
1	0,3430	0,2371	0,1169	0,2319	0,2211	0,3339	0,2260	0,2613	0,2831	0,2779	0,1744	0,1188	0,0820	0,1580
2	0,1478	0,2289	0,0835	0,1285	0,0996	0,1583	0,1473	0,1598	0,1446	0,1630	0,0817	0,0760	0,0164	0,0436
3	0,0554	0,1635	0,1098	0,0749	0,0682	0,0446	0,0857	0,0843	0,0783	0,0928	0,0381	0,0333	0,0164	0,0245
4	0,0165	0,0926	0,1241	0,0553	0,0464	0,0045	0,0584	0,0458	0,0301	0,0593	0,0245	0,0238		0,0218
5		0,0436	0,1217	0,0348	0,0368		0,0273	0,0418	0,0542	0,0432	0,0054	0,0238		0,0109
6		0,0681	0,1074	0,0348	0,0277		0,0102	0,0121		0,0289	0,0109	0,0095		0,0136
7			0,1146	0,0219	0,0192					0,0113	0,0054	0,0048		0,0054

	Prawdopodobieństwo wystąpienia odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągu													
Relacja w transporcie kolejowym	S1A					S1B					LysicaA		LysicaB	
Wartość odchyłki od rozkładu jazdy [min]	O1	O2	O3	O4	O5	O1	O2	O3	O4	O5	O2	O5	O2	O5
8			0,0692	0,0067	0,0160						0,0054	0,0071		
9			0,0740		0,0165						0,0027	0,0095		0,0109
10												0,002		0,0054
11														0,0109
12														0,0027

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-8 Zestawienie wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych wartości odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów w dni robocze w okresie wakacji na tor przy peronie w węźle Ząbkowice w kolejnych okresach, odrębnie dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym

	Prawdopodobieństwo wystąpienia odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągu													
Relacja w transporcie kolejowym	S1A					S1B					LysicaA		LysicaB	
Wartość odchyłki od rozkładu jazdy [min]	O1	O2	O3	O4	O5	O1	O2	O3	O4	O5	O2	O5	O2	O5
-2							0,0026		0,0030					
-1					0,0023		0,0026	0,0073		0,0021		0,0364	0,0161	
0	0,4331	0,2742	0,3096	0,2776	0,3326	0,5698	0,4346	0,3596	0,2961	0,3043	0,9500	0,8182	0,6613	0,7867
1	0,3822	0,3545	0,1726	0,2776	0,1923	0,2793	0,2330	0,3505	0,3746	0,4017	0,0500	0,0364	0,2419	0,0800
2	0,1624	0,2408	0,1421	0,1553	0,1629	0,1285	0,1414	0,1468	0,1843	0,1615		0,0182	0,0161	0,0400
3	0,0223	0,0936	0,1066	0,1035	0,0814	0,0223	0,0969	0,0697	0,0755	0,0787		0,0364	0,0161	0,0133
4		0,0368	0,0812	0,0612	0,0747		0,0602	0,0422	0,0453	0,0435			0,0161	
5			0,0609	0,0588	0,0520		0,0209	0,0239	0,0211	0,0083			0,0161	0,0267
6			0,0381	0,0400	0,0385		0,0079						0,0161	
7			0,0406	0,0188	0,0204									0,0133
8			0,0279	0,0071	0,0385									
9			0,0152		0,0045									0,0133
10			0,0051											
11														
12														
13														
14												0,0545		
15														
16														
17														
18														
19														0,0133
20														
21														
22														
23														0,0133

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-9 Zestawienie wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych wartości odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów w dni robocze w okresie roku szkolnego na tor przy peronie w węźle Modelowym w kolejnych okresach, odrębnie dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym

	Prawdopodobieństwo wystąpienia określonych wartości odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągu									
Relacja w transporcie kolejowym	A					B				
Wartość odchyłki od rozkładu jazdy [min]	O1	O2	O3	O4	O5	O1	O2	O3	O4	O5
-2				0,0041	0,0012					
-1		0,0069	0,0501	0,0350	0,0406	0,0108			0,0060	0,0982
0	0,1562	0,3963	0,4801	0,4218	0,4797	0,3962	0,3183	0,0592	0,3969	0,5845
1		0,0829	0,0546	0,0885	0,1086	0,2722	0,1107	0,0822	0,1715	0,0365
2	0,0312	0,0968	0,1104	0,0885	0,0885	0,1671	0,1176	0,0658	0,1739	0,0297
3	0,0938	0,1037	0,0523	0,0988	0,0619	0,0728	0,0796	0,1217	0,1067	0,0525
4	0,0625	0,0553	0,0569	0,0782	0,0563	0,0701	0,0727	0,1349	0,0863	0,0320
5	0,0625	0,0876	0,0603	0,0720	0,0450	0,0108	0,1073	0,1349	0,0336	0,0274
6	0,0625	0,0346	0,0205	0,0206	0,0261		0,045	0,1217	0,0156	0,016
7	0,0625	0,0300	0,0159	0,0165	0,0265		0,0311	0,1151	0,0096	0,0114
8		0,0300	0,0307	0,0329	0,0253		0,0519	0,0822		0,0297
9		0,0092	0,0148	0,0391	0,0157		0,0208	0,0822		0,0183
10		0,0138	0,0182	0,0041	0,0117		0,0277			0,0114
11	0,0938	0,0253	0,0091		0,0101		0,0138			0,0183
12	0,0625	0,0138	0,0068		0,0024		0,0035			0,0023
13	0,0938	0,0138	0,0057							0,0091
14			0,0137							0,0068
15										0,0091
16	0,0312									0,0023
17										0,0023
18	0,0312									0,0023
19										
20	0,0625									
21	0,0938									

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-10 Zestawienie wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych wartości odchyłek od planowanych momentów przyjazdów pociągów w dni robocze w okresie wakacji na tor przy peronie w węźle Modelowym w kolejnych okresach, odrębnie dla poszczególnych relacji w transporcie kolejowym

	Prawdopodobieństwo wystąpienia odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągu									
Relacja w transporcie kolejowym	A					B				
Wartość odchyłki od rozkładu jazdy [min]	O1	O2	O3	O4	O5	O1	O2	O3	O4	O5
-2					0,0021					
-1		0,0075		0,0273	0,0407	0,0143	0,0248		0,0464	0,0161
0	0,2373	0,2105	0,3429	0,3455	0,4368	0,2857	0,4472	0,3096	0,5828	0,4839
1	0,2034	0,1128	0,1571	0,0727	0,1156	0,3571	0,0559	0,1726	0,0397	0,0645
2	0,2373	0,203	0,1714	0,1455	0,1092	0,1714	0,1056	0,1421	0,0331	0,0806
3	0,1017	0,1203	0,1000	0,0909	0,0514	0,1286	0,0559	0,1066	0,0662	0,0484

	Prawdopodobieństwo wystąpienia odchyłki od planowanego momentu przyjazdu pociągu									
Relacja w transporcie kolejowym	A					B				
Wartość odchyłki od rozkładu jazdy [min]	O1	O2	O3	O4	O5	O1	O2	O3	O4	O5
4	0,0678	0,0827	0,0857	0,0636	0,0600	0,0286	0,0559	0,0812	0,0331	0,0484
5	0,0847	0,1053	0,0429	0,0636	0,0471	0,0143	0,118	0,0609	0,0728	0,0323
6	0,0508	0,0451	0,0143	0,0364	0,0364		0,0062	0,0381	0,0199	
7	0,0169	0,0226		0,0364	0,0321		0,0248	0,0406	0,0199	0,0806
8		0,0376	0,0429	0,0182	0,0214		0,0248	0,0279	0,0132	
9		0,0075		0,0818	0,0107		0,0435	0,0152	0,0066	0,0323
10		0,0075		0,0091	0,0193		0,0186	0,0051	0,0132	0,0161
11		0,0226	0,0286		0,0086		0,0186		0,0066	0,0161
12		0,0150	0,0143	0,0091	0,0086					
13									0,0066	
14									0,0066	
15										
16										
17									0,0132	
18									0,0066	0,0161
19									0,0066	
20									0,0066	
21										0,0161
22										
23										
24										
25										0,0161
26										
27										0,0161
28										
29										0,0161

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-11 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów odrębnie dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w kolejnych okresach w dni robocze w okresie roku szkolnego w węźle Rojca

Linia komunikacyjna kierunku w kierunku jazdy	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
17A2	1	0,54	50	47	0,46	81	47
	2	0,52	82	44	0,48	189	53
	3	0,64	55	39	0,36	147	44
	4	0,54	57	50	0,46	182	66
	5	0,62	65	46	0,38	143	43
17B1	1	0,79	59	39	0,21	125	13
	2	0,61	58	45	0,39	122	31
	3	0,54	65	43	0,46	130	33
	4	0,43	112	51	0,57	254	71
	5	0,78	39	41	0,22	119	25
173A2	1	0,62	54	31	0,38	114	31
	2	0,61	68	32	0,39	171	32

Linia komunikacyjna kierunku w kierunku jazdy	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
	3	0,72	65	41	0,28	170	47
	4	0,50	66	35	0,50	187	84
	5	0,77	66	46	0,23	178	31
	1	0,55	22	26	0,45	50	23
	2	0,57	17	29	0,43	59	34
173B1	3	0,70	15	28	0,30	82	34
	4	0,67	36	44	0,33	203	104
	5	0,58	13	34	0,42	53	40
	1	0,40	33	66	0,60	138	31
	2	0,30	122	57	0,70	167	39
608A2	3	0,70	156	45	0,30	220	22
	4	0,81	231	67	0,19	361	21
	5	0,28	78	60	0,72	161	33
	1	0,08	-48	26	0,92	74	37
	2	0,05	-68	20	0,95	70	40
708B1	3	0,62	60	62	0,38	42	26
	4	0,86	72	59	0,14	209	27
	5	0,80	58	47	0,20	128	21
	1	0,85	43	27	0,15	98	12
	2	0,65	82	39	0,35	163	33
73A2	3	0,72	43	34	0,28	132	29
	4	0,58	68	44	0,42	173	67
	5	0,72	41	36	0,28	106	33
	1	0,62	35	30	0,38	112	39
	2	0,61	98	53	0,39	227	56
73B1	3	0,62	128	56	0,38	236	47
	4	0,72	233	99	0,28	436	66
	5	0,60	46	47	0,40	148	50
	1	0,80	59	38	0,20	134	15
	2	0,51	110	43	0,49	202	41
94A2	3	0,69	136	51	0,31	215	28
	4	0,57	179	65	0,43	325	64
	5	0,61	85	41	0,39	166	27
	1	0,50	18	36	0,50	64	32
	2	0,51	18	29	0,49	80	43
94B1	3	0,55	19	30	0,45	86	35
	4	0,64	42	41	0,36	151	69
	5	0,59	17	33	0,41	67	38

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-12 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów odrębnie dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w kolejnych okresach w dni robocze w okresie wakacji w węźle Rojca

Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
17A2	1	0,66	18	36	0,34	95	33
	2	0,77	52	42	0,23	98	60

	3	0,63	50	45	0,37	130	46
	4	0,76	56	48	0,24	176	35
	5	0,67	67	44	0,33	142	41
17B1	1	0,49	35	44	0,51	101	26
	2	0,75	50	36	0,25	122	18
	3	0,56	66	42	0,44	136	33
	4	0,55	76	40	0,45	155	47
	5	0,65	30	36	0,35	93	27
173A2	1	0,44	50	34	0,56	110	31
	2	0,87	47	29	0,13	96	46
	3	0,71	49	37	0,29	166	38
	4	0,69	69	38	0,31	168	42
	5	0,62	49	40	0,38	159	41
173B1	1	0,85	41	27	0,15	97	11
	2	0,76	18	22	0,24	74	26
	3	0,82	18	30	0,18	110	40
	4	0,75	24	28	0,25	111	57
	5	0,56	18	25	0,44	50	34
608A2	1	0,06	-29	25	0,94	117	34
	2	0,33	88	55	0,67	157	34
	3	0,07	43	58	0,93	167	37
	4	0,25	120	67	0,75	193	45
	5	0,28	-12	28	0,72	165	27
708B1	1	0,22	-2	59	0,78	86	32
	2	0,11	-76	25	0,89	74	43
	3	0,69	34	52	0,31	105	17
	4	0,78	43	49	0,22	111	18
	5	0,53	41	52	0,47	109	26
73A2	1	0,72	29	25	0,28	73	23
	2	0,69	47	35	0,31	116	30
	3	0,74	47	42	0,26	139	27
	4	0,41	30	34	0,59	112	44
	5	0,89	45	46	0,11	131	11
73B1	1	0,88	50	44	0,12	139	16
	2	0,69	79	41	0,31	178	41
	3	0,83	143	59	0,17	262	23
	4	0,50	139	65	0,50	281	55
	5	0,80	56	59	0,20	158	36
94A2	1	0,78	57	45	0,22	126	17
	2	0,67	88	38	0,33	157	27
	3	0,71	128	49	0,29	214	24
	4	0,49	101	42	0,51	198	37
	5	0,63	80	39	0,37	161	23
94B1	1	0,52	20	35	0,48	65	35
	2	0,54	13	29	0,46	65	36
	3	0,63	22	28	0,37	86	29
	4	0,60	20	31	0,40	82	31
	5	0,57	23	35	0,43	64	32

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-13 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów odrębnie dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w kolejnych okresach w dni robocze w okresie roku szkolnego w węźle Porąbka

Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
221A1	1	0,33	13	19	0,67	27	44
	2	0,65	4	35	0,35	60	44
	3	0,67	11	40	0,33	96	50
	4	0,43	31	48	0,57	146	84
	5	0,51	1	39	0,49	84	49
221B2	1	0,75	68	33	0,25	130	21
	2	0,60	56	34	0,40	143	50
	3	0,56	51	45	0,44	85	48
	4	0,63	49	37	0,37	102	70
	5	0,53	45	27	0,47	62	56
260A1	1	0,65	14	39	0,35	107	51
	2	0,50	92	70	0,50	269	70
	3	0,56	155	86	0,44	311	60
	4	0,60	280	134	0,40	482	106
	5	0,44	35	56	0,56	214	86
260B2	1	0,55	49	24	0,45	75	26
	2	0,47	33	23	0,53	67	21
	3	0,60	34	24	0,40	76	24
	4	0,83	45	32	0,17	161	85
	5	0,46	43	30	0,54	62	24
34A1	1	0,57	33	36	0,43	104	34
	2	0,61	37	42	0,39	115	37
	3	0,61	65	51	0,39	171	63
	4	0,62	104	65	0,38	251	67
	5	0,56	50	43	0,44	137	41
34B2	1	0,39	33	30	0,61	90	65
	2	0,35	38	21	0,65	71	63
	3	0,60	28	32	0,40	63	62
	4	0,63	27	37	0,37	103	63
	5	0,70	41	43	0,30	130	45
835A1	1	0,67	45	44	0,33	165	43
	2	0,61	134	88	0,39	321	111
	3	0,49	97	70	0,51	252	76
	4	0,60	307	160	0,40	739	177
	5	0,52	57	63	0,48	240	135
835B2	1	0,33	39	16	0,67	90	49
	2	0,61	34	21	0,39	69	60
	3	0,36	32	19	0,64	39	48
	4	0,87	24	36	0,13	118	69
	5	0,27	39	14	0,73	45	44

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-14 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów odrębnie dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w kolejnych okresach w dni robocze w okresie wakacji w węźle Porąbka

Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
221A1	1	0,31	15	19	0,69	21	48
	2	0,66	1	40	0,34	77	43
	3	0,52	3	34	0,48	77	49
	4	0,53	9	41	0,47	101	52
	5	0,60	36	67	0,40	24	30
221B2	1	0,55	43	24	0,45	98	28
	2	0,85	63	41	0,15	166	18
	3	0,41	45	30	0,59	96	69
	4	0,62	44	40	0,38	133	53
	5	0,33	38	19	0,67	79	65
260A1	1	0,70	19	46	0,30	87	65
	2	0,75	84	80	0,25	242	49
	3	0,61	142	87	0,39	315	59
	4	0,66	197	107	0,34	379	57
	5	0,49	42	54	0,51	223	64
260B2	1	0,36	51	29	0,64	65	19
	2	0,63	41	24	0,37	69	18
	3	0,53	35	29	0,47	63	31
	4	0,72	36	29	0,28	82	44
	5	0,54	45	28	0,46	67	41
34A1	1	0,63	42	44	0,37	90	38
	2	0,70	50	39	0,30	133	22
	3	0,56	64	42	0,44	157	44
	4	0,80	83	52	0,20	196	24
	5	0,51	42	37	0,49	127	39
34B2	1	0,86	34	25	0,14	105	26
	2	0,52	32	27	0,48	88	45
	3	0,82	30	33	0,18	90	50
	4	0,32	24	13	0,68	67	59
	5	0,80	50	44	0,20	157	27
835A1	1	0,74	24	35	0,26	115	49
	2	0,62	61	51	0,38	187	38
	3	0,77	102	68	0,23	238	35
	4	0,80	195	101	0,20	424	44
	5	0,67	54	54	0,33	222	69
835B2	1	0,78	51	33	0,22	126	26
	2	0,93	47	32	0,07	181	12
	3	0,59	34	46	0,41	39	18
	4	0,53	28	26	0,47	43	44
	5	0,61	43	45	0,39	45	22

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-15 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów odrębnie dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w kolejnych okresach w dni robocze w okresie roku szkolnego w węźle Ząbkowice

Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
140B1	1	1,00	39	38	•	•	•
	2	0,52	23	43	0,48	85	49
	3	0,71	39	38	0,29	124	42
	4	0,55	73	67	0,45	189	77
	5	0,72	34	49	0,28	140	46
140A2	1	0,76	84	26	0,24	149	14
	2	0,75	116	47	0,25	193	26
	3	0,61	94	46	0,39	157	28
	4	0,50	75	44	0,50	168	34
	5	0,00	-212	269	1,00	123	51
175B1	1	0,59	12	30	0,41	65	44
	2	0,73	31	42	0,27	141	45
	3	0,67	39	44	0,33	153	50
	4	0,45	98	66	0,55	277	88
	5	0,69	24	42	0,31	129	57
175A2	1	0,04	60	103	0,96	88	43
	2	0,82	97	49	0,18	183	23
	3	0,77	74	41	0,23	155	27
	4	0,66	60	42	0,34	145	53
	5	0,75	101	50	0,25	210	35
237B1	1	0,81	7	31	0,19	68	44
	2	0,73	8	33	0,27	44	60
	3	0,74	23	33	0,26	116	56
	4	0,71	27	38	0,29	143	58
237A2	1	0,58	109	30	0,42	142	22
	2	0,53	107	33	0,47	151	22
	3	0,56	129	43	0,44	168	34
	4	0,84	118	53	0,16	219	23
635B1	1	0,69	4	26	0,31	59	48
	2	0,81	4	32	0,19	91	55
	3	0,70	8	35	0,30	120	68
	4	0,51	20	39	0,49	170	103
	5	0,69	9	37	0,31	90	61
635A2	1	0,52	42	29	0,48	119	46
	2	0,51	77	48	0,49	216	73
	3	0,49	38	34	0,51	141	71
	4	0,51	58	48	0,49	243	115
	5	0,50	73	44	0,50	130	63
637B1	1	0,71	49	32	0,29	116	23
	2	0,79	43	37	0,21	152	27
	3	0,60	47	50	0,40	153	47
	4	0,64	65	58	0,36	198	64
	5	0,79	37	46	0,21	126	28
637A2	1	0,35	40	49	0,65	139	48
	2	0,52	100	58	0,48	146	48
	3	0,43	58	51	0,57	177	43
	4	0,57	76	56	0,43	130	51
	5	0,74	82	47	0,26	146	29

Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
84B1	1	0,68	26	32	0,32	76	46
	2	0,72	38	37	0,28	144	45
	3	0,60	20	38	0,40	88	48
	4	0,58	36	48	0,42	161	74
	5	0,63	8	35	0,37	76	53
84A2	1	0,45	45	47	0,55	155	57
	2	0,79	85	48	0,21	174	24
	3	0,66	37	40	0,34	122	39
	4	0,69	32	49	0,31	172	78
	5	0,66	34	46	0,34	114	64

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-16 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów odrębnie dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w kolejnych okresach w dni robocze w okresie wakacji w węźle Żąbkowice

Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
140B1	1	0,51	28	35	0,49	46	37
	2	0,52	29	47	0,48	54	55
	3	0,36	44	17	0,64	65	57
	4	0,35	0	45	0,65	110	51
	5	0,51	13	49	0,49	82	48
140A2	1	0,70	78	22	0,30	146	20
	2	0,59	84	38	0,41	163	31
	3	0,56	91	33	0,44	131	36
	4	0,74	91	54	0,26	169	24
	5	0,49	90	50	0,51	154	33
175B1	1	0,55	11	33	0,45	58	38
	2	0,61	22	42	0,39	84	55
	3	0,62	33	41	0,38	137	41
	4	0,58	60	53	0,42	188	63
	5	0,82	20	39	0,18	101	62
175A2	1	0,57	50	30	0,43	110	30
	2	0,85	81	42	0,15	166	19
	3	0,10	78	112	0,90	100	50
	4	0,45	61	39	0,55	83	63
	5	0,66	96	47	0,34	202	40
237B1	1	0,45	-6	17	0,55	35	7
	2	0,33	29	4	0,67	20	23
	3	0,48	-18	8	0,52	57	58
	4	0,84	28	36	0,16	146	82
237A2	1	0,79	119	28	0,21	165	7
	2	0,41	48	15	0,59	109	20
	3	0,54	87	39	0,46	138	32
	4	0,52	106	28	0,48	126	67
635B1	1	0,30	-14	11	0,70	34	47
	2	0,51	-2	34	0,49	41	53
	3	0,69	-3	37	0,31	109	66

Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
	4	0,74	16	39	0,26	139	81
	5	0,31	-23	19	0,69	38	46
635A2	1	0,35	28	19	0,65	93	45
	2	0,01	-2969	27	0,99	104	74
	3	0,60	42	39	0,40	175	66
	4	0,49	50	40	0,51	183	89
	5	0,20	12	11	0,80	95	43
637B1	1	0,75	49	34	0,25	108	23
	2	0,77	42	42	0,23	135	35
	3	0,50	29	47	0,50	130	49
	4	0,50	75	74	0,50	82	46
	5	0,75	34	40	0,25	110	38
637A2	1	0,42	28	33	0,58	127	45
	2	0,59	70	54	0,41	116	41
	3	0,55	70	58	0,45	181	40
	4	0,71	58	45	0,29	130	32
	5	0,88	92	45	0,12	178	14
84B1	1	0,86	20	31	0,14	110	22
	2	0,93	29	45	0,07	189	17
	3	0,67	17	36	0,33	94	37
	4	0,68	25	36	0,32	114	62
	5	0,71	5	35	0,29	93	54
84A2	1	0,73	55	43	0,27	192	45
	2	0,49	36	34	0,51	126	39
	3	0,61	33	44	0,39	120	48
	4	0,68	23	48	0,32	114	67
	5	0,78	41	53	0,22	175	48

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-17 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów odrębnie dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w kolejnych okresach w dni robocze w okresie roku szkolnego w węźle Modelowym

Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
173A2 173B1	1	0,55	58	58	0,45	99	63
	2	0,56	106	61	0,44	336	152
	3	0,67	264	74	0,33	366	38
	4	0,64	384	127	0,36	579	96
	5	0,78	149	86	0,22	307	36
17A2 17B1	1	0,29	-83	33	0,71	82	60
	2	0,73	233	85	0,27	387	42
	3	0,72	222	93	0,28	373	62
	4	0,62	16	60	0,38	186	104
	5	0,57	161	80	0,43	320	58
608A2	1	0,87	163	59	0,13	274	19
	2	0,68	221	102	0,32	478	98
	3	0,85	261	118	0,15	436	43
	4	0,41	380	141	0,59	835	255

Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
	5	0,58	108	89	0,42	305	78
708B1	1	0,69	48	49	0,31	143	46
	2	0,49	111	86	0,51	376	157
	3	0,70	202	83	0,30	331	40
	4	0,58	383	121	0,42	703	117
	5	0,17	127	121	0,83	175	75
73A2 73B1	1	0,74	80	52	0,26	165	34
	2	0,64	231	90	0,36	424	98
	3	0,002	-1259	1019	0,998	329	106
	4	0,88	571	267	0,12	1110	130
	5	0,72	163	93	0,28	316	55
94A2 94B1	1	0,85	116	53	0,15	215	20
	2	0,39	-34	22	0,61	48	63
	3	0,69	269	86	0,31	406	45
	4	0,70	462	152	0,30	668	312
	5	0,46	92	59	0,54	249	94

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z2-18 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia odchyłek od planowanych momentów odjazdów autobusów odrębnie dla poszczególnych linii komunikacyjnych w kierunkach jazdy w kolejnych okresach w dni robocze w okresie wakacji w węźle Modelowym

Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
173A2 173B1	1	0,19	64	15	0,81	160	34
	2	0,64	103	55	0,36	222	56
	3	0,81	269	84	0,19	420	30
	4	0,01	-4833	629	0,99	360	116
	5	0,62	108	84	0,38	268	60
17A2 17B1	1	0,75	106	42	0,25	187	25
	2	0,85	137	68	0,15	252	24
	3	0,77	180	97	0,23	342	45
	4	0,01	-901	359	0,99	337	147
	5	0,30	66	36	0,70	186	79
608A2	1	0,53	112	49	0,47	170	39
	2	0,89	189	82	0,11	349	11
	3	0,33	215	62	0,67	337	43
	4	0,40	220	66	0,60	432	87
	5	0,57	121	62	0,43	248	47
708B1	1	0,81	70	57	0,19	174	31
	2	0,78	159	61	0,22	256	26
	3	0,83	106	66	0,17	232	28
	4	0,64	207	90	0,36	342	59
	5	0,70	127	76	0,30	266	41
73A2 73B1	1	0,65	83	78	0,35	70	34
	2	0,80	165	70	0,20	284	25
	3	0,36	259	167	0,64	291	78
	4	0,66	259	97	0,34	451	92
	5	0,86	151	67	0,14	274	23

Linia komunikacyjna w kierunku jazdy	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
94A2 94B1	1	0,79	65	52	0,21	164	31
	2	1,00	232	91	•	•	•
	3	0,63	168	79	0,37	306	46
	4	0,75	336	109	0,25	539	46
	5	0,72	179	83	0,28	336	39

Źródło: opracowanie własne

Załącznik 3 Zestawienie parametrów przyjętych w rozprawie dla potrzeb charakterystyki przemieszczania się pasażerów drogami przejścia w węzle przesiadkowym

Tabela Z3-1 Udziały jednorodnych grup użytkowników w poszczególnych okresach w dni robocze w okresie roku szkolnego

Nr grupy	Stopień znajomości węzła	Terminowość podróży	Płeć	Wiek	Okres				
					1	2	3	4	5
1.	Dobra znajomość	Ściśle terminowe	Mężczyzna	<19	8,1%	6,8%	3,5%	2,2%	2,3%
2.				20-29	5,7%	4,8%	2,4%	1,5%	1,6%
3.				30-49	8,1%	6,8%	3,5%	2,2%	2,3%
4.				≥50	8,1%	6,8%	3,5%	2,2%	2,3%
5.			Kobieta	<19	11,5%	9,6%	4,9%	3,0%	3,2%
6.				20-29	8,1%	6,8%	3,5%	2,1%	2,3%
7.				30-49	11,5%	9,6%	4,9%	3,0%	3,2%
8.				≥50	11,5%	9,6%	4,9%	3,0%	3,2%
9.		Nieściśle terminowe	Mężczyzna	<19	1,8%	2,4%	4,5%	6,3%	5,6%
10.				20-29	1,2%	1,7%	3,2%	4,4%	3,9%
11.				30-49	1,8%	2,4%	4,5%	6,3%	5,6%
12.				≥50	1,8%	2,4%	4,5%	6,3%	5,6%
13.			Kobieta	<19	2,5%	3,4%	6,4%	8,9%	7,9%
14.				20-29	1,8%	2,4%	4,5%	6,3%	5,6%
15.				30-49	2,5%	3,4%	6,4%	8,9%	7,9%
16.				≥50	2,5%	3,4%	6,4%	8,9%	7,9%
17.	Brak znajomości	Ściśle terminowe	Mężczyzna	<19	1,1%	1,5%	1,4%	0,7%	1,0%
18.				20-29	0,7%	1,1%	1,0%	0,5%	0,7%
19.				30-49	1,1%	1,5%	1,4%	0,7%	1,0%
20.				≥50	1,1%	1,5%	1,4%	0,7%	1,0%
21.			Kobieta	<19	1,5%	2,1%	2,0%	1,0%	1,3%
22.				20-29	1,0%	1,5%	1,4%	0,7%	0,9%
23.				30-49	1,5%	2,1%	2,0%	1,0%	1,3%
24.				≥50	1,5%	2,1%	2,0%	1,0%	1,3%
25.		Nieściśle terminowe	Mężczyzna	<19	0,2%	0,5%	1,8%	2,0%	2,3%
26.				20-29	0,2%	0,4%	1,3%	1,4%	1,6%
27.				30-49	0,2%	0,5%	1,8%	2,0%	2,3%
28.				≥50	0,2%	0,5%	1,8%	2,0%	2,3%
29.			Kobieta	<19	0,3%	0,7%	2,6%	2,9%	3,3%
30.				20-29	0,2%	0,5%	1,8%	2,0%	2,3%
31.				30-49	0,3%	0,7%	2,6%	2,9%	3,3%
32.				≥50	0,3%	0,7%	2,6%	2,9%	3,3%

Źródło: opracowanie własne na podstawie[110]

Tabela Z3-2 Udziały jednorodnych grup użytkowników w poszczególnych okresach w dni robocze w okresie wakacji

Nr grupy	Stopień znajomości węzła	Terminowość podróży	Płeć	Wiek	Okres				
					1	2	3	4	5
1.	Dobra znajomość	Ściśle terminowe	Mężczyzna	<19	5,7%	3,7%	2,8%	1,8%	2,1%
2.				20-29	4,0%	2,6%	1,9%	1,3%	1,5%
3.				30-49	5,7%	3,7%	2,8%	1,8%	2,1%

Nr grupy	Stopień znajomości węzła	Terminowość podróży	Płeć	Wiek	Okres				
					1	2	3	4	5
4.			Kobieta	≥50	5,7%	3,7%	2,8%	1,8%	2,1%
5.				<19	8,0%	5,3%	3,9%	2,6%	3,0%
6.				20-29	5,6%	3,7%	2,7%	1,8%	2,1%
7.				30-49	8,0%	5,3%	3,9%	2,6%	3,0%
8.				≥50	8,0%	5,3%	3,9%	2,6%	3,0%
9.		Nieściśle terminowe	Mężczyzna	<19	3,3%	4,1%	4,5%	5,8%	5,4%
10.				20-29	2,3%	2,9%	3,2%	4,1%	3,8%
11.				30-49	3,3%	4,1%	4,5%	5,8%	5,4%
12.				≥50	3,3%	4,1%	4,5%	5,8%	5,4%
13.			Kobieta	<19	4,7%	5,8%	6,4%	8,2%	7,7%
14.				20-29	3,3%	4,1%	4,5%	5,8%	5,4%
15.				30-49	4,7%	5,8%	6,4%	8,2%	7,7%
16.				≥50	4,7%	5,8%	6,4%	8,2%	7,7%
17.	Brak znajomości	Ściśle terminowe	Mężczyzna	<19	1,4%	1,6%	1,5%	0,9%	1,0%
18.				20-29	1,0%	1,1%	1,0%	0,6%	0,7%
19.				30-49	1,4%	1,6%	1,5%	0,9%	1,0%
20.				≥50	1,4%	1,6%	1,5%	0,9%	1,0%
21.			Kobieta	<19	2,0%	2,2%	2,1%	1,2%	1,4%
22.				20-29	1,4%	1,6%	1,5%	0,9%	1,0%
23.				30-49	2,0%	2,2%	2,1%	1,2%	1,4%
24.				≥50	2,0%	2,2%	2,1%	1,2%	1,4%
25.		Nieściśle terminowe	Mężczyzna	<19	0,8%	1,8%	2,4%	2,7%	2,6%
26.				20-29	0,6%	1,2%	1,7%	1,9%	1,9%
27.				30-49	0,8%	1,8%	2,4%	2,7%	2,6%
28.				≥50	0,8%	1,8%	2,4%	2,7%	2,6%
29.			Kobieta	<19	1,2%	2,5%	3,5%	3,8%	3,7%
30.				20-29	0,8%	1,7%	2,4%	2,7%	2,6%
31.				30-49	1,2%	2,5%	3,5%	3,8%	3,7%
32.				≥50	1,2%	2,5%	3,5%	3,8%	3,7%

Źródło: opracowanie własne na podstawie[110]

Tabela Z3-3 Przyjęte w pracy parametry rozkładu normalnego prędkości przejść pieszych jednorodnych grup użytkowników

Nr grupy	Stopień znajomości węzła	Terminowość podróży	Płeć	Wiek	Wartość średnia [m/s]	Odchylenie standardowe [m/s]
1.	Dobra znajomość	Ściśle terminowe	Mężczyzna	<19	1,24	0,11
2.				20-29	1,26	0,11
3.				30-49	1,24	0,11
4.				≥50	1,20	0,14
5.			Kobieta	<19	1,22	0,12
6.				20-29	1,24	0,12
7.				30-49	1,22	0,12
8.				≥50	1,18	0,14
9.		Nieściśle terminowe	Mężczyzna	<19	1,17	0,10
10.				20-29	1,19	0,11
11.				30-49	1,17	0,10
12.				≥50	1,13	0,11
13.			Kobieta	<19	1,15	0,10
14.				20-29	1,17	0,10
15.				30-49	1,15	0,09
16.				≥50	1,11	0,09
17.	Brak	Ściśle terminowe	Mężczyzna	<19	0,93	0,15

Nr grupy	Stopień znajomości węzła	Terminowość podróży	Płeć	Wiek	Wartość średnia [m/s]	Odchylenie standardowe [m/s]
18.	znajomości			20-29	0,94	0,14
19.				30-49	0,93	0,14
20.				≥50	0,90	0,18
21.			Kobieta	<19	0,92	0,16
22.				20-29	0,93	0,15
23.				30-49	0,92	0,15
24.				≥50	0,89	0,18
25.		Nieściśle terminowe	Mężczyzna	<19	0,88	0,14
26.				20-29	0,89	0,14
27.				30-49	0,88	0,13
28.				≥50	0,85	0,14
29.			Kobieta	<19	0,86	0,13
30.				20-29	0,87	0,14
31.				30-49	0,86	0,12
32.				≥50	0,83	0,12

Źródło: opracowanie własne na podstawie

Tabela Z3-4 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład czasu przebycia poszczególnych dróg przejścia w kolejnych okresach w dni robocze w okresie roku szkolnego w węźle Rojca

Droga przejścia	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
1	1	0,61	223	26	0,39	284	49
	2	0,44	235	31	0,56	303	56
	3	0,29	244	30	0,71	326	56
	4	0,26	246	31	0,74	323	56
	5	0,50	261	34	0,50	330	67
2	1	0,66	210	30	0,34	262	50
	2	0,42	211	26	0,58	275	50
	3	0,41	229	31	0,59	279	51
	4	0,31	209	23	0,69	283	45
	5	0,60	252	40	0,40	288	53
3	1	0,62	350	33	0,38	421	67
	2	0,81	422	55	0,19	492	88
	3	0,16	356	25	0,84	472	71
	4	0,51	401	52	0,49	490	83
	5	0,99	462	73	0,01	751	178
4	1	0,62	330	39	0,38	415	75
	2	0,63	373	56	0,37	419	80
	3	0,88	403	59	0,12	484	98
	4	0,61	355	46	0,39	425	66
	5	0,72	396	54	0,28	467	82

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z3-5 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład czasu przebycia poszczególnych dróg przejścia w kolejnych okresach w dni robocze w okresie wakacji w węźle Rojca

Droga przejścia	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
1	1	0,75	234	29	0,25	300	51
	2	0,65	241	32	0,35	306	57
	3	0,92	295	50	0,08	364	90
	4	0,39	264	38	0,61	327	54
	5	0,92	288	46	0,08	378	80
2	1	0,67	203	25	0,33	254	44
	2	0,55	214	29	0,45	265	50
	3	0,63	244	37	0,37	306	57
	4	0,30	217	25	0,70	274	48
	5	0,68	238	38	0,32	272	53
3	1	0,86	382	50	0,14	459	83
	2	0,71	391	52	0,29	456	80
	3	0,62	434	57	0,38	502	80
	4	0,38	410	55	0,62	480	74
	5	0,81	424	60	0,19	504	99
4	1	0,84	342	46	0,16	436	80
	2	0,88	361	50	0,12	484	84
	3	0,66	385	56	0,34	447	76
	4	0,59	392	54	0,41	442	73
	5	0,92	392	58	0,08	510	110

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z3-6 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład czasu przebycia poszczególnych dróg przejścia w kolejnych okresach w dni robocze w okresie roku szkolnego w węźle Porąbka

Droga przejścia	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
1	1	0,71	203	28	0,29	263	50
	2	0,64	209	31	0,36	276	57
	3	0,87	240	42	0,13	337	80
	4	0,72	215	29	0,28	282	59
	5	0,57	220	30	0,43	287	52
2	1	0,61	147	23	0,39	185	36
	2	0,46	146	21	0,54	191	36
	3	0,95	178	33	0,05	248	61
	4	0,68	157	24	0,32	201	37
	5	0,78	169	29	0,22	207	45

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z3-7 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład czasu przebycia poszczególnych dróg przejścia w kolejnych okresach w dni robocze w okresie wakacji w węźle Porąbka

Droga przejścia	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
1	1	0,75	202	27	0,25	268	63
	2	0,68	203	25	0,32	265	51
	3	0,68	222	34	0,32	292	58
	4	0,65	229	34	0,35	296	56
	5	0,67	237	35	0,33	298	60
2	1	0,71	148	21	0,29	189	34
	2	0,76	156	25	0,24	205	42
	3	0,87	174	32	0,13	220	55
	4	0,65	168	27	0,35	211	43
	5	0,63	166	25	0,37	209	40

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z3-8 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład czasu przebycia poszczególnych dróg przejścia w kolejnych okresach w dni robocze w okresie roku szkolnego w węźle Ząbkowice

Droga przejścia	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
1	1	0,90	291	36	0,10	383	65
	2	0,78	306	44	0,22	372	70
	3	0,96	326	50	0,04	477	91
	4	0,46	302	32	0,54	365	56
	5	0,59	326	44	0,41	385	64
2	1	0,90	417	48	0,10	517	95
	2	0,83	433	60	0,17	537	98
	3	0,66	456	61	0,34	554	94
	4	0,61	450	53	0,39	549	85
	5	0,65	482	73	0,35	549	102

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z3-9 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład czasu przebycia poszczególnych dróg przejścia w kolejnych okresach w dni robocze w okresie wakacji w węźle Ząbkowice

Droga przejścia	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
1	1	0,90	284	33	0,10	380	84
	2	0,72	306	44	0,28	389	78
	3	0,72	335	47	0,28	385	69
	4	0,52	313	40	0,48	380	57
	5	0,68	335	47	0,32	395	67

Droga przejścia	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
2	1	0,86	416	50	0,14	542	91
	2	0,92	467	72	0,08	595	136
	3	0,63	454	62	0,37	550	90
	4	0,76	468	68	0,24	565	102
	5	0,93	493	76	0,07	658	131

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z3-10 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład czasu przebycia poszczególnych dróg przejścia w kolejnych okresach w dni robocze w okresie roku szkolnego w węźle Modelowym

Droga przejścia	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
1	1	0,74	257	38	0,26	311	62
	2	0,79	263	40	0,21	341	67
	3	0,29	256	30	0,71	327	55
	4	0,57	264	37	0,43	323	57
	5	0,42	250	35	0,58	317	56
2	1	0,31	203	23	0,69	259	48
	2	0,39	208	26	0,61	270	49
	3	0,19	206	21	0,81	279	48
	4	0,47	224	31	0,53	280	53
	5	0,27	207	22	0,73	267	44
3	1	0,83	408	58	0,17	492	90
	2	0,85	419	61	0,15	547	99
	3	0,23	378	43	0,77	497	66
	4	0,38	396	46	0,62	480	78
	5	0,95	433	70	0,05	602	144
4	1	0,57	367	52	0,43	432	73
	2	0,82	395	61	0,18	459	95
	3	0,50	419	64	0,50	458	78
	4	0,54	375	50	0,46	454	72
	5	0,90	390	60	0,10	514	100

Źródło: opracowanie własne

Tabela Z3-11 Zestawienie parametrów mieszaniny dwóch rozkładów normalnych opisujących rozkład czasu przebycia poszczególnych dróg przejścia w kolejnych okresach w dni robocze w okresie wakacji w węźle Modelowym

Droga przejścia	Okres	Pierwsza składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 1			Druga składowa mieszaniny rozkładów normalnych Skupienie 2		
		Waga skupienia 1	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]	Waga skupienia 2	Wartość średnia [s]	Odchylenie standardowe [s]
1	1	0,46	230	26	0,54	283	50
	2	0,57	251	35	0,43	316	57
	3	0,27	248	29	0,73	317	55
	4	0,26	241	26	0,74	316	53
	5	0,74	269	44	0,26	323	71
2	1	0,55	207	28	0,45	254	46
	2	0,36	211	29	0,64	272	52
	3	0,35	227	29	0,65	280	48
	4	0,31	218	27	0,69	284	53
	5	0,49	218	27	0,51	273	45
3	1	0,93	393	56	0,07	492	118
	2	0,99	433	75	0,01	733	228
	3	0,65	447	68	0,35	513	95
	4	0,23	364	42	0,77	480	79
	5	0,66	419	60	0,34	496	91
4	1	0,52	338	37	0,48	407	73
	2	0,76	386	55	0,24	465	97
	3	0,36	383	44	0,64	460	64
	4	0,33	358	43	0,67	464	71
	5	0,51	404	50	0,49	449	63

Źródło: opracowanie własne