

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

W Y D Z I A Ł   T R A N S P O R T U

# Rozprawa doktorska

mgr inż. Andrzej Stańczak

Dobór taboru do realizacji zadań przewozowych  
w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach

Promotor  
prof. dr hab. inż. Marianna Jacyna

Promotor pomocniczy  
dr inż. Piotr Gołębiowski

WARSZAWA 2021



*Dziękuję serdecznie  
Pani prof. dr hab. inż. Mariannie Jacynie oraz Panu dr. inż. Piotrowi Gołębiowskiemu  
za zaangażowanie i pomoc w opracowaniu niniejszej rozprawy.*

*Chciałbym również podziękować rodzinie oraz przyjaciołom za wsparcie i motywację.*



# STRESZCZENIE

## **Dobór taboru do realizacji zadań przewozowych w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach**

Zagadnienia doboru taboru do realizacji zadań obecne są w każdej gałęzi transportu, która może realizować przemieszczanie ładunków. Jedną z nich jest transport kolejowy, który odgrywa istotną rolę zarówno przy przewozach pasażerskich jak i przy przewozach towarowych. W niniejszej rozprawie głównym obszarem zainteresowania jest analiza ruchu towarowego, szczególnie w aspekcie planowania i doboru taboru (wagonów oraz lokomotyw) do realizacji przewozu ładunków po sieci kolejowej, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów ograniczenia liczebności taboru będącego w dyspozycji przewoźnika kolejowego (ew. dysponenta wagonów czy lokomotyw). Na podstawie analizy źródeł drukowanych oraz doświadczeń autora i promotorów rozprawy płynących m.in. ze współpracy z przemysłem stwierdzono, że brak jest narzędzi wspomagających podejmowanie decyzji przez przewoźnika kolejowego w procesie racjonalnego doboru taboru do realizacji zadań przy ograniczonych zasobach. Powyższe przesłanki spowodowały, iż celem rozprawy jest opracowanie metody doboru taboru do realizacji zadań kolejowych przewozów towarowych przy uwzględnieniu ograniczonych zasobów, na podstawie złożonych zamówień przez klientów i zgodnie z ich oczekiwaniami. Na potrzeby realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej poprzez dobór taboru do realizacji zadań rozumie się: dokonanie przydziału pojazdów do realizacji zadań, trasowanie pociągu po sieci kolejowej oraz określenie warunków przewozu dla zdefiniowanego zadania przewozowego uwzględniającego przydzielony tabor (lokomotywy i wagony) i trasę. W ramach prac przygotowano model doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach, metodę oraz jej implementację w postaci autorskiej aplikacji komputerowej DST.

Pierwsza część rozprawy dotyczy rozważań teoretyczno-badawczych dotyczących problemu doboru taboru (lokomotyw i wagonów) do realizacji zadań przy ograniczonych zasobach. W rozdziale pierwszym przedstawiono wprowadzenie do problematyki badawczej dotyczącej specyfiki organizacji pracy transportu kolejowego, ze szczególnym uwzględnieniem przewozu ładunków. Omówiono organizację i zasady ruchu w transporcie kolejowym, przeprowadzono przegląd badań realizowanych przez krajowe i zagraniczne ośrodki naukowe z obszaru problemu doboru taboru do realizacji zadań oraz zagadnienie planowania pracy drużyn trakcyjnych przy realizacji przewozów towarowych. W rozdziale drugim przedstawiono problem badawczy rozprawy, tezę oraz cel główny i cele cząstkowe rozprawy. Przedmiotem rozdziału trzeciego jest charakterystyka metod i narzędzi stosowanych do rozwiązania problemu doboru taboru do realizacji zadań w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach. W rozdziale czwartym omówiono zasady i procedury stosowane przy gospodarowaniu wagonami, a w rozdziale piątym przy gospodarowaniu pojazdami trakcyjnymi. Rozdział szósty prezentuje model matematyczny doboru taboru do zadań obejmujący założenia ogólne i elementy składowe, w tym odwzorowanie i parametryzację struktury sieci kolejowej oraz ustalenie zadań przewozowych. Zdefiniowano zmienne decyzyjne, wskaźniki oceny jakości rozwiązania oraz ograniczenia i warunki brzegowe.

Druga część rozprawy dotyczy rozważań utylitarnych. W rozdziale siódmym przedstawiono procedurę metody doboru taboru do zadań. Przedłożono algorytmy obliczeniowe rozwiązania. Rozdział ósmy stanowi opis implementacji komputerowej metody doboru taboru do zadań w postaci autorskiej aplikacji DST. Aplikacja pozwala na dokonanie przydziału lokomotywy i wagonów do realizacji zadania, wybór najkrótszej trasy przewozu oraz określenie warunków przewozu. W rozdziale dziewiątym przedłożono przykłady zastosowania metody doboru taboru do zadań z wykorzystaniem aplikacji komputerowej dla wybranych zadań.

**Słowa kluczowe:** organizacja ruchu kolejowego, dobór taboru do zadań, ograniczone zasoby, transport kolejowy, przewóz towarów

# ABSTRACT

## **Selection of rolling stock for the implementation of transport tasks in railway transport with limited resources**

The issues of selecting the rolling stock for the implementation of tasks are present in every mode of transport that can handle cargo. One of them is railway transport, which plays an important role in both passenger and freight transport. In this dissertation, the main area of interest is the analysis of freight traffic, especially in the aspect of planning and selection of rolling stock (wagons and locomotives) for the implementation of freight transport on the railway network, with particular emphasis on the aspects of limiting the number of rolling stock at the disposal of a railway undertaking (possibly the administrator of wagons or locomotives)). On the basis of analysis of printed sources and the author's and supervisors experience flowing from among others cooperation with the industry, it was possible to conclude that there are no tools supporting decision making by the railway undertaking in the process of rational selection of rolling stock to perform tasks with limited resources. The above premises caused that the objective of the PhD dissertation is developing a method of selecting rolling stock for the implementation of rail freight tasks, taking into account the limited resources, based on orders placed by customers and in accordance with their expectations. For the purposes of this doctoral dissertation, the selection of rolling stock for the implementation of tasks is understood as: allocating vehicles for the implementation of tasks, routing a train along the railway network and determining the conditions of carriage for a defined transport task, taking into account the allocated rolling stock (locomotives and wagons) and the route. As part of the work, a model for the selection of rolling stock for the implementation of transport tasks with limited resources was prepared, the method and its implementation in the form of the original DST computer application.

The first part of the PhD dissertation concerns theoretical considerations about the problem of railway traffic organization and selection of rolling stock (locomotives and cars) for tasks with limited resources. The first chapter presents an introduction to the research issues concerning the specificity of the organization of work in rail transport, with particular emphasis on cargo transport. The organization and rules of traffic in rail transport were discussed, the research carried out by domestic and foreign research centers on the problem of selecting rolling stock for the implementation of tasks and the issue of planning the work of traction teams in the implementation of freight transport was carried out. The second chapter presents the research problem of the PhD dissertation, its thesis and main and partial objectives of the PhD dissertation. The subject of the third chapter is the characteristics of methods and tools used to solve the problem of selecting the rolling stock for the implementation of tasks in rail transport with limited resources. The fourth chapter discusses the rules and procedures used in the management of wagons, and in chapter five in the management of traction vehicles. The sixth chapter presents the mathematical model of selection of rolling stock for tasks including general assumptions and elements like representation and parameterization of railway network structure and identification of transport tasks. Decision variables, indicators of assessment the quality of solutions and boundary conditions were defined.

The second part of the dissertation concerns utilitarian considerations. The seventh chapter presents the procedure of method selection of rolling stock for tasks. Calculation algorithms for these problems are presented. The eighth chapter is a description of computer implementation of selection of rolling stock for tasks method in the form of the DST application. The application allows you to allocate a locomotive and wagons to perform the task, select the shortest route of transport and define the conditions of transport. The ninth chapter presents the case studies of the selection of rolling stock for tasks method using a computer application for a selected tasks.

**Keywords:** railway traffic organization, selection of rolling stock for tasks, limited resources, railway transport, transportation of freight

## SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE .....	5
ABSTRACT .....	6
SPIS TREŚCI .....	7
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI UŻYWANYCH W PRACY .....	10
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH POJĘĆ UŻYWANYCH W PRACY .....	12
WSTĘP	17
1. WPROWADZENIE DO PROBLEMU BADAWCZEGO - SPECYFIKA ORGANIZACJI PRACY TRANSPORTU KOLEJOWEGO .....	21
1.1. Organizacja i zasady ruchu w transporcie kolejowym .....	21
1.1.1. Organizacja towarowych przewozów kolejowych .....	21
1.1.2. Zasady ruchu kolejowego .....	24
1.2. Problematyka doboru taboru do realizacji zadań przewozowych w transporcie kolejowym w literaturze .....	27
1.3. Zagadnienia planowania drużyn trakcyjnych dla obsługi pociągów towarowych .....	32
1.4. Podsumowanie – obszary badawcze a metodologia rozwiązania rozprawy .....	36
2. CEL I TEZA ROZPRAWY .....	38
3. NARZĘDZIA I METODY DOBORU TABORU W PRZEWOZACH ŁADUNKÓW W TRANSPORCIE KOLEJOWYM – UJĘCIE LITERATUROWE .....	44
3.1. Zagadnienia doboru taboru i planowania drużyn w realizacji zadań .....	44
3.1.1. Dobór taboru do zadań w aspekcie obiegowania .....	44
3.1.2. Planowanie pracy załóg do obsługi taboru przy realizacji zadań .....	48
3.2. Algorytmy stosowane do rozwiązywania problemów doboru środków do zadań .....	49
3.2.1. Uwagi ogólne .....	49
3.2.2. Branch and Bound .....	51
3.2.3. Algorytmy genetyczne .....	53
3.2.4. Symulowane wyżarzanie .....	55
3.3. Wnioski wynikające z analizy stanu wiedzy .....	57
4. GOSPODARKA WAGONAMI TOWAROWYMI W KONTEKŚCIE OBROTU TABOREM .....	58
4.1. Gospodarka wagonami towarowymi .....	58
4.2. Terminy stosowane przy gospodarce wagonowej .....	62
4.3. Wagony towarowe prywatne .....	63
4.3.1. Uwagi ogólne .....	63
4.3.2. Zamawianie wagonów .....	63
4.3.3. Wykaz wagonów w składzie pociągu .....	64
4.3.4. Wagony podstawiane na punkt ładunkowy .....	64
4.3.5. Wagony zabierane z punktu ładunkowego .....	65

4.4.	Mierniki ruchu towarowego .....	65
5.	GOSPODARKA POJAZDAMI TRAKCYJNYMI .....	67
5.1.	Założenia ogólne dotyczące gospodarki pojazdami trakcyjnymi.....	67
5.2.	Rodzaje pracy pojazdów trakcyjnych.....	68
5.3.	Zasady eksploatacji pojazdów trakcyjnych .....	70
5.4.	Planowanie pracy pojazdów trakcyjnych .....	72
5.4.1.	Wykresy pracy pojazdów trakcyjnych .....	72
5.4.2.	Metody planowania pracy pojazdów trakcyjnych.....	73
5.4.3.	Ograniczenia w planowaniu pracy pojazdów trakcyjnych.....	75
5.4.4.	Zasady rozliczania czasu pracy i gotowości.....	76
5.5.	Obrót pojazdu trakcyjnego .....	77
5.5.1.	Całkowity obrót pojazdu trakcyjnego .....	77
5.5.2.	Eksploatacyjny obrót pojazdu trakcyjnego .....	79
5.5.3.	Skrócony obrót pojazdu trakcyjnego.....	79
5.6.	Mierniki wykorzystania pojazdów trakcyjnych .....	80
5.6.1.	Uwagi ogólne .....	80
5.6.2.	Przeciętny przebieg dobowy pojazdu trakcyjnego .....	80
5.6.3.	Przeciętna liczba godzin pracy pojazdu trakcyjnego w ciągu doby .....	82
5.6.4.	Przeciętna masa wagonów w składzie pociągu i przeciętne obciążenie pojazdu trakcyjnego .....	83
6.	MODEL DECYZYJNY DOBORU TABORU DO REALIZACJI ZADAŃ PRZEWOZOWYCH PRZY OGRANICZONYCH ZASOBACH .....	84
6.1.	Założenia ogólne .....	84
6.2.	Identyfikacja elementów modelu .....	85
6.3.	Parametry modelu.....	86
6.3.1.	Ustalenie struktury sieci kolejowej .....	86
6.3.2.	Charakterystyki elementów sieci kolejowej.....	88
6.3.3.	Identyfikacja zadań przewozowych .....	89
6.3.4.	Tabor i jego charakterystyki.....	90
6.3.5.	Taryfa towarowa przewoźnika .....	91
6.4.	Opis zapotrzebowania na wagony .....	92
6.5.	Opis parametrów eksploatacyjnych stacji w funkcji ich zdolności przerobowych .....	95
6.6.	Wielkości poszukiwane w problemie doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach.....	98
6.7.	Wskaźniki oceny jakości rozwiązania doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach.....	101
6.8.	Ograniczenia stosowane w modelu doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach.....	102
7.	METODA ROZWIĄZANIA PROBLEMU BADAWCZEGO WRAZ Z ALGORYTMEM .....	114
7.1.	Procedura metody .....	114
7.2.	Algorytm metody .....	118
8.	IMPLEMENTACJA METODY W POSTACI APLIKACJI DST .....	121



8.1.	Opis programu DST .....	121
8.2.	Funkcjonalności aplikacji DST .....	122
8.3.	Dane wejściowe do programu DST o charakterze stałym.....	124
8.4.	Funkcjonowanie programu DST .....	126
8.5.	Efekty pracy aplikacji DST .....	129
9.	WERYFIKACJA METODY DOBORU TABORU DO ZADAŃ NA DANYCH RZECZYWISTYCH Z ZASTOSOWANIEM APLIKACJI DST	133
9.1.	Uwagi ogólne .....	133
9.2.	Opis danych wprowadzonych do aplikacji DST .....	134
9.2.1.	Ustalenie struktury sieci kolejowej .....	134
9.2.2.	Dane dotyczące zadań przewozowych .....	136
9.2.3.	Dane dotyczące taboru .....	137
9.2.4.	Dane dotyczące taryfy towarowej .....	139
9.3.	Wyniki – dobór taboru do realizacji zadań na danych rzeczywistych .....	140
9.3.1.	Dobór lokomotywy i wagonów do realizacji zadania przewozowego	140
9.3.2.	Wyznaczenie trasy przewozu ładunków .....	143
9.3.3.	Określenie warunków przewozu dla poszczególnych zadań .....	146
	PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....	147
	BIBLIOGRAFIA.....	150
	ZAŁĄCZNIK 1 – OPIS SŁOWNIKÓW PROGRAMU DST .....	164
	ZAŁĄCZNIK 2 – WYNIKI PRACY PROGRAMU DST DLA PRZEWOZU KAMIENIA	170
	ZAŁĄCZNIK 3 – WYNIKI PRACY PROGRAMU DST DLA PRZEWOZU MEBLI...	175

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI UŻYWANYCH W PRACY

<i>brtkm</i>	- bruttotonokilometry
<i>DST</i>	- nazwa aplikacji opracowanej na potrzeby realizacji rozprawy
<i>ERTMS</i>	- Europejski System Zarządzania Ruchem Kolejowym (ang. European Rail Traffic Management System – ERTMS)
<i>ETCS</i>	- Europejski System Sterowania Pociągami (ang. European Train Control System – ETCS)
<b>FOL</b>	- wektor charakterystyk odcinków linii kolejowych
<b>FL</b>	- wektor charakterystyk lokomotyw
<b>FPE</b>	- wektor charakterystyk punktów eksploatacyjnych
<b>FSK</b>	- charakterystyki odcinków sieci kolejowej
<b>FST</b>	- charakterystyki taboru
<b>FW</b>	- wektor charakterystyk wagonów
<b>GSK</b>	- struktura sieci kolejowej
<i>IRJ</i>	- indywidualny rozkład jazdy
<i>lok</i>	- numer lokomotywy
<i>MC</i>	- przepisy o wzajemnym użytkowaniu wagonów towarowych w komunikacji międzynarodowej w Europie Wschodniej (ros. Правила Пользования Вagonами – PPW)
<b>MDTDP</b>	- model doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach
<i>nhm</i>	- numer poszczególnego rodzaju towarów
<i>NHM</i>	- zharmonizowany spis towarów (Nomenclature harmonisee des marchandises - NHM)
<i>nol</i>	- numer odcinka linii kolejowej
<b>OL</b>	- zbiór odcinków linii kolejowych
<i>pe</i>	- numer punktu eksploatacyjnego
<b>PE</b>	- zbiór punktów eksploatacyjnych
<i>PKP</i>	- Polskie Koleje Państwowe
<i>PLK</i>	- Polskie Linie Kolejowe
<i>pojazdokm</i>	- pojazdokilometry
<i>RIV</i>	- przepisy o wzajemnym użytkowaniu wagonów towarowych w komunikacji międzynarodowej (wł. Regolamento Internazionale dei Veicoli - RIV)
<i>RRJ</i>	- roczny rozkład jazdy
<i>SKRJ</i>	- System Konstrukcji Rozkładu Jazdy
<b>ST</b>	- tabor
<b>TTP</b>	- wektor charakterystyk taryfy przewozowej
<b>TTP</b>	- taryfy przewozowe
<i>UIC</i>	- Międzynarodowy Związek Kolei (fr. Union Internationale des Chemins de fer – UIC)
<i>wag</i>	- numer wagonu
<i>zpd</i>	- pojedyncze zadanie przewozowe

- ZPD** - wektor charakterystyk zadań przewozowych  
**ZPD** - zadania przewozowe  
ZRJ - zastępczy rozkład jazdy

Oznaczenia w rozprawie:

- macierze/ wektory – duże litery, pogrubione, proste np.: **A**,  
zbiory – duże litery, pogrubione, kursywa np.: **A**,  
liczność zbiorów – duże litery, kursywa np.: *A*,  
zmiennie – małe litery, kursywa, np.: *a*.

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH POJĘĆ UŻYWANYCH W PRACY

Bocznica kolejowa – droga kolejowa połączona z linią kolejową i służąca do wykonywania załadunku i wyładunku wagonów, wykonania czynności utrzymaniowych pojazdów kolejowych, postoju pojazdów kolejowych, przemieszczania i włączania pojazdów kolejowych do ruchu po sieci kolejowej. W zależności od miejsca włączenia do sieci kolejowej bocznice dzielą się na stacyjne oraz szlakowe [14].

CIM – przepisy ujednolicone umową międzynarodowego przewozu towarów kolejami [14].

Długość pociągu – długość składu pociągu określona w metrach. Uzależniona jest od rodzaju pociągu, istniejących warunków technicznych na stacjach i szlakach oraz typu hamulców. Długość w przypadku pociągów towarowych nie powinna być większa od długości użytecznych torów głównych na stacjach [14].

Długość pojazdu ze zderzakami – całkowita długość pojazdu szynowego, obliczana jako odległość dwóch naprzeciwległych powierzchni czołowych zderzaków. Dla pojazdów ze sprzęgiem samoczynnym jako długość całkowitą pojazdu podaje się tzw. długość ze sprzęgami [14].

Drużyna trakcyjna – zespół pracowników stanowiących obsadę pojazdu trakcyjnego. W zależności od prędkości jazdy i wyposażenia pojazdu trakcyjnego w urządzenia kontrolujące czujność maszynisty oraz urządzenia radiołączności pociągowej może być jednoosobowa (maszynista) lub dwuosobowa (maszynista i pomocnik maszynisty) [14].

Dysponent – osoba lub podmiot, który będąc właścicielem danego pojazdu lub mając prawo do korzystania z niego, wykorzystuje ten pojazd jako środek transportu i figuruje w krajowym rejestrze pojazdów jako dysponent. W niektórych dokumentach prawnych dysponent określany jest jako „posiadacz” [14].

Dyżurny ruchu – osoba bezpośrednio związana z prowadzeniem i bezpieczeństwem ruchu kolejowego. Zasadniczym zadaniem dyżurnego ruchu jest prowadzenie ruchu pociągów pasażerskich i towarowych w obrębie stacji lub innego posterunku ruchu. Do zadań dyżurnego ruchu należy też koordynowanie pracy manewrowej na stacji, prowadzenie i nadzorowanie pracy stacji rozrządowej, a także nadzorowanie pracy związanej z formowaniem, sprawdzaniem i wyprawianiem pociągów [14].

Front ładunkowy – punkt ładunkowy lub jego część wyodrębniona ze względu na obsługiwane w niej rodzaje środków przewozowych, rodzaje ładunków oraz ich postacie transportowe. Obejmuje miejsce wykonywania czynności ładunkowych wraz z całym zespołem niezbędnych środków technicznych i organizacyjnych. Wielkość frontu ładunkowego może być wyrażana wielkością terenu, na którym odbywają się prace ładunkowe, długością linii, wzdłuż której są one wykonywane, liczbą równocześnie naładowywanych i wyładowywanych środków przewozowych lub liczbą równocześnie eksploatowanych maszyn ładunkowych, urządzeń ładunkowych i ludzi [14].

Identyfikator literowy typu (serii) pojazdu kolejowego – zestaw dużych i małych liter oraz cyfr, określających cechy konstrukcyjne i przeznaczenie pojazdu kolejowego [14].

Infrastruktura kolejowa – ogół obiektów i urządzeń kolejowych w ich wzajemnych powiązaniu, umożliwiające bezpieczny, regularny i ciągły ruch pociągów, dostosowany do potrzeb podróży oraz nadawców towarów [14].

Interoperacyjność – zdolność systemu kolei do zapewnienia bezpiecznego i nieprzerwanego przejazdu pociągów, które spełniają wymagania wspólnotowe dla taboru na sieci linii kolejowych odpowiadających wymaganiom wspólnotowym. Zdolność ta zależy od warunków prawnych, technicznych oraz eksploatacyjnych, które muszą być spełnione, aby możliwe było sprostanie wymaganiom zasadniczym [14], [142], [144], [145].

Linia kolejowa - tory kolejowe wraz z zajętymi pod nie gruntami oraz przyległy pas gruntu, a także budynki, budowle i urządzenia przeznaczone do prowadzenia ruchu kolejowego, wraz z zajętymi pod nie gruntami [162].

Liniowy punkt ładunkowy – punkt ładunkowy obejmujący tory ładunkowe, tory ogólne i bocznicę, na których prace manewrowe wykonuje lokomotywa pociągowa [14].

Logistyka kolejowa – kształtowanie optymalnych strumieni materiałów i związanych z nimi strumieni informacji oraz procesów wykorzystujących kolejową infrastrukturę punktową i liniową oraz suprastrukturę kolejową w celu zaspokojenia potrzeb przewozowych na danym obszarze, z zachowaniem racjonalnych kosztów i wymaganego poziomu obsługi [14].

Lokomotywa – pojazd trakcyjny przeznaczony do ciągnięcia lub popychania innych pojazdów, niemających pomieszczenia dla pasażerów i ładunku [14].

Ładownia – tor kolejowy użytku publicznego, odgałęziający się od toru głównego na szlaku, przeznaczony do podstawienia pod naładunek lub wyładunek wagonów towarowych oraz do ich zabierania [14].

Masa hamująca – wielkość umowna stosowana do określania zdolności hamowania pojazdu/pociągu. Wielkość ta wiąże się z siłą, z jaką jest w stanie zahamować pojazd/pociąg o danej masie. Wartości masy równej 1 t odpowiada wartość siły hamującej pojazdu wskazana jest na jego ścianach bocznych, ostoi lub tablicy przestawczej hamulca [14].

Masa ogólna pociągu – suma mas pojazdów kolejowych w składzie pociągu wraz z ładunkiem [14].

Masa własna – suma mas wszystkich części składowych pojazdu szynowego bez uwzględnienia masy materiałów eksploatacyjnych [14].

Nacisk zestawu kół na szyny – część masy pojazdu przenoszona na szyny przez pojedynczy zestaw kołowy. Masa pojazdu nie jest rozłożona równomiernie na wszystkie zestawy kołowe. Nacisk zestawu kół na szyny, najbardziej obciążonego przy całkowitej masie pojazdu (masa służbowa wraz z masą przewożonych ładunków i pasażerów), nazywa się największym naciskiem zestawu kół na szyny [14].

Obieg składu, lokomotywy – zbiór pociągów (relacji), które dany skład (lokomotywa) obsługuje w okresie od odjazdu tego składu ze stacji początkowej (macierzystej) do

ponownego odjazdu tego samego składu (lokomotywy) z tej samej stacji z pociągiem o tym samym numerze [14].

Odcinek linii kolejowej – część linii kolejowej zawarta między stacjami węzłowymi albo między punktem początkowym lub końcowym linii kolejowej i najbliższą stacją węzłową [162].

Opłata za dostęp do infrastruktury – opłata ponoszona przez przewoźników kolejowych na rzecz zarządców infrastruktury udostępniających linie kolejowe do realizacji przewozów [14].

Pociąg – skład wagonów lub innych pojazdów kolejowych sprzęgniętych z czynnym pojazdem trakcyjnym lub sam pojazd trakcyjny – osygnalizowany, obsadzony przez drużynę pociągową, przygotowany do jazdy lub znajdujący się w ruchu [14].

Pociąg towarowy – pociąg przeznaczony do przewozu ładunków [14].

Posterunek ruchu – obiekt kolejowy służący do bezpiecznego i sprawnego prowadzenia ruchu kolejowego [14].

Przesyłka towarowa - rzeczy przyjęte do przewozu na podstawie jednego listu przewozowego lub innego dokumentu przewozowego, zwanego „listem przewozowym” [161].

Przewoźnik kolejowy – podmiot, który korzystając z udostępnianej infrastruktury kolejowej, realizuje przewozy towarów i/lub pasażerów z zastrzeżeniem, że ten podmiot musi zapewnić trakcję, czyli dysponować pojazdami trakcyjnymi [14].

Punkt eksploatacyjny – element punktowy linii kolejowej, którego zadaniem jest obsługa pasażerów i/lub ładunków oraz prowadzenie w sposób bezpieczny i punktualny ruchu pociągów. Punkty eksploatacyjne dzielą się na posterunki ruchu i punkty ekspedycyjne [14].

Punkt ładunkowy – wyposażony w urządzenie ładunkowe miejsce, w którym dokonywane są czynności obsługi ładunkowej środków przewozowych [14].

Sieć kolejowa – układ połączonych ze sobą linii kolejowych będących własnością zarządcy infrastruktury lub zarządzanych przez zarządcę infrastruktury [162].

Stacja kolejowa – posterunek ruchu następczy zapowiadawczy, w obrębie którego, oprócz toru głównego zasadniczego, znajduje się co najmniej jeden tor główny dodatkowy, a pociągi mogą rozpoczynać i kończyć swój bieg, krzyżować się i wyprzedzać, jak również zmieniać skład lub kierunek jazdy [162].

Stacja ładunkowa – stacja na której odbywa się nadawanie (ładowanie) i odbieranie (rozładowywanie) przesyłek towarowych [14].

Stacja manewrowa – stacja towarowa wykonująca zadania w zakresie obsługi stacyjnych i liniowych punktów ładunkowych (stacji obsługiwanych) znajdujących się w jej rejonie ciężenia, a także zadania związane z przyjmowaniem, rozrządzaniem, zestawianiem i wyprawianiem pociągów towarowych. Do wykonania tych zadań stacja ma przydzieloną normowaną liczbę lokomotyw manewrowych z drużynami manewrowymi [14].

Stacja rozrządowa – towarowa stacja manewrowa przeznaczona do rozrządzania składów pociągów towarowych oraz do zestawiania pociągów towarowych do innych stacji

rozrządowych oraz manewrowych. Stacje rozrządowe powstają zwykle w miejscach dużego naładunku lub wyładunku wagonów: w okręgach przemysłowych, portach, dużych ośrodkach miejskich. W tych punktach zbiegają się duże potoki wagonów. Stacje rozrządowe w ostatnich latach tracą na znaczeniu ponieważ zmniejsza się udział przewozów w systemie rozproszonym do przewozów w systemie zwartym [14].

Szlak kolejowy – odcinek drogi kolejowej między dwoma sąsiednimi punktami zapowiadawczymi (stacjami, mijankami, rozgałęzieniami), dzieli się na odcinki zwane odstępami [162].

Trasa pociągu – określenie, w rozkładzie jazdy, położenia pociągu w funkcji czasu jazdy, służące do oceny wykorzystania zdolności przepustowej linii kolejowej [130].





## WSTĘP

Zagadnienie doboru środków do realizacji zadań ma bardzo szerokie znaczenie. Pierwszym aspektem, którego dotyczy to jest określenie rodzaju środków, które będą dobierane. W tej materii należy rozważać środki techniczne, które mają wykonać zadania (np. rodzaj i liczbę maszyn ładunkowych czy rodzaj opakowania), środki ludzkie (np. niezbędną liczbę operatorów, którzy są wymagani do obsługi wydobywania węgla w danej kopalni) czy środków organizacyjnych (np. różnego rodzaju rozwiązań legislacyjnych czy rozkładu jazdy). Drugim aspektem jest z kolei różnorodność zadań. Może nim być, jak już wspomniano powyżej, wydobywanie konkretnej ilości węgla w kopalni czy przewiezienie tego wydobytego węgla z kopalni do odbiorcy finalnego. Łącząc rodzaj środka z rodzajem zadania otrzymujemy sformułowanie problemu doboru środków do zadań. Dobierać możemy jeden rodzaj środka do jednego rodzaju zadania lub tworzyć inne kombinacje. Im będzie ona bardziej skomplikowana tym złożoność obliczeniowa będzie większa. W sferze transportu najczęściej rozważania w zakresie analizowanego problemu dotyczą doboru taboru do realizacji zadań oraz doboru załóg do wykonania konkretnych zadań. W dalszej części niniejszej dysertacji uwaga zostanie zwrócona głównie na dobór środków technicznych do wykonania określonych czynności.

Zagadnienie doboru taboru do realizacji zadań przewozowych w systemach transportowych [81], [113] jest złożonym problemem decyzyjnym. Determinowane jest to wieloma aspektami. Pierwszym z nich jest wielorakość zadań – np. przewóz różnych grup towarowych, realizacja zadania tzw. zwózki bądź dostawy, doborem tras itp.. Kolejnym aspektem jest mnogość typów taboru stosowanych przez różne gałęzie transportu. Należy zauważyć, że problem ten został rozwiązany m.in. poprzez opracowanie technologii transportu intermodalnego, gdzie naczynie przewozowe jest jednakowe dla wszystkich gałęzi, natomiast różni się gałąź transportu na poszczególnych odcinkach drogi przebiegu. Przeważnie celem przydziału jest wyznaczenie zadań do realizacji przez poszczególne tabor, natomiast miernikiem oceny rozwiązania jest koszt i czas realizacji danego zadania.

Z punktu widzenia modelowania matematycznego problem doboru taboru do zadań polega na udzieleniu odpowiedzi na pytanie: ile pojazdów konkretnego rodzaju o konkretnych parametrach należy zadysponować do realizacji określonych zadań przewozowych o określonych parametrach. Podczas realizacji tego procesu należy uwzględnić szereg ograniczeń, które pozwolą na uzyskanie rozwiązania dopuszczalnego. Dodatkowo należy poszukiwać rozwiązania racjonalnego, dla którego wartość wskaźnika oceny jakości

rozwiązania (zazwyczaj koszt w postaci zarówno pieniężnej jak i niepieniężnej (np. wyrażony w postaci czasu czy odległości)). Jest to szczególnie ważne z punktu widzenia funkcjonowania przedsiębiorstwa realizującego przewozu, którego nadrzędnym celem jest osiągnięcie jak najwyższego zysku. Zatem należy stwierdzić, że problem doboru środków do zadań jest jednym z problemów optymalizacyjnych.

Zagadnienia doboru taboru do realizacji zadań obecne są w każdej gałęzi transportu, która może realizować przemieszczanie ładunków. Jedną z nich jest transport kolejowy, który odgrywa istotną rolę zarówno przy przewozach pasażerskich jak i przy przewozach towarowych. Postrzegany jest on jako rozwiązanie narastających problemów ekologicznych i przewozowych integrującej się Europy [20], [54]. W związku z tym jednym z priorytetowych zadań polityki gospodarczej i transportowej państw europejskich powinno być ożywienie działalności sektora transportu kolejowego, szczególnie w obszarze towarowych przewozów kolejowych. W tym aspekcie głównym celem Komisji Europejskiej staje się stworzenie wspólnego rynku kolejowego bez ograniczeń politycznych, gospodarczych i technicznych [52], [140], [162].

W niniejszej rozprawie głównym obszarem zainteresowania jest analiza ruchu towarowego, szczególnie w aspekcie planowania i doboru taboru (wagonów oraz lokomotyw) do realizacji przewozu ładunków po sieci kolejowej, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów ograniczenia liczebności taboru będącego w dyspozycji przewoźnika kolejowego (ew. dysponenta wagonów czy lokomotyw). Należy zauważyć, że odpowiedni dobór taboru nie jest możliwy bez znajomości parametrów linii kolejowej, po której przewóz ten będzie realizowany. W związku z tym na potrzeby realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej poprzez dobór taboru do realizacji zadań rozumie się:

- dokonanie przydziału kolejowych pojazdów dedykowanych do ruchu towarowego: lokomotyw oraz wagonów do realizacji zdefiniowanego zadania przewozowego, przy uwzględnieniu faktu, że liczebność taboru jest ograniczona,
- trasowanie, uruchomienie w związku z realizacją zdefiniowanego zadania przewozowego, pociągu po sieci kolejowej,
- określenie warunków przewozu dla zdefiniowanego zadania przewozowego uwzględniającego przydzielony tabor (lokomotywy i wagony) i trasę.

Rozprawa została podzielona na dwie części i składa się z dziewięciu rozdziałów. Pierwsza część rozprawy dotyczy rozważań teoretyczno-badawczych dotyczących problemu doboru taboru (lokomotyw i wagonów) do realizacji zadań przy ograniczonych zasobach.

W rozdziale pierwszym przedstawiono wprowadzenie do problematyki badawczej dotyczącej specyfiki organizacji pracy transportu kolejowego, ze szczególnym uwzględnieniem przewozu ładunków. Omówiono reguły organizacji towarowych przewozów kolejowych oraz zasady ruchu w transporcie kolejowym. Przeprowadzono przegląd badań realizowanych przez krajowe i zagraniczne ośrodki naukowe z obszaru problematyki doboru taboru do realizacji zadań przewozowych w transporcie kolejowym. Ponadto scharakteryzowano zagadnienie planowania pracy drużyn trakcyjnych przy realizacji przewozów towarowych. Jest to bardzo istotny problem, który oddziałuje na problem doboru taboru do zadań. W końcowej części rozdziału przedstawiono wnioski płynące z przeglądu rozwiązań oraz omówiono schemat realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej.

W rozdziale drugim wskazano cele rozprawy: naukowy oraz użytkowy. Na podstawie wniosków płynących z przeglądu literatury sformułowano tezę rozprawy oraz jej zasadniczy cel. Ponadto omówione zostały kroki pozwalające na zrealizowanie celu zasadniczego oraz układ rozprawy.

Przedmiotem rozdziału trzeciego jest charakterystyka metod i narzędzi stosowanych do rozwiązania problemu doboru taboru do realizacji zadań w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach. Zaprezentowano ogólne sformułowanie zagadnienia przydziału z wykorzystaniem formalizmów uogólnionego zadania przydziału (*GAP – Generalized Assignment Problem*). Szczególną uwagę zwrócono na problematykę doboru taboru w aspekcie obiegowania. Ponadto pod uwagę wzięto problem planowania pracy załóg realizujących zaplanowane zadania przewozowe. Omówiono także algorytmy najczęściej stosowane do rozwiązywania problemów doboru środków do zadań. Omówiono metodę Branch and Bound, algorytmy genetyczne oraz algorytm symulowanego wyżarzania.

W rozdziale czwartym omówiono zasady i procedury stosowane przy gospodarowaniu wagonami towarowymi. Scharakteryzowano rodzaje wagonów, które mogą być wykorzystane do transportu ładunków wraz ze wskazaniem ich przeznaczenia i interpretacji oznaczeń. Scharakteryzowano pojęcia, które są specyficzne z punktu widzenia gospodarki wagonami. Omówiono zasady funkcjonowania wagonów towarowych prywatnych, które mogą zostać wypożyczone lub wdzierżawione od przewoźnika (dysponenta) – wskazano procedurę ich zamawiania, podstawowe dokumenty (m.in. wykaz wagonów w składzie pociągu) oraz sposób podstawiania i zabierania wagonów z punktów ładunkowych. Omówiono także podstawowe mierniki, które opisują efektywność wykorzystania wagonów.

W rozdziale piątym przedstawiono założenia ogólne dotyczące gospodarowania pojazdami trakcyjnymi. Wskazano zadania oraz sposób gospodarowania pojazdami trakcyjnymi.

Scharakteryzowano rodzaje pracy pojazdów trakcyjnych oraz ogólne wytyczne dotyczące zasad ich eksploatacji. Istotnym elementem są także zagadnienia dotyczące planowania pracy pojazdów trakcyjnych. W rozdziale omówiono problematykę przygotowywania wykresów pracy pojazdów trakcyjnych. Zaprezentowano metody planowania pracy pojazdów i ograniczenia z nimi związane, a także zasady rozliczania czasu pracy i gotowości. Przytoczono najważniejszy miernik pracy pojazdów trakcyjnych – obrót pojazdu trakcyjnego, w podziale na obrót całkowity, eksploatacyjny i minimalny. Omówiono także pozostałe mierniki wykorzystania pojazdów.

Rozdział szósty prezentuje model decyzyjny doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach. Omówiono założenia, które przyjęto na potrzeby opracowania modelu. Zidentyfikowano i scharakteryzowano sześć elementów modelu. Zdefiniowano zmienne decyzyjne, które są wielkościami poszukiwanymi oraz cztery wskaźniki oceny jakości rozwiązania. Przedstawiono także ograniczenia stosowane w modelu doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach.

Druga część rozprawy dotyczy rozważań utylitarnych.

W rozdziale siódmym przedstawiono procedurę autorskiej metody doboru taboru do realizacji zadań w kolejowym transporcie towarowym przy ograniczonych zasobach. Przedłożono procedurę metody oraz heurystyczne algorytmy obliczeniowe rozwiązania.

Rozdział ósmy stanowi opis implementacji komputerowej metody doboru taboru do zadań w postaci autorskiej aplikacji DST. Aplikacja pozwala na dokonanie przydziału lokomotywy i wagonów do realizacji zadania, wybór najkrótszej trasy przewozu oraz określenie warunków przewozu. W treści przedstawiono funkcjonalności aplikacji, zakres danych wejściowych oraz procedurę działania aplikacji.

W rozdziale dziewiątym zaprezentowano weryfikację metody doboru taboru do zadań na danych rzeczywistych z zastosowaniem aplikacji DST. Rozważono dwa przykłady: przewóz kamienia z Gralewa do Wrocławia Brochowa oraz przewóz mebli w paczkach z Olsztyna Głównego do Gliwic. Opisano dane wejściowe niezbędne do rozwiązania problemu oraz przedstawiono wyniki pracy programu.

Ostatnim rozdziałem jest podsumowanie i wnioski, w którym zawarto konkluzje dotyczące realizacji rozprawy.

# **1. WPROWADZENIE DO PROBLEMU BADAWCZEGO - SPECYFIKA ORGANIZACJI PRACY TRANSPORTU KOLEJOWEGO**

## **1.1. Organizacja i zasady ruchu w transporcie kolejowym**

### **1.1.1. Organizacja towarowych przewozów kolejowych**

Od zawsze transport kolejowy był predysponowany do przewozów przede wszystkim ładunków masowych w komunikacji krajowej oraz międzynarodowej [60] między ośrodkami o dużej koncentracji (np. kopalniami czy rafineriami) i zaniku potoków ładunków (np. elektrowniami czy portami) na średnie i duże odległości oraz do przewozu pasażerów w relacjach międzynarodowych, regionalnych oraz przede wszystkim na terenach aglomeracyjnych [62], [64], [66], [157]. Tematyka niniejszej dysertacji dotyczy realizacji przewozów towarowych. W związku z tym rozważania będą prowadzone głównie w odniesieniu do tego rodzaju przewozów kolejowych.

Kolejowe przewozy towarowe powinny być postrzegane jako jeden z elementów systemu logistycznego. Pozwalają one na transport różnego rodzaju dóbr (w stanie stałym, płynnym czy gazowym) od różnego rodzaju nadawców (producentów, dostawców) do różnego rodzaju odbiorców (producentów, odbiorców końcowych) [55], [114], [167]. W systemie tym należy systematycznie dążyć do zwiększania jego efektywności [92], [121], m.in. poprzez zastosowanie różnego rodzaju metod optymalizacyjnych [16]. Obszary zagadnień, gdzie poszukuje się poprawy rozwiązań dotyczą różnych jego działań: m.in. planowania pracy drużyn trakcyjnych obsługujących pociągi [37] czy doskonalenia łańcuchów dostaw z punktu widzenia globalnego [72], [141], [151]. Należy zauważyć zatem, że przewiduje się działania, które stanowią szansę dla rozwoju towarowego transportu kolejowego [85].

Wysokość kosztów transportu kolejowego [93] oraz dynamiczny rozwój innych gałęzi transportu sprawia, iż decydenci kolejowi odpowiedzialni za transport kolejowy podejmują działania pozwalające na zwiększenie zainteresowania transportem kolejowym [69]. Dotyczy to przede wszystkim wdrażania innowacyjnych rozwiązań, które pozwolą na właściwe dostosowanie się kolei do oczekiwań rynku, w tym przede wszystkim do oczekiwań klienta [101], [123], [166]. Rozwiązania te dotyczą zarówno obszarów w zakresie infrastruktury transportu kolejowego, środków transportu czy infrastruktury dodatkowej pozwalającej na kompleksową obsługę klienta, jak i organizacji ruchu kolejowego.

Tematyka niniejszej dysertacji wpisuje się w problematykę organizacji ruchu kolejowego, a szczególnie rzecz ujmując – organizacji towarowych przewozów kolejowych. Proces organizacji ruchu towarowego dotyczy szerokiego spectrum zagadnień, których w większości istotnym są zlecenia klientów. Wśród procesów wspomagających opracowanie organizacji kolejowego ruchu towarowego należy wyróżnić [65]:

- planowanie przemieszczania ładownych i próżnych składów pociągów – proces ten pozwala na określenie potrzeb związanych z: zarządzaniem taborem, drużynami trakcyjnymi, organizowaniem planów pracy stacji – rozformowaniem składu pociągu [83], [89],
- **dobór taboru do realizacji zdań – proces ten pozwala na dobranie właściwego rodzaju wagonu i jego liczebności do realizacji konkretnej potrzeby przewozowej, a także dobór lokomotywy do uciążenia zaprogramowanej liczby wagonów wypełnionych ładunkiem; istotnym aspektem tego problemu jest uwzględnienie ograniczenia liczebności taboru,**
- planowanie trasy przewozu, po której realizowane będzie zdefiniowane zadanie przewozowe – proces ten polega na identyfikacji elementów infrastruktury transportu kolejowego, po których realizowany będzie przewóz według kryterium wskazanego przez decydentów (minimalizacja czasu, minimalizacja długości drogi),
- planowanie wykorzystania drużyn trakcyjnych – proces ten pozwala na właściwe zaplanowanie i wykorzystanie drużyn trakcyjnych,
- planowanie obiegów pojazdów trakcyjnych – proces ten pozwala na odpowiednie zaplanowanie i wykorzystanie pojazdów trakcyjnych w oparciu o rozkład jazdy, a także uwzględnia czynności utrzymaniowo – naprawcze wynikające z dokumentacji systemu utrzymania,
- tworzenie planów pracy stacji – proces ten pozwala na przygotowanie założeń technologicznych pracy stacji,
- tworzenie planów pracy drużyn manewrowych – proces ten pozwala na właściwe zabezpieczenie obsady drużyn manewrowych, które są niezbędne do wykonania prac związanych z obsługą przewozu ładunków,
- przejście składów pociągów przez stacje rozrządowe lub manewrowe – proces ten pozwala na właściwe zaplanowanie czynności realizowanych na poszczególnych stacjach od momentu przyjazdu pociągu do momentu jego odjazdu; obejmuje on

czynności rozrządzania składu pociągu od momentu pojawienia się go na torach przyjazdowych do zestawienia składu pociągu na torach odjazdowych,

- zarządzanie wagonami – proces ten obejmuje wszystkie czynności związane z utrzymaniem i wykorzystaniem taboru wagonowego przez przewoźnika; proces ten trwa od momentu przyjęcia wagonu do eksploatacji do momentu jego wycofania, uwzględnia się jego czynności utrzymaniowo – naprawcze,
- zarządzanie taborom trakcyjnym – proces ten zawiera wszystkie czynności związane z utrzymaniem i wykorzystaniem taboru trakcyjnego u przewoźnika. Podobnie jak proces zarządzania wagonami rozpoczyna się przyjęciem taboru do eksploatacji, a kończy jego wycofaniem,
- interoperacyjność ruchu pociągów towarowych, zwłaszcza intermodalnych [84], [155], [156].

Jak wskazano powyżej jednym z istotnych obszarów organizacji ruchu kolejowego w transporcie towarowym jest dobór taboru do realizacji zadań (zapisany wytłuszczonym tekstem powyżej), który jest przedmiotem rozważań w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej. W związku z tym niniejsze rozważania wpisują się w obszar organizacji ruchu kolejowego i jej efekty będą stanowiły wkład do rozwoju tego obszaru badawczego.

Należy także zauważyć fakt, że problem doboru taboru do zadań jest zależny w stosunku do niektórych pozostałych obszarów badawczych organizacji kolejowego ruchu towarowego. Dobór taboru jest powiązany z planowaniem przemieszczania składów ładownych i próżnych. Gdyby nastąpiła sytuacja, że w miejscu rozpoczęcia przewozu nie jest dostępna określona liczba wagonów określonej serii to będzie należało dokonać ich dostarczenia pod naładunek. Po realizacji przewozu wagony albo pozostaną na stacji końcowej w oczekiwaniu na kolejny naładunek bądź zostaną przesłane na inną stację. Dobór taboru do zadań nie jest możliwy bez zaplanowania trasy przewozu, gdyż mogłoby zdarzyć się tak, że do realizacji zadania częściowo przebiegającego po linii spalinowej zadysponowana byłaby tylko lokomotywa elektryczna.

Istotnym jest także powiązanie problemu doboru taboru z planowaniem pracy drużyn trakcyjnych oraz pojazdów trakcyjnych. Praca drużyn trakcyjnych „ograniczona” jest przez szereg aktów prawnych. Główne ograniczenia dotyczą problematyki czasu pracy maszynistów. Aspekt ten powinien być uwzględniony przy dobieraniu taboru do zadań. Temat ten zostanie szerzej omówiony w dalszej części dysertacji. Każda lokomotywownia obsługuje pociągi na określonych odcinkach obsługi trakcyjnej. W związku z tym przy planowaniu przewozu należy przewidzieć odpowiedni czas na zmianę lokomotywy po

przekroczeniu granicy obsługi. Poza tym aspekt ten jest kluczowy z punktu widzenia ograniczonych zasobów – przy ograniczonej ich liczebności racjonalne planowanie obiegu składów jest kluczowe przy terminowości realizacji zlecenia. Temat ten zostanie szczegółowo omówiony w dalszej części rozprawy.

Pociąg towarowy, który będzie realizował przewóz zgłoszonego zadania przewozowego, będzie jechał bezpośrednio od stacji nadania do stacji odbioru lub będzie przejeżdżał przez różne stacje, na których będzie dokonywana jego obróbka. W związku z tym mogą pojawić się czynniki, które spowodują wydłużenie czasu realizacji zadania. Zatem podczas poszukiwania warunków handlowych przy doborze taboru do realizacji zadań należy uwzględnić opracowane plany pracy stacji, plany pracy drużyn manewrowych i plany przejścia składów pociągów przez stacje rozrządowe i manewrowe.

Ostatnia grupa problemów powiązanych z doбором taboru do realizacji zadań dotyczy racjonalnego zarządzania taborem. Pierwsze zagadnienie dotyczy zarządzania wagonami. Podczas dobierania wagonów do realizacji zadania należy sprawdzić, czy na sieci znajduje się odpowiednia liczba wagonów, która może dokonać przewozu. Może okazać się, że aktualnie większość z nich znajduje się podczas realizacji określonego poziomu utrzymania i będą wyłączone z eksploatacji. W związku z tym ich wykorzystanie do realizacji konkretnego zadania będzie niemożliwe. Może też zdarzyć się sytuacja, że nie będziemy w stanie znaleźć ekwiwalentu dla nich, co spowoduje niemożliwość realizacji zlecenia. To samo tyczy się zarządzania pojazdami trakcyjnymi (taborom trakcyjnym). Co więcej istotnym problemem jest interoperacyjność ruchu pociągów towarowych – do realizacji konkretnego zadania, którym jest międzynarodowy przewóz ładunku, powinniśmy zapewnić tabor, który spełnia zasady interoperacyjności.

### **1.1.2. Zasady ruchu kolejowego**

Przemieszczanie ładunków po sieci kolejowej jest zdecydowanie bardziej skomplikowanym procesem niż przemieszczanie pasażerów. Wynika to z szeregu środków ostrożności, jakie należy podjąć w związku z przemieszczaniem niektórych rodzajów ładunków – głównie towarów niebezpiecznych, towarów wysokiego rażenia oraz towarów ponadgabarytowych. Jednym z elementów doboru taboru do realizacji zadań przy ograniczonych zasobach jest określenie warunków handlowych przewozu. Wśród nich znajduje się m.in. czas realizacji przewozu, do którego wyznaczenia niezbędna jest znajomość



zasad organizacji ruchu kolejowego. W związku z tym, w niniejszej rozprawie dokonano przedstawienia najważniejszych zasad, które mają wpływ na jego określanie. Ze względu na to, że największym zarządcą infrastruktury na terenie Polski jest spółka PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. [153], na podstawie zasad obowiązujących u tego zarządcy omówiony zostanie problem organizowania ruchu. Wykaz linii zarządzanych przez PKP PLK znajduje się w Wykazie linii Id-12 [129].

Podstawowym dokumentem opisującym zasady ruchu kolejowego jest Instrukcja o prowadzeniu ruchu pociągów Ir-1 [136]. Dokument ten reguluje przede wszystkim kwestie uruchomienia pociągu i zasady przygotowania go do jazdy (m.in. kwestie obsady pociągu, kwestie prędkości maksymalnej itp. Ponadto opisane są zasady prowadzenia ruchu pociągów na szlaku, w tym także pociągów towarowych do obsługi bocznic. Istotnym elementem są kwestie przyjmowania, wyprawiania i przepuszczania pociągów na posterunkach ruchu. Ze względu na to, że na sieci prowadzone są intensywne prace modernizacyjne to w instrukcji opisano także kwestie zamykania i otwierania torów szlakowych i stacyjnych oraz posterunków ruchu. Istotnym elementem dokumentu jest także szereg wytycznych dotyczących jazdy pociągu, a także postępowanie w razie zagrożenia bezpieczeństwa ruchu i zdarzeń kolejowych (szczegóły postępowania w przypadku wystąpienia poważnych wypadków, wypadków oraz incydentów reguluje instrukcja Ir-8). Na potrzeby prowadzenia ruchu na liniach wyposażonych w system ERTMS/ETCS opracowano oddzielne instrukcje – Ir-1a i Ir-1b.

Z punktu widzenia przewozu towarów istotne są postanowienia instrukcji Ir-10 [128] o przewozie przesyłek nadzwyczajnych. Dokument ten reguluje kwestie bezpieczeństwa ruchu przy przewozie przesyłek nadzwyczajnych (rzeczy i pojazdów, których przewóz może powodować trudności przy przewozie koleją ze względu na kształt, rozmiary, masę, sposób załadowania, sposób rozmieszczenia na wagonie, sposób zabezpieczenia na wagonie, wykorzystane środki przewozowe lub drogę przewozu; z tych przyczyn wymagane jest zachowanie szczególnych warunków techniczno-ruchowych [128]). Jako przykład przesyłki nadzwyczajnej można podać np. szyny o długości przekraczającej 36 m. Instrukcja zawiera zasady organizacji przewozu takiego ładunku, zarówno w komunikacji krajowej jak i międzynarodowej, ale tylko po torach o szerokości normalnej. Dokument ten reguluje także kwestie współpracy między zarządcą infrastruktury oraz przewoźnikiem kolejowym przy przewozie przesyłki nadzwyczajnej.

Drugim istotnym tylko z punktu widzenia przewozu towarów dokumentem jest instrukcja Ir-16 [132] o postępowaniu przy przewozie koleją towarów niebezpiecznych. Celem

opracowania jest ustalenie jednolitych zasad postępowania wszystkich zainteresowanych stron przy przewozie materiałów niebezpiecznych, z uwzględnieniem zapobiegania negatywnym skutkom dla środowiska związanym z realizacją przewozu. Instrukcja przytacza szereg aktów prawnych wyższego rzędu, które regulują przewóz materiałów niebezpiecznych. Prezentuje zasady postępowania przy przyjęciu do przewozu towarów niebezpiecznych oraz przy ich przewozie.

Aby pociąg towarowy mógł wyjechać w trasę, przewoźnik kolejowy musi złożyć u zarządcy infrastruktury wnioski o przydzielenie trasy pociągu (przydzielenie zdolności przepustowej). Postanowienia w zakresie tej kwestii reguluje Regulamin sieci (ang. Network Statement) [135]. Celem tego dokumentu jest określenie zasad współpracy między zarządcą infrastruktury, a przewoźnikami kolejowymi i pozostałymi aplikantami w zakresie udostępniania infrastruktury kolejowej. Regulamin składa się z postanowień formalnych oraz danych zamieszczonych w załącznikach. W części formalnej m.in. znajdują się warunki dostępu do infrastruktury kolejowej, zasady przydzielania i korzystania z przydzielonej zdolności przepustowej, rodzaje świadczonych usług w zakresie minimalnym oraz maksymalnym, a także o opłatach za korzystanie z przydzielonej zdolności przepustowej. W części załącznikowej znajduje się mapa infrastruktury oraz jej parametry.

Po złożeniu wniosku o przydzielenie zdolności przepustowej u zarządcy infrastruktury następuje proces przygotowywania rozkładu jazdy dla pociągu [122], [124], [165]. Odbywa się to na podstawie postanowień zawartych w Instrukcji Ir-11 [131] o rozkładzie jazdy pociągów. Dokument ten ma na celu określenie zasad związanych z przygotowaniem oraz publikacją rozkładu jazdy. Scharakteryzowany został proces przygotowywania rozkładu jazdy oraz technika jego opracowywania (wykresy ruchu). Omówione zostały także aplikacje wspomagające proces konstrukcji wykresu ruchu. Należy zauważyć, że w instrukcji omówiono także rodzaje rozkładu jazdy. Szczegółowe postanowienia dotyczące zastępczego rozkładu jazdy (ZRJ) zawarte zostały w instrukcji Ir-19 [133].

Po otrzymaniu rozkładu jazdy dla pociągu przewoźnik kolejowy może przystąpić do realizacji przewozu. Można tego dokonać po spełnieniu warunków uruchomienia pociągu umieszczonych w instrukcji Ir-1 [136]. Gotowość pociągu zgłasza maszynista do dyżurnego ruchu, który następnie kontaktuje się z dyspozytorem w celu ustalenia możliwości wyprawienia. Praca dyspozytora regulowana jest poprzez postanowienia instrukcji Ir-13 [130]. Celem instrukcji jest określenie zadań i obowiązków dyspozytorów w zakresie nadzoru i koordynacji pracy osób realizujących proces eksploatacyjno-przewozowy, polegający na nadzorowaniu ruchu pociągów na liniach kolejowych, dokumentowaniu jego i usterek

infrastruktury, a także współdziałaniu z innymi podmiotami, w tym z zespołami i sztabami w ramach systemu zarządzania kryzysowego, jak również zapewnieniu ciągłości przekazywania informacji [130]. Zawarto tu m.in. zasady dotyczące planowania uruchomienia pociągu, nadzoru nad prowadzeniem ruchu, zasady dokumentowania ruchu oraz procedurę postępowania w przypadku wystąpienia sytuacji kryzysowej lub nadzwyczajnej.

Dyżurni ruchu podczas realizacji przewozu ładunku dokonują kontroli biegu pociągu. Odbywa się to na podstawie postanowień Instrukcji Ir-14 [134]. Celem dokumentu jest wprowadzenie jednolitego, dla wszystkich uczestników procesu przewozowego, systemu identyfikacji przyczyn opóźnień i odwołania pociągów. Zawiera on zasady ustalania punktualności biegu pociągów, zasady kwalifikacji opóźnień oraz reguły sprawozdawczości statystycznej.

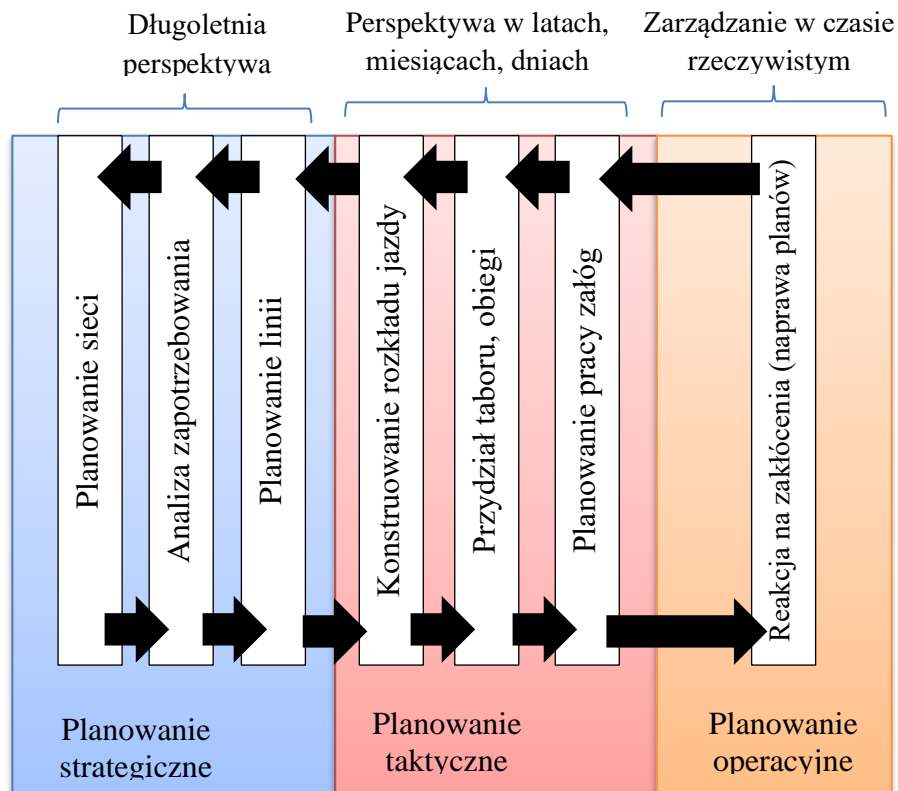
## **1.2. Problematyka doboru taboru do realizacji zadań przewozowych w transporcie kolejowym w literaturze**

Jak już wspomniano w poprzednim podrozdziale, aby móc dokonać fizycznego przemieszczania towaru przy pomocy transportu kolejowego po sieci kolejowej, należy dokonać zamówienia rozkładu jazdy u zarządcy infrastruktury [87], [88]. Do zamówienia niezbędne jest określenie kilku niezbędnych parametrów. Do podstawowego zakresu danych wejściowych należy podanie przybliżonej trasy przejazdu ładunku (np. najkrótszej) i czasu rozpoczęcia lub zakończenia przewozu, serii lokomotywy oraz masy pociągu. Na tej podstawie przygotowany zostanie rozkład jazdy oraz określone zostaną koszty przemieszczania. Uzyskanie w/w parametrów możliwe jest z wykorzystaniem metody, która jest przedmiotem niniejszej dysertacji (patrz rozdziały 6-7). Proces realizowany z wykorzystaniem metody można określić jako jeden z elementów planowania przewozów towarowych.

Planowanie przewozów w transporcie kolejowym może być rozpatrywane ze względu na długość horyzontu planowania oraz różnorodność zagadnień decyzyjnych. Wyróżnia się następujące horyzonty planowania: strategiczny, taktyczny, operacyjny i w czasie rzeczywistym (rys. 1.1).

W zależności od rodzaju perspektywy podejmowane są różne decyzje odnośnie realizacji usług transportu kolejowego. Z punktu widzenia analizowanego obszaru badawczego

w niniejszej dysertacji można wyróżnić trzy zasadnicze elementy (bloki) będące przedmiotem podejmowanych decyzji. Jest to rozkład jazdy, tabor oraz drużyny pociągowe. Podejmowane decyzje w każdym z tych bloków różnią się między sobą i najczęściej rozpatrywane są oddzielnie.



Rys. 1.1. Poszczególne kroki planowania systemu transportu kolejowego  
źródło: opracowanie własne na podstawie [65], [108], [168].

Przedmiotem zainteresowania niniejszej rozprawy jest blok taboru, szczegółowo rzecz ujmując to zarządzanie taborem, a bardziej szczegółowo to przydział taboru przy ograniczonych zasobach. Jak można zauważyć na rys. 1.1 problem ten mieści się w obszarze planowania taktycznego, czyli w perspektywie czasowej wyrażonej w latach, miesiącach czy dniach. Dobór taboru do zadań ma na celu wskazanie ile lokomotyw i wagonów towarowych jest potrzebnych i jak zestawić z nich składy, aby zaspokoić potrzeby przewozowe wynikające z zapotrzebowania odbiorców. Zagadnienie to różni się w zależności od przedmiotu przewozu i przybiera inną formę, a przede wszystkim uwzględnia inne założenia i ograniczenia np. przewozy pasażerskie czy towarowe. Trzy główne kryteria w planowaniu taboru to jakość usług, koszty operacyjne i odporność na zakłócenia [120].

Eksplatacja taboru kolejowego jest istotnym składnikiem kosztów w transporcie kolejowym – oczywiście z punktu widzenia przewoźnika kolejowego. Sam jego zakup wiąże się z dużymi inwestycjami. Dodatkowo należy doliczyć koszty jego obsługi. Z tego względu niezwykle istotne jest właściwe zaplanowanie potrzebnej liczby taboru w planie strategicznym. W realizacji planu operacyjnego idealną sytuacją jest brak przejazdów pustych. Jest to jednak dość trudne do zrealizowania. Związane jest to nie tylko z kosztami samego przewozu, ale i kosztami zakupu i utrzymania większej liczby środków transportowych, a także straty z zajętości torów i dodatkowych prac manewrowych oraz zatrudnienia załóg [120]. W planowaniu doboru taboru do zadań przy ograniczonych zasobach może zaistnieć sytuacja, gdy w pewnym okresie czasu z jednej stacji odjeżdża więcej pociągów niż na nią wraca. Taka sytuacja określana jest nieźrównoważeniem i powoduje konieczność wystąpienia przejazdu próżnego. W związku z tym efektywne zarządzanie taborem ma bardzo duże znaczenie w efektywności funkcjonowania systemu kolejowego. Cykl życia taboru to z reguły kilka dekad, a zatem inwestycje nie mogą być często realizowane i zmieniane. Dlatego też konieczne jest precyzyjne planowanie zapotrzebowania i dostosowanie odpowiedniej liczby taboru w konfrontacji z poziomem zapotrzebowania na przewozy.

Prawidłowo zrealizowany proces planowania doboru pojazdów kolejowych do zadań uwzględnia zarówno czynniki zewnętrzne jak i ograniczenia. Z uwagi na skalę wielkości rzeczywistych problemów [1], [2] dotyczących planowania doboru taboru (wynikających m.in. z różnorodności taboru oraz uwarunkowań prawnych), w modelu matematycznym należy uwzględnić bardzo dużą liczbę zmiennych decyzyjnych i ograniczeń. Uwzględnienie w modelu szeregu ograniczeń skutkuje wzrostem poziomu złożoności problemu i liczby obliczeń niezbędnych do wygenerowania optymalnego zestawu pociągów do obsłużenia przez dany skład pociągu.

Problem doboru taboru może być postrzegany jako specjalny problem przepływów różnych zasobów o minimalnych kosztach, w którym zestaw różnych zasobów musi być codziennie kierowany przez sieć z niektórych stacji w celu zapewnienia zestawu usług i zagwarantowania minimalnych kosztów eksploatacji. Problem staje się bardziej złożony, gdy uwzględniane są również decyzje dotyczące utrzymania (eksploatacji) pociągu. W przypadku rozważenia łączenia i oddzielania przewozu pojemność odnosi się do maksymalnej liczby wagonów, którą można przenieść w ramach każdej usługi. Inne aspekty przepustowości, takie jak przepustowość linii, są zwykle analizowane wcześniej na wczesnym etapie, podczas projektowania rozkładów jazdy pociągów [36].

Problem doboru taboru do realizacji zadań przy ograniczonych zasobach jest niezwykle złożony i istotny w aspekcie zarządzania taborem i planowania systemów transportu kolejowego [150]. Możliwe jest rozpatrywanie go w różnych wariantach. Jednak na podstawie prac [111], [120], [168] można określić ogólne uwarunkowania do modelowania tego problemu na potrzeby niniejszej rozprawy. W literaturze przedmiotu wśród zagadnień dotyczących organizacji towarowego ruchu kolejowego można wyróżnić m.in. [91]:

- planowanie przejazdu pociągów z ładunkiem i składu/składów próżnych,
- określenie zdolności przewozowych stacji i przepustowości linii, po której będzie realizowany przejazd,
- opracowanie planów zestawienia pociągów oraz opracowanie rozkładów jazdy,
- opracowanie planów pracy stacji kolejowych,
- opracowanie planów pracy pojazdów trakcyjnych [74],
- opracowanie planów pracy drużyn trakcyjnych,
- optymalizacja przewozów ze względu na koszty,
- obsługa zakłóceń (wypadki i wydarzenia) [108], [120].

Głównym obszarem badań w rozprawie jest analiza doboru taboru do przewozów towarów przy ograniczonych zasobach. Największym problemem w organizacji przewozów są występujące zakłócenia w ruchu na sieci kolejowej, dlatego często należy dokonywać korekt w planach co nie jest uwzględniane na etapie planowania. Temat zakłóceń na sieci kolejowej w realizacji przewozów przedstawiony jest w pracach [48], [110], [169]. Najczęściej wykorzystywanym narzędziem służącym do badania wpływu zakłóceń na organizację ruchu pociągów są modele symulacyjne [15], [47], [138], [170]. Sposób dokonywania korekt i optymalnego kierowania ruchem kolejowym na sieci oraz sposobu jego wdrożenia przedstawiono w pracach [49], [117], [170]. Bardzo ważne znaczenie w organizacji ruchu na sieci kolejowej przypisuje się zagadnieniom konstruowania optymalnego rozkładu jazdy, który umożliwia niwelowanie zakłóceń tzn. brak jest opóźnień wtórnych lub w przypadku ich wystąpienia są szybko niwelowane [116]. W pracach wykorzystano różne metody do analizy rozkładów jazdy pociągów bazujące na symulacji [94], teorii kolejek [11], MAX- Plus [68] oraz analizie statystycznej [63]. Natomiast w pracach [80], [99], [100], [171] przedstawiono stochastyczny model optymalizacyjny i przeprowadzono na nim symulację.

W pracach [12], [75], [109], [160] przedstawiono matematyczne ujęcie zagadnienia organizacji ruchu kolejowego. Poddano analizie [67] problem transportu towarowego na sieciach, gdzie odbywa się ruch mieszany tzn. kursują pociągi pasażerskie oraz towarowe.

Autor pracy [164] analizuje planowanie ruchu pociągów towarowych kursujących po złożonych sieciach oraz rozwija podejście oparte na optymalizacji w planowaniu pociągów towarowych. Duże znaczenie w problematyce wspomagania decyzji w zakresie planowania i organizacji ruchu kolejowego na sieci mają modele symulacyjne, co zostało już wcześniej zasygnalizowane.

Przykładem jest [110] zastosowanie pakietu symulacyjnego SIMUL 8 w celu opracowania modelu sieci kolejowej. Dokonano podziału sieci na linie kolejowe, stacje kolejowe, węzły kolejowe, punkty ładunkowe i terminale kolejowe, gdzie elementy sieci zostały przedstawione jako połączone systemy kolejkowe współdziałające ze sobą. Natomiast w pracy [119] i [172] przedstawiono zagadnienia obliczania zdolności przewozowej systemu kolejowego, co nie jest łatwe do obliczenia ze względu na liczne powiązania elementów w złożonej strukturze systemu transportu kolejowego. Planowanie transportu ładunków w przypadku niepewności (złożoność nieprzewidywalnych czynników) przedstawiono w [50], [102], [107]. W literaturze przedmiotu [45] przedstawiono optymalizację sieci połączeń pociągów towarowych z zastosowaniem programowania dwupoziomowego (sekwencyjne). „Górny” poziom pozwala na znalezienie optymalnej obsługi połączenia kolejowego, natomiast poziom „dolny” jest używany do przypisywania każdej wysyłki do sekwencji pociągów. Wynikiem będą kompozycje pociągów przypisane do konkretnych kursów w rozkładzie jazdy, a także pozycje jednostki w składzie. Uzyskiwane rozwiązanie będzie minimalizowane ze względu np. na koszty, odporność na zakłócenia, liczbę wagonów. Zwrócone rozwiązanie musi spełniać szereg ograniczeń. Wśród głównych można wskazać:

- każda zmiana w składzie musi być zgodna ze specyfikacją techniczną i zapotrzebowaniem,
- początkowe i końcowe stany na stacjach powinny odpowiadać stanom pożądanym, podanym jako dane wejściowe,
- kompozycja składu jest zgodna z dolnymi i górnymi ograniczeniami.

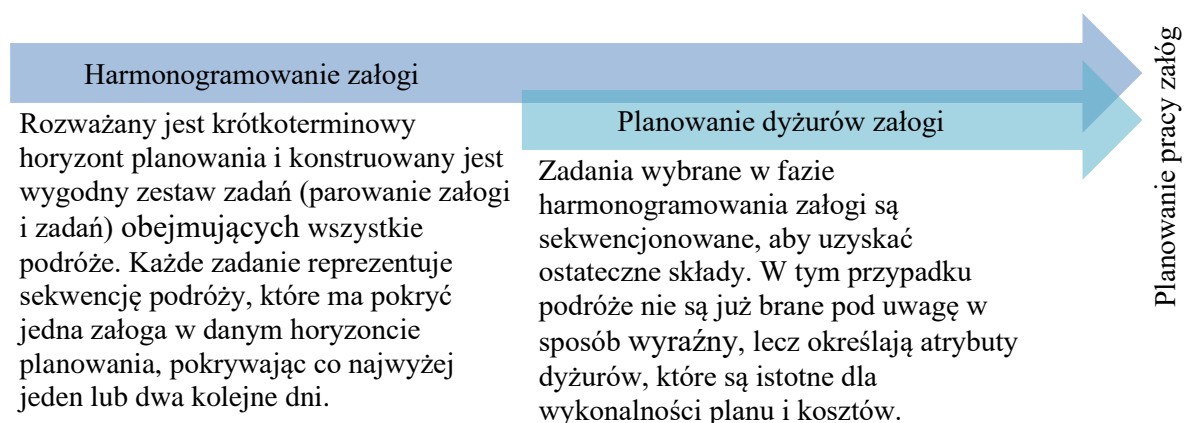
Autor [111] wskazał ponadto dodatkowe ograniczenia na znajdowane rozwiązanie. Ograniczenia te wynikają z organizacji i realizacji usługi przewozu.

Należy zauważyć, że problemy przygotowywania organizacji ruchu kolejowego były realizowane równolegle z np. przygotowywaniem rozkładu zajęć na uczelniach [5], rozkładu potoku w sklepie [34], planowania zajętości krawędzi peronowych [22], [30]. Nie można zapomnieć, że przy organizacji ruchu kolejowego bardzo istotne znaczenie ma konieczność zachowania najwyższego stopnia bezpieczeństwa [139], [153] – m.in. poprzez zastosowanie

odpowiednich urządzeń sterowania ruchem kolejowym [19], [21], [104] czy zapewnienie odpowiedniej komunikacji i śledzenia pojazdów [43], [42], [44], [149].

### 1.3. Zagadnienia planowania drużyn trakcyjnych dla obsługi pociągów towarowych

Planowanie pracy drużyn trakcyjnych dla obsługi pociągów towarowych (załóg) stanowi bardzo złożony i trudny problem do rozwiązania, zarówno ze względu na rozmiar zadania (duża liczba zmiennych), jak i rodzaj i liczbę warunków brzegowych. Typowe dane liczbowe dla głównych europejskich przewoźników pociągów to kilka tysięcy pociągów dziennie, a załogi to kilka tysięcy maszynistów rozmieszczonych w różnych punktach początkowych. Zwykle planowanie pracy drużyn trakcyjnych odbywa się w dwóch etapach, zgodnie ze schematem na rys. 1.2, wydzielamy fazę harmonogramowania załogi (crew scheduling) oraz planowania dyżurów załogi (crew rostering).



Rys. 1.2. Etapy planowania załóg w transporcie kolejowym

Źródło: opracowanie własne na podstawie [38].

Przedstawiony podział wynika z kilku powodów. Przede wszystkim każdy członek załogi znajduje się w danym punkcie początkowym pracy załogi, który reprezentuje miejsce startu i końca jego segmentów pracy. Naturalne ograniczenie narzuca, że każda załoga musi wrócić do swojej bazy w ciągu zmiany roboczej. Prowadzi to do koncepcji służby jako krótkoterminowego odcinka pracy rozpoczynającego się i kończącego w bazie i nakładających się bardzo mało kolejnych dni. Po drugie, ograniczenia wpływające na segmenty pracy krótkoterminowej różnią się charakterem od ograniczeń związanych z ogólną



listą załóg. Na przykład minimalny odstęp czasu między dwiema kolejnymi podróżami w służbie wynosi kilka minut na zmianę pociągów, podczas gdy przerwa między dwoma kolejnymi dyżurami wynosi od kilku do kilkunastu godzin na odpoczynek w domu.

Warto zauważyć, że w harmonogramie załogi występują dodatkowe ograniczenia. Zwykle dotyczą one liczby dyżurów o danej charakterystyce dla każdej bazy. Ponadto planowanie dyżurów rozpatruje każdą bazę osobno, ponieważ nie może obejmować obowiązków z różnych punktów startu [38].

W literaturze przedmiotu autorzy [76] wskazują na możliwość zintegrowania obu problemów i rozwiązywania ich jednocześnie. W większości prac dotyczących transportu kolejowego przyjmuje się ich rozwiązywanie w sposób sekwencyjny, aczkolwiek np. w pracy [58] wskazano, że w niektórych przypadkach podejście takie może skutkować uzyskaniem wyższej efektywności kosztowej w zakresie kosztów personelu.

Autorzy w pracy [115] przedstawiają najnowszy przegląd zintegrowanych modeli optymalizacyjnych w transporcie kolejowym. Integracja planowania załogi z innymi zadaniami planowania jest przede wszystkim badana w kontekście transportu towarowego np. [13] lub z naciskiem na skład załogi np. [24]). Zintegrowane planowanie pracy taboru kolejowego i harmonogramu załogi jest szeroko badane w przypadku miejskich systemów transportowych, zwłaszcza transportu autobusowego [96], nie ma to jeszcze miejsca w przypadku transportu pasażerskiego na kolei. W związku z tym integracyjne podejścia do operacji kolejowych uwzględniające etapy planowania załogi pozostają dziedziną przyszłych badań.

W planowaniu załóg istotne jest również zarządzanie zakłóceniami, które ma na celu, w czasie rzeczywistym, odzyskanie (naprawienie) wadliwej części planu. Różne incydenty mogą powodować niewykonanie planu (np. zła pogoda, wypadki, awaria taboru) dlatego konieczne jest jak najszybsze przeplanowanie pracy załóg, aby zrealizować jak największą część planu [31], [146].

W transporcie pasażerskim planowanie operacyjne załogi opiera się na ustalonym harmonogramie, tj. stałym zapotrzebowaniu, a zatem jest weryfikowane i dostosowywane co pewien, dłuższy okres czasu (np. rok). Środki transportu pasażerskiego różnią się pod względem obsługiwanej destynacji i jej odległości, oraz częstotliwości świadczonych usług. Pociągi dalekobieżne kursują co miesiąc, co tydzień, codziennie lub co godzinę, w zależności od kraju, odległości i zapotrzebowania. Pociągi regionalne zaspokajają zapotrzebowanie na codzienne potrzeby przewozowe (np. dojazdy do pracy), a zatem kursują co najmniej codziennie, raczej co godzinę, a nawet kilka razy na godzinę. Koleje miejskie zaspokajają

wysokie zapotrzebowanie na przejazdy w dużych miastach i na obszarach o dużej gęstości zaludnienia, a zatem zazwyczaj jeżdżą zgodnie z rozkładami jazdy. Horyzont planowania operacyjnego jest zwykle miesięczny lub dzienny, ponieważ znaczna część pociągów jest uwzględniona w rozkładzie jazdy kilka dni przed eksploatacją (zmiany lub krótkoterminowe zapotrzebowanie [8]). W związku z tym usługi transportowe i związany z nimi rozkład jazdy mogą być kombinacją zarówno regularnej, jak i nieregularnej obsługi [77].

W modelach planowania załóg, można wyróżnić różne typy (kategorie) członków załogi. W niektórych przypadkach rozróżnienie ma sens, ponieważ dotyczą ich inne wymagania prawne lub operacyjne (np. [77]). W większości prac uwzględnia się przydział maszynisty, często w pracach badawczych uwzględnia się konduktorów wraz z maszynistami jako stały zespół np. [163]. Stosowane są jednak modele, które koncentrują się tylko na konduktorach [51] czy np. ochroniarzach [148].

Głównym celem CPP jest zminimalizowanie globalnej liczby załóg potrzebnych do wykonania wszystkich codziennych czynności w podróży w danym horyzoncie planowania. W niektórych aplikacjach faza planowania dyżurów odgrywa niewielką rolę, ponieważ odpowiednie ograniczenia są raczej słabe, a liczbę załóg można łatwo ustalić na podstawie rozwiązania fazy harmonogramowania. Zwykle dzieje się tak np. wtedy, gdy rozpatrywane pociągi pokrywają stosunkowo niewielki obszar, kursujący głównie w ciągu dnia, a znaczna większość załóg opuszcza swoją bazę rano/popołudniu i wraca do niej po południu/wieczorem. W takim przypadku dyżur wykonywany przez załogę w ciągu jednego dnia nakłada bardzo ograniczone warunki na zadania, które może wykonywać następnego dnia, a układanie dyżuru ma na celu równomierne wyrównanie obciążenia pracą wśród załóg. W rezultacie cel zastosowany w fazie planowania załogi wymaga głównie zminimalizowania liczby dni roboczych odpowiadających dyżurom [38].

Jak wskazują autorzy w pracy [76], problemy planowania załóg są zwykle formułowane jako mieszany problem całkowitoliczbowy (z niektórymi zmiennymi ciągłymi). W większości przypadków sformułowanie opiera się na pokrywaniu zbioru (set covering). Drugim najpopularniejszym sformułowaniem problemu jest związany z nim problem z podziałem zbioru (set partitioning). Oba modele przedstawiają sformułowanie problemu przepływu wielu różnych „przedmiotów” w sieci czasoprzestrzennej. Występują również prace, gdzie stosuje się formułę przepływu w sieci skierowanej dla problemu przepływu wielu „przedmiotów”, zwanego problemem przepływu w sieci (network flow). Inne sformułowania problemów planowania mogą obejmować, takie zagadnienia jak problem z maksymalnym pokryciem czy problem z pakowaniem.

Aby uzyskać optymalny harmonogram pracy załogi, dla danego problemu należy określić odpowiednią funkcję kryterium. W większości przypadków używana funkcja celu, ocenia efektywność harmonogramu, za pomocą różnych parametrów, takich jak całkowity koszt, całkowita liczba zadań, całkowity czas bezczynności lub kombinacja tych lub innych parametrów, takich jak godziny pracy (uzupełnienie czasu bezczynności) lub niepokryte zadania. W wybranych pracach uwzględnia się nie tylko kryteria celu kosztowego, ale także jakość rozwiązania pod względem odporności na zakłócenia i zadowolenia pracowników lub przynajmniej wybranych aspektów wskazanych charakterystyk.

Planowanie pracy załogi kolejowej podlega wielu różnorodnym przepisom prawnym i regulacjom organów transportu publicznego (np. Federalna Administracja Kolejowa w USA), w Polsce aktualnie trwają prace nad ustawą określającą czas pracy maszynisty i innych członków załogi, obecnie reguluje to kodeks pracy), umowy związków zawodowych, indywidualne warunki pracy i dalsze zasady określone przez operatora. Dlatego też w modelach planowania załóg konieczne jest zbudowanie rozległego modelu opartego na wiedzy na temat reguł i ograniczeń specyficznych dla konkretnego przypadku (operatora, trasy, reguł prawnych) oraz dokładnego przełożenia ich na warunki brzegowe. Aby zarządzać wielkością przestrzeni rozwiązań, powszechną praktyką jest relaksacja ograniczeń lub rozróżnienie reguł twardych i miękkich, które często są modelowane odpowiednio jako ograniczenia i kary (np. [95]).

Zaplanowanie pracy załóg poza ograniczeniami prawnymi musi spełniać szereg innych warunków. Może to być, np.:

- ograniczenie maksymalnej liczby przejazdów (zadań) na dyżur załogi lub
- określenie maksymalnego czasu dyżuru
- minimalny czas zmiany pociągu,
- określenie czasu odpoczynku w miejscu zamieszkania,
- maksymalny lub całkowity czas jazdy oraz czas pracy – czas pracy uwzględnia dodatkowo czas bezczynność czy inne zadania niezwiązane np. z prowadzeniem pociągu,
- określenie okresów między poszczególnymi rodzajami przerw i odpoczynków,
- restrykcje odnośnie miejsca i czasu odbywania przerwy danego typu,
- ograniczenie na zdolność/pojemność bazy - sieć kolejowa składa się z wielu baz (punktów początkowych/końcowych), z tych baz wyruszają załogi. Rzadko w praktyce występują problemy pojedynczej bazy (np. tylko dla jednej linii). Zatem

można sformułować ograniczenie na liczbę załóg i zadań realizowanych z poszczególnej bazy,

- czas pracy może być rozłożony między bazy w sposób równomierny,
- osobne ustalanie czasu pracy i harmonogramu dla różnych kategorii zasobów (np. maszynista, ochroniarz),
- uwzględnienie kwalifikacji maszynistów, znajomość sieci kolejowej i posiadane uprawnienia.

#### **1.4. Podsumowanie – obszary badawcze a metodologia rozwiązania rozprawy**

Podsumowując, do skutecznej realizacji ruchu pociągów na sieci kolejowej musi być wcześniej zaplanowany. Odpowiedzialnym za zorganizowanie ruchu pociągów jest przewoźnik kolejowy jako jeden z podmiotów, do którego nadawca składa zapotrzebowanie na przewozy. Planowanie jest w szerokim ujęciu określane jako proces dochodzenia do decyzji [90], gdzie najważniejszym aspektem jest określenie celów. Dochodzenie to polega na udzieleniu odpowiedzi na następujące pytania: co, ile, kiedy i jak należy wykonać (zrobić)? Aby dojść do wyznaczonego celu należy opracować ścieżki dojścia. Plan realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej przedstawiono na rys. 1.3.

Rozwiązanie proponowane w niniejszej rozprawie dedykowane jest do planowania doraźnego z uwzględnieniem doboru rodzaju taboru w zależności od rodzaju ładunku oraz trasy przewozu po sieci kolejowej uwzględniający rodzaj trakcji, po której będzie realizowany przejazd pociągu. Opracowywane plany determinują przygotowanie niezbędnych zasobów w zakresie przemieszczania pociągów, pracy pojazdów trakcyjnych, pracy drużyn trakcyjnych, pracy drużyn manewrowych, pracy stacji kolejowych itp. Wymienione czynności składają się na planowanie przejazdu pociągów z ładunkiem oraz próżnych składów po wyładunku i pod naładunek (planowanie rozkładu jazdy). Procesy te są od siebie zależne i nie mogą funkcjonować oddzielnie.

Należy zauważyć, że w ostatnich latach nastąpił znaczny postęp technologiczny w zakresie komputeryzacji i wydajności obliczeniowej, a także rozwój metod optymalizacyjnych [4]. Przyczyniło się to do wprowadzania innowacji w zakresie wspomaganie decyzji w różnych obszarach transportu, w tym w transporcie kolejowym. Autor rozprawy ze swoich doświadczeń zawodowych zauważa jednak brak wystarczających narzędzi do wsparcia procesu decyzyjnego planowania doboru taboru do przewozów towarowych przy

ograniczonych zasobach w sposób kompleksowy np. z zastosowaniem metod ewolucyjnych. Wymaga to opracowania nie tylko algorytmu, ale również odpowiedniego modelu matematycznego. W kolejnych rozdziałach rozprawy zostaną przedstawione istotne aspekty problematyki doboru taboru do zadań w przewozach towarowych uwzględniając ograniczone zasoby.



Rys. 1.3. Schemat realizacji rozprawy doktorskiej

Źródło: opracowanie własne

## 2. CEL I TEZA ROZPRAWY

Rozprawa ma na celu opracowanie autorskiej metody doboru taboru do zadań w towarowych przewozach kolejowych przy ograniczonych zasobach. W konsekwencji zastosowanej metody zostaną, w sposób właściwy, przydzielone wagony i pojazdy trakcyjne do realizacji zgłoszonych potrzeb przewozowych w zakresie przemieszczania ładunków po sieci kolejowej. Wygenerowane zostaną również trasy realizujące wszystkie zadania przez odpowiednio sformowane pociągi.

Celem naukowym rozprawy jest opracowanie metody doboru taboru do zadań w towarowych przewozach kolejowych przy ograniczonych zasobach. Celem użytecznym jest zbadanie czy zaproponowana implementacja komputerowa metody w postaci aplikacji komputerowej może być przydatnym narzędziem wspomagającym procesy doboru taboru do zadań w towarowych przewozach kolejowych przy ograniczonych zasobach.

Przedstawiona w rozdziale 1 analiza problemu badawczego wskazuje, że sprawna organizacja przewozu ładunków po sieci kolejowej, której nadrzędnym celem jest zabezpieczenie odpowiedniego taboru do przewozu towarów, wymaga także doboru odpowiednich serii lokomotyw i wagonów do rodzaju pracy pociągowej, określonej masą i prędkością pociągu, profilem linii, dopuszczalnym naciskiem na tor itp. Ponadto wymagana jest współpraca z sekcjami eksploatacji przewoźnika kolejowego w celu zabezpieczenia drużyn trakcyjnych do realizacji przewozu, jak również właściwej organizacji pracy pojazdów. Wszystko to ma na celu, by realizacja przewozu była efektywna.

Najczęściej kolejowe przewozy towarowe są realizowane w oparciu o roczny rozkład jazdy (RRJ). Można go zdefiniować jako [133] rozkład jazdy pociągów obowiązujący pomiędzy dwoma kolejnymi zmianami rozkładu jazdy pociągów następującymi o północy w drugą sobotę grudnia). Aby uzyskać trasę należy złożyć do zarządcy infrastruktury wnioski o przydzielenie zdolności przewozowej. Wadą takiego rozwiązania jest długi czas oczekiwania na przydzielenie trasy oraz w przypadku braku potrzeby przewozowej zgłaszanej przez przewoźnika, pobieranie opłaty za niewykorzystanie przydzielonych tras.

Drugą formą przemieszczania ładunków po sieci kolejowej jest wykupienie trasy pociągu w ramach indywidualnego rozkładu jazdy (IRJ). Rozkład ten można zdefiniować jako [133] plan jazdy opracowany na indywidualny wniosek przewoźnika, na jeden lub więcej terminów kursowania w ramach pozostałej wolnej zdolności przepustowej. Zarządca opracowuje go zgodnie z parametrami podanymi we wniosku (dotyczy to parametrów składu pociągu m.in.

długości, masy brutto, serii pojazdu trakcyjnego, czasów jazdy czasu trwania przejazdu i stacji planowych zatrzymań pociągu (postojów technicznych)).

Zarówno w pierwszej jak i drugiej formie przemieszczania ładunków po sieci kolejowej we wniosku podaje się jedynie serię i liczbę lokomotyw, długość pociągu oraz jego masę brutto. Brak jest danych na temat rodzaju wagonów, długości wagonu i długości lokomotywy, ładowności, rodzaju przewożonego towaru, nacisku osi na główkę szyny. Bez nich nie uzyska się wartości niezbędnych do podania we wniosku. Do ich uzyskania potrzebne jest przeprowadzenie procedury doboru taboru (lokomotyw i wagonów) do realizacji konkretnego zadania.

Z punktu widzenia problematyki doboru taboru kolejowego do realizacji towarowych zadań przewozowych dla danego obszaru sieci kolejowej znamioną cechą jest ograniczona liczebność tego taboru. W oparciu o analizę literatury, zapotrzebowanie przemysłu, a także doświadczenie zawodowe autora rozprawy, dobór taboru do uprzednio zdefiniowanego zadania przewozowego będzie determinował wybór najkrótszej trasy do zrealizowania zadania przewozowego oraz zostaną ustalone warunki przewozu. Te trzy obszary stanowią główne elementy metody doboru taboru do realizacji towarowych zadań przewozowych w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach.

Krytycznej analizie literatury poddano zagadnienia dotyczące problemu przydziału do realizacji zadań m.in. [6], [7], organizacji ruchu kolejowego, metod optymalizacji i ich zastosowania przy doborze taboru (o ograniczonej liczebności) do realizacji kolejowych przewozów towarowych. Przeprowadzone badania wskazują, że sposób organizowania i doboru taboru kolejowego, w literaturze przedmiotu, opisywane są w sposób ogólny, bez wyraźnego podkreślenia i wskazania metod rozwiązania tego problemu na etapie opracowywania trasy pociągu.

W związku z powyższym sformułowano tezę rozprawy, która brzmi:

**zastosowanie odpowiednich algorytmów heurystycznych do rozwiązania problemu doboru taboru do zadań przy ograniczonych zasobach w towarowym transporcie kolejowym pozwala na racjonalne przydzielenie wagonów i pojazdów trakcyjnych do realizacji zadań.**

Wobec tak postawionej tezy, zasadniczym celem rozprawy jest:

**opracowanie metody doboru taboru do realizacji zadań kolejowych przewozów towarowych przy uwzględnieniu ograniczonych zasobów, na podstawie złożonych zamówień przez klientów i zgodnie z ich oczekiwaniami.**

Realizacja celu rozprawy determinuje, że w ramach niniejszej pracy zostanie opracowana metoda doboru taboru do realizacji towarowych zadań przewozowych w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach, która uwzględni m.in.:

- zastosowanie właściwego rodzaju wagonów,
- przydzielenie właściwej serii lokomotywy,
- wyznaczenie najkrótszej drogi, po której można zrealizować zadanie przewozowe.

Ponadto na potrzeby metody opracowany zostanie:

- model decyzyjny doboru taboru do realizacji towarowych zadań przewozowych w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach,
- efektywny algorytm heurystyczny do rozwiązania problemu,
- aplikację DST jako narzędzie wspomaganie komputerowego problemu przydziału taboru do zadań w towarowych przewozach kolejowych.

Jak już wskazano analiza literatury dotycząca planowania i organizacji towarowych przewozów kolejowych, w aspekcie doboru taboru do realizacji zadań wskazuje, że brak jest metod komputerowego wspomaganie w zakresie planowania doboru wagonów i lokomotyw do zadań przy ograniczonych zasobach. Oczywiście istnieją narzędzia komercyjne, które z jednej strony uwzględniają ogólną specyfikę doboru środków do zadań, natomiast brak jest aplikacji komputerowych, które umożliwiłyby dobór taboru do realizacji towarowych zadań przewozowych w transporcie kolejowym z wykorzystaniem metod optymalizacyjnych oraz uwzględniając specyfikę potrzeb w zakresie niezbędnych serii wagonów czy lokomotyw (pojazdów trakcyjnych). Poruszane w wielu pracach zagadnienia odnoszą się najczęściej do wybranego obszaru linii kolejowej, jednak nie uwzględniają rodzaju wagonu, rodzaju trakcji i serii lokomotywy. Brak jest informacji o ustaleniu zasad (metod) doboru taboru, które uwzględniałyby parametry techniczne taboru i infrastruktury i spełniały oczekiwania klienta.

Zastosowanie metod optymalizacyjnych w procesie doboru taboru do realizacji określonych zadań w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach pozwoli na poprawę uzyskiwanych dotychczas wyników. Wiedza autora rozprawy pozwala na stwierdzenie, że na chwilę obecną brak jest rozwiązań dotyczących zastosowania takich metod do tego problemu.

Jednym z elementów metody jest opracowanie modelu decyzyjnego problemu przydziału taboru do realizacji zadań przy uwzględnieniu ograniczonych zasobów. Do danych, które są niezbędne do rozpoczęcia prac należy zaliczyć m.in: strukturę sieci kolejowej oraz jej



parametry, zadanie przewozowe i jego parametry, tabor (lokomotywy i wagony) i jego parametry, a także dane dotyczące taryfy towarowej przewoźnika.

Wielkości poszukiwane w modelu doboru taboru do zadań określają wykorzystanie do realizacji danego zadania przewozowego (czyli do przewozu danego rodzaju towaru) odpowiedniej liczby wagonów określonego rodzaju, odpowiedniej liczby lokomotyw określonej serii, najkrótszej drogi przebiegu oraz zdefiniowanie warunków handlowych przewozu.

Ocena przypisania taboru do zadań dokonywana będzie na podstawie czterech cząstkowych funkcji kryteriów. Do oceny jakości rozwiązania problemu decyzyjnego zdefiniowano następujące kryteria: minimalizacja długości drogi związanej z realizacją zadania przewozowego, minimalizacja kosztów związanych z przydziałem konkretnego taboru do realizacji konkretnego zadania, minimalizacja czasu przewozu przesyłki i minimalizacja kosztu przewozu przesyłki.

Ograniczenia zastosowane w modelu dotyczą m. in. nieprzekroczenia ładowności środka transportu, maksymalnej prędkości pociągu dla danej linii, maksymalnej długości pociągu, maksymalnego obciążenia pociągu, realizacji przewozów, rodzaju trakcji, typu zmiennych decyzyjnych. Szczegółowo zostaną one scharakteryzowane w dalszej części rozprawy.

Rozprawa składa się z dziesięciu rozdziałów ujmujących treści teoretyczno-badawcze i utylitarne. I tak:

- część teoretyczno-badawcza obejmuje:
  - krytyczną analizę literatury w obszarach badawczych problematyki analizowanej w rozprawie, w tym dotyczącej: organizacji ruchu kolejowego, doboru taboru do realizowanych zadań, przydziału drużyn trakcyjnych itp. (rozdział 1),
  - tezę oraz cel rozprawy wraz z zakresem realizowanych w rozprawie badań (rozdział 2),
  - metod i narzędzi stosowanych do rozwiązania problemu doboru taboru do realizacji zadań w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach (rozdział 3),
  - analizę i ocenę zasad i procedur stosowanych przy gospodarowaniu wagonami (rozdział 4),
  - analizę i zasady gospodarowania pojazdami trakcyjnymi (rozdział 5),

- opracowanie autorskiego modelu decyzyjnego metody doboru taboru do realizacji zadań w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach (rozdział 6),
- część użyteczna obejmuje:
  - opracowanie procedury metody doboru taboru do realizacji zadań w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach wraz z algorytmem obliczeniowym rozwiązania (rozdział 7),
  - opis implementacji komputerowej metody doboru taboru do zadań w postaci autorskiej aplikacji DST (rozdział 8),
  - przykłady zastosowania metody doboru taboru do realizacji towarowych zadań przewozowych na danych rzeczywistych z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST (rozdział 9).

Rozprawę kończy podsumowanie i wnioski wynikające z przeprowadzonych w pracy rozważań. Wskazano na te aspekty, które potwierdzają realizację celu rozprawy i udowodnienie tezy. Przedstawiono również kierunki dalszych badań.

Układ rozprawy doktorskiej przedstawiono na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Układ rozprawy doktorskiej

Źródło: opracowanie własne

Do przygotowania niniejszej dysertacji wykorzystano wieloletnie doświadczenia zawodowe autora rozprawy, który niejednokrotnie napotykał różne problemy techniczne, eksploatacyjne i organizacyjne oraz ekonomiczne związane z funkcjonowaniem kolei, głównie w zakresie przewozów towarowych. Doświadczenia te okazały się pomocne do przygotowania niniejszej rozprawy.

### 3. NARZĘDZIA I METODY DOBORU TABORU W PRZEWOZACH ŁADUNKÓW W TRANSPORCIE KOLEJOWYM – UJĘCIE LITERATUROWE

#### 3.1. Zagadnienia doboru taboru i planowania drużyn w realizacji zadań

##### 3.1.1. Dobór taboru do zadań w aspekcie obiegowania

Problem doboru środków do zadań jest obecny w literaturze od dawna. Podstawową jego wersją jest *Generalized Assignment Problem (GAP)* czyli uogólnione zagadnienie przydziału. Podstawowe sformułowanie problemu zostało opisane z wykorzystaniem terminologii zagadnienia plecaka [112]. Dostosowując zapisy do problemu badawczego, który jest przedmiotem rozprawy, ogólne sformułowanie jest następujące.

Dane jest  $n$  zadań przewozowych i  $m$  środków transportowych. Ponadto zdefiniowane są:

- profity  $p_{ij}$ , które mają interpretację zysku z przypisania zadania  $j$  do środka transportowego  $i$ ,
- wielkość  $w_{ij}$  zadania przewozowego  $j$  przypisaną do środka transportowego  $i$ ,
- pojemność  $c_i$  środka transportu  $i$ .

Należy przypisać każde zadanie przewozowe do tylko jednego środka transportowego w taki sposób, aby zmaksymalizować profit związany z przypisaniem i nie przekroczyć jego pojemności, co można zapisać następująco:

$$\max \quad z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

z uwzględnieniem ograniczeń:

$$\sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} \leq c_i, \quad i \in M = \{1, \dots, m\} \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, \quad j \in N = \{1, \dots, n\} \quad (3.3)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ lub } 1, \quad i \in M, j \in N \quad (3.4)$$

gdzie:

- $x_{ij} = 1$  gdy zadanie przewozowe  $j$  zostało przypisane do środka transportowego  $i$ ,
- $x_{ij} = 0$  w przeciwnym przypadku.

Występuje też odmiana problemu MINGAP, gdzie zamiast profitów  $p_{ij}$  pojawiają się koszty  $c_{ij}$  i wtedy funkcja kryterium przyjmuje postać:

$$\min \quad v = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (3.5)$$

Problem zarządzania i przydzielania pojazdów do zadań jest często poruszany w literaturze. Na podstawie przeglądów i prac badawczych przedstawiono reprezentatywne przykłady. Prace głównie dzielą się na te, które dotyczą problemu modelowania matematycznego planowania pracy załóg [17], [27], [53], [71] oraz te, które dotyczą rozwiązywania tego problemu [23], [37], [59], [98]. Autorzy [3] w swojej pracy opracowali model przydziału jednostek taboru do sprawnej realizacji rozkładu jazdy w aspekcie minimalizacji niedoborów objętości ładunkowej. Z kolei np. autorzy [9] wskazują na konieczność minimalizacji ilości manewrów, które mogą prowadzić do powstania opóźnień, przy jednoczesnym uwzględnieniu kosztów z tym związanych. W pracy [33] przedstawiano zagadnienie przydziału pociągów wraz z wyznaczaniem tras dla szybkiego tranzytu, stosując metodę opartą na rozkładzie Bendersa rozwiązana heurystycznie. W modelu uwzględniono zagadnienie niezawodności poprzez „karanie” występowania próżnych przebiegów pociągowych, manewrowych i opóźnień w funkcji kryterium będącej interpretacją kosztów operatora. Autorzy w pracy [29] przedstawiają model optymalizacyjny z uwzględnieniem niezawodności, bazujący na odzyskiwaniu strat w odniesieniu do różnych scenariuszy zakłóceń realizacji planu (rozkładu jazdy). Aspekt niezawodnościowy uwzględniony jest jako liczba zmian w kompozycji składu pociągu, które mogą prowadzić do wzrostu opóźnień. Jednocześnie rozwiązywany jest problem obiegiwania i planu naprawy wraz z kosztem dla różnych scenariuszy zakłóceń.

Istotnym problemem w organizacji przewozów kolejowych jest zagadnienie planowania obiegów pociągów z rebilansowaniem taboru w przypadku powstania zaburzeń. Model uwzględniający to zagadnienie można znaleźć w pracy [28]. W pracy [111] autor zaproponował model rozwiązania problemu obiegiwania pociągów z uwzględnieniem zagadnienia utrzymania punktualności. Funkcje celu i ograniczenia dotyczą głównie liczby

wagonów. W aspekcie zarządzania taborem i obiegowania pociągów autorzy [57] przedstawili model obiegu taboru łącząc i dzieląc lokomotywy i wagony bazując na zapotrzebowaniu odbiorców i uwzględnieniu przemieszczania wagonów pustych. Natomiast autorzy pracy [3] przedstawili model optymalizacji z uwzględnieniem wydajności taboru, jego punktualności i jakości usług.

Na podstawie przeglądu zaprezentowanego w pracy [38] można wydzielić podział modeli ze względu na rodzaj sieci kolejowej – sieci gęste i sieci rzadkie. Gęsta sieć charakteryzuje się krótkimi odległościami i wysokimi częstotliwościami kursowania pociągów. Natomiast rzadka, długimi dystansami, długimi czasami przejazdów oraz mniejszą częstotliwością kursowania pociągów. Te różnice są ważne, w szczególności w związku z prewencyjną konserwacją taboru.

W przypadku gęstej sieci autorzy [147] opisują model określający minimalną liczbę jednostek taborowych, które muszą być rozmieszczone na jednej linii w celu uniknięcia czasu oczekiwania na podstawienie. Linia jest zdefiniowana przez dwa punkty końcowe, między którymi kilka pociągów jeździ zgodnie z rozkładem jazdy. W rozpatrywanym przypadku istnieją dwa podtypy pociągów, które różnią się długością i pojemnością. Pociąg może składać się z kilku jednostek tych podtypów. Na każdą podróż znana jest objętość ładunku. Jednostki taborowe mogą być sprzężone lub odłączone od pociągu na kilku stacjach wzdłuż linii. Oczywiście, skład pociągu może być połączony ze składem pociągu na określonej stacji tylko wtedy, gdy jest on dostępny w odpowiednim momencie. Model ten jest w zasadzie modelem maksymalnego przepływu z kilkoma dodatkowymi ograniczeniami. Model zakłada, że skład pociągu może się zmienić na dowolny inny skład na stacji między dwiema kolejnymi podróżami. W praktyce należy wziąć pod uwagę kilka ograniczeń sprzężenia składów - ważna jest nie tylko liczba jednostek rozmieszczonych podczas podróży, ale także ich kolejność w składzie pociągu. W tym konkretnym przypadku dozwolona jest tylko jedna operacja, tj. sprzężanie lub rozprzężanie. Ponadto położenie, w którym jednostki pociągowe są sprzężane i odłączane, jest ustalone, tj. z przodu lub z tyłu pociągu, w zależności od stacji.

Praca [26] również dotyczy zagadnienia obiegowania pociągów w gęstej sieci, koncentrując się na zmianie trasy wagonów ciągniętych przez lokomotywę. Ich celem jest dopasowanie podaży i popytu na wagony w regionie, który można uznać za gęstą sieć. Trasowanie lokomotyw odbywa się na późniejszym etapie procesu planowania i nie jest poruszane [40]. Dla każdej podróży podano godziny odjazdu i przyjazdu oraz stacje, a także regularny skład pociągu, tj. lokomotywę oraz rodzaj i liczbę wagonów. Przepływ taboru, narzucony przez zaplanowane przejazdy, jest prawdopodobnie niewykonalny, biorąc pod

uwagę ograniczoną dostępność taboru, tj. wymagany tabor nie zawsze może być dostępny na stacji odjazdu na czas, biorąc pod uwagę wymagania dotyczące innych przejazdów. Aby uzyskać dopasowanie między żadaną liczbą wagonów, a dostępną liczbą wagonów, istnieją dwie opcje:

- rozbudowa istniejących pociągów poprzez połączenie pustych wagonów z pociągiem, oraz
- wprowadzenie pustych podróży repositionujących wagony między dwiema stacjami.

Oczywiście druga opcja jest znacznie bardziej kosztowna. Powstały model jest złożonym modelem przepływu całkowitoliczbowego który jest rozwiązany heurystycznie za pomocą symulowanego wyżarzania.

W przypadku rzadkich sieci zwykle horyzont planowania jest znacznie dłuższy, to samo dotyczy czasów podróży i planowania utrzymania zdatności, co musi być wzięte pod uwagę w planowaniu obiegów. Autorzy pracy [46] przedstawiają model równoczesnego problemu przydziału wagonów i lokomotywy. W rezultacie należy określić rodzaj i liczbę obu typów wyposażenia dla każdego rozkładowego pociągu, zwracając uwagę, aby przydzielone lokomotywy zapewniały wystarczającą siłę uciągu dla przydzielonych wagonów. Zasadniczo możliwe jest kilka kombinacji rodzajów lokomotyw i wagonów, przy czym wagony zwykle różnią się liczbą siedzeń i klasą (pierwszą lub drugą), a lokomotywy różnią się zdolnością ciągnięcia. Prędkość robocza różnych typów urządzeń może się różnić, a prędkość robocza pociągu jest równa prędkości jego najwolniejszej części, co wymaga pewnej elastyczności w harmonogramowaniu [10]. Znalezione rozwiązanie jest cykliczne i może być powtarzane okresowo przez cały sezon.

Autorzy pracy [106] dostosowali poprzedni model do krótkoterminowych korekt popytu, co pozwala na uwzględnienie cykli sezonowych. Na podstawie rzeczywistych danych model próbuje znaleźć alternatywne cykle, dążąc do maksymalizacji oczekiwanego zysku, z zastrzeżeniem kilku ograniczeń operacyjnych. Cykli lokomotywy nie można już zmieniać, ponieważ są one podstawą harmonogramów załogi. Najważniejszymi ograniczeniami są wymagania dotyczące utrzymania i minimalne czasy przepinania, tj. minimalny czas potrzebny do odłączenia wagonu od pociągu lub połączenia go z pociągiem, między dwiema kolejnymi podróżami, które musi odbyć ten skład. Ten czas przełączania zależy od położenia wózków. Dla każdego przewozu i każdego dnia w horyzoncie planowania, na którym przewóz może rozpocząć cykl, generowana jest sieć reprezentująca wszystkie potencjalne cykle dla przewozu. Opierają się one na stałych cyklach lokomotyw. Sieci te odzwierciedlają również możliwe początkowe i końcowe warunki przewozu, narzucone przez jego położenie

na początku horyzontu planowania lub fakt, że przed danym dniem pociąg musi znajdować się w stacji techniczno-postojowej. Zaproponowano procedurę „column generation” w celu rozwiązania relaksacji problemu programowania linowego, a następnie zastosowano heurystyczną wersję metody podziału i ograniczeń w celu znalezienia rozwiązania problemu całkowitoliczbowego. Wymagany czas obliczeń jest na ogół niewielki.

W problemie obiegowania pociągów towarowych należy rozpatrywać problem z punktu widzenia oddzielnego wyposażenia, jakim jest lokomotywa oraz wagony kolejowe. Każda podróż musi być zaplanowana w harmonogramie z uwzględnieniem typu lokomotywy, liczby oraz typów wagonów przy spełnieniu ograniczeń (np. długość składu). Problem ten częściej rozpatrywany jest w przypadku przewozów towarowych gdzie występują częste przebiecia składu, operacje manewrowe i np. dodatkowe lokomotywy [38].

### **3.1.2. Planowanie pracy załóg do obsługi taboru przy realizacji zadań**

Problem optymalizacji pracy załóg jest bardzo złożony ze względu na dużą liczbę zmiennych, ograniczeń oraz złożoną strukturę zagadnienia i liczbę możliwych kombinacji. Ponadto samo zagadnienie harmonogramowania określane jest jako NP-trudne, a zatem jest złożone obliczeniowo. W literaturze do rozwiązania tego problemu stosowane są metody programowania całkowitoliczbowego (bardzo rzadko i tylko dla nieskomplikowanych przypadków, ze względu na dużą złożoność problemu), a przede wszystkim metody heurystyczne i metaheurystyczne. Jednak w np. w pracy [39] autorzy łączą metody programowania całkowitoliczbowego jako wsparcie w algorytmie heurystycznym.

Problem harmonogramowania pracy załóg występuje w wielu dziedzinach, nie tylko w transporcie kolejowym. Z tego też powodu, zastosowane mogą być metody optymalizacji szeroko stosowane w harmonogramowaniu pracy pracowników (załóg lotniczych, pracowników produkcji, kierowców autobusów itp.) [76].

W harmonogramowaniu pracy załóg stosowane mogą być metody sztucznej inteligencji. Należą do nich będą zastosowania oparte o teorię zbiorów rozmytych czy systemy eksperckie np. w połączeniu z algorytmem zachłannym określania wartości funkcji przynależności. Inne metody często opierają się o heurystyczne przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań. Do nich można zaliczyć np. przeszukiwanie sąsiedztwa z uwzględnieniem interaktywnego wsparcia decydenta umożliwiając mu ręczną modyfikację harmonogramów [118]. Interaktywne podejście jest częste w zastosowaniach kolejowych, ponieważ



podejmowanie decyzji odnośnie harmonogramu wymaga uwzględnienia wielu aspektów, które czasem ciężko jest odwzorować w oprogramowaniu i dlatego pozostawia się je ekspertowi. Ponadto takie podejście stosowane jest do wyznaczania rozwiązań początkowych.

Jak już wspomniano, metaheurystyki stanowią istotną klasę metod wsparcia rozwiązania problemu harmonogramowania pracy załóg. Zazwyczaj metody te są stosowane do rozwiązywania problemów, których nie można rozwiązać za pomocą tradycyjnych heurystyk, takich jak zachłanne lokalne wyszukiwanie. Problemy są albo same w sobie trudne, albo przypadki rzeczywiste sprawiają, że trudno jest je rozwiązać poprzez metody dokładne.

Jak wskazują autorzy heurystykę i metaheurystykę często stosuje się do rozwiązywania problemów planowania pracy personelu. Popularność tego rodzaju metod rozwiązywania wynika z wielu czynników, w tym:

- zwykle są stosunkowo odporne na lokalne minima; chociaż nie można zagwarantować, że przygotują optymalne rozwiązanie, zwykle mogą wyszukać rozsądnie dobre wykonalne rozwiązanie dla szerokiego zakresu danych wejściowych w ograniczonym czasie działania; dla porównania wiele metod programowania całkowitoliczbowego powoduje ryzyko, że nie zwrócą żadnych akceptowalnych rozwiązań przez długi czas,
- większość metaheurystyk jest stosunkowo łatwa do wdrożenia i umożliwia włączenie i wykorzystanie informacji specyficznych dla problemu,
- heurystyka ułatwia radzenie sobie ze złożonymi funkcjami kryterium, niezależnie od tego, czy są to rzeczywiste koszty personelu, czy kary za naruszenie ograniczeń, które są pożądane, ale nie obowiązkowe.

Ważnym aspektem jest opracowanie odpowiedniego algorytmu do rozwiązania danego problemu. Wybrane algorytmy opisano w podrozdziale 3.2

## **3.2. Algorytmy stosowane do rozwiązywania problemów doboru środków do zadań**

### **3.2.1. Uwagi ogólne**

Do rozwiązywania problemów decyzyjnych wymagane jest stosowanie odpowiednich metod, które można podzielić na algorytmy tradycyjne oraz algorytmy metaheurystyczne. Do

zadań nieskomplikowanych stosuje się algorytmy tradycyjne, które pozwalają na wyznaczenie rozwiązań optymalnych [82], jednak niedogodnością stosowania tych algorytmów jest konieczność uwzględniania ściśle sformułowanych ograniczeń. Przy złożonych problemach czas obliczeń jest bardzo długi i algorytmy takie stają się nieefektywne.

Istnieją różne definicje pojęcia algorytmu, jednak pod kątem systemów informatycznych stosuje się określenie, że [78]: algorytm jest ściśle określonym, skończonym i uporządkowanym ciągiem operacji przy użyciu języka oprogramowania, których wykonanie nad dobrze zdefiniowanym zbiorem danych prowadzi do rozwiązania określonych problemów. Definicja zawiera kilka istotnych właściwości algorytmów, do których zalicza się:

- *jednoznaczność* – nie można dowolnie interpretować operacji - musi być jeden sposób ich wykonania,
- *wykonalność* – operacje muszą być wykonalne,
- *porządek* – operacje muszą być wykonywane w ustalonej kolejności, aby było wiadome, którą operację wykonać jako następną,
- *ogólność* – algorytm powinien rozwiązywać klasę problemów, a nie jeden przypadek szczególny,
- *skończoność* – liczba operacji może być bardzo duża, ale skończona,
- *efektywność* – algorytm powinien dochodzić do rozwiązania najkrótszą drogą, czasem trudne do spełnienia, gdyż możemy nie znać najkrótszej drogi.

W niniejszym podrozdziale przedstawiono wybrane algorytmy optymalizacyjne pozwalające na rozwiązanie konkretnych problemów decyzyjnych. W literaturze przedmiotu oraz praktyce można wskazać wiele różnych metod stosowanych do rozwiązania problemu doboru środków do zadań. W pracy [32] autorzy zastosowali dekompozycję Bendersa rozwiązywaną heurystycznie. W pracy [106] zaproponowano wykorzystanie procedury „column generation” w celu rozwiązania relaksacji problemu programowania linowego, a następnie zastosowano heurystyczną wersję metody podziału i ograniczeń w celu znalezienia rozwiązania problemu całkowitoliczbowego. Metoda podziału w wersji „branch and price” do problemu planowania doboru w założonym rozkładzie jazdy została wykorzystana w pracy [125]. Z kolei autorzy pracy [26] rozwiązują problem dla gęstej sieci za pomocą symulowanego wyżarzania. Autorzy w pracy [168] stosują metodę iteracyjnego

programowania nieliniowego do rozwiązania mieszanego problemu nieliniowego cyrkulacji pociągów (pseudokod tej metody przedstawiono na rys. 3.1).

---

**Algorithm 1** The procedure of the INP method.

- 1: **Input** : feasible initial departure and arrival times for the up and down directions, i.e.,  $d_{i,j}^{\text{up}}(0)$ ,  $d_{i,j}^{\text{dn}}(0)$ ,  $a_{i,j}^{\text{up}}(0)$ ,  $a_{i,j}^{\text{dn}}(0)$  for  $i = 1, \dots, I$  and  $j = 1, \dots, J$ ,  $p_{\text{max}}$ , convergence tolerance  $\zeta$ , maximum number of iterations  $p_{\text{max}}$ ;
  - 2: iteration index  $p \leftarrow 0$ ;
  - 3: calculate initial estimates  $\hat{\xi}_i(p)$ ,  $\hat{\delta}_i(p)$ , and  $\hat{\beta}_{i,i'}(p)$  by solving the MILP problem with the objective to minimize the number of depot operations  $f_{\text{depot}}$  and with constraints (7) and (14)-(18) based on  $d_{i,j}^{\text{up}}(p)$ ,  $d_{i,j}^{\text{dn}}(p)$ ,  $a_{i,j}^{\text{up}}(p)$ , and  $a_{i,j}^{\text{dn}}(p)$ ;
  - 4: calculate the initial objective function value  $f(p)$  by using (27);
  - 5: **Repeat**
  - 6:      $p = p + 1$ ;
  - 7:     substitute the estimated values  $\hat{\xi}_i(p-1)$ ,  $\hat{\delta}_i(p-1)$ , and  $\hat{\beta}_{i,i'}(p-1)$  into the original MINLP problem and get a new nonlinear programming problem;
  - 8:     obtain the best sub-optimal departure and arrival times  $d_{i,j}^{\text{up},*}(p)$ ,  $d_{i,j}^{\text{dn},*}(p)$ ,  $a_{i,j}^{\text{up},*}(p)$ , and  $a_{i,j}^{\text{dn},*}(p)$  by solving the nonlinear problem with multiple initial points;
  - 9:     compute estimates  $\hat{\xi}_i(p)$ ,  $\hat{\delta}_i(p)$ , and  $\hat{\beta}_{i,i'}(p)$  by solving the MILP problem with the objective to minimize the number of depot operations  $f_{\text{depot}}$  and with constraints (7) and (14)-(18) based on  $d_{i,j}^{\text{up},*}(p)$ ,  $d_{i,j}^{\text{dn},*}(p)$ ,  $a_{i,j}^{\text{up},*}(p)$ , and  $a_{i,j}^{\text{dn},*}(p)$ ;
  - 10:    calculate the objective value  $f(p)$  by using (27);
  - 11: **Until**  $p = p_{\text{max}}$  or  $|f(p) - f(p-1)| \leq \zeta$
  - 12: **Return**  $d_{i,j}^{\text{up},*}(p)$ ,  $d_{i,j}^{\text{dn},*}(p)$ ,  $a_{i,j}^{\text{up},*}(p)$ ,  $a_{i,j}^{\text{dn},*}(p)$ ,  $\hat{\xi}_i(p)$ ,  $\hat{\delta}_i(p)$ ,  $\hat{\beta}_{i,i'}(p)$ ,  $f(p)$
- 

Rys. 3.1. Algorytm procedury iteracyjnego programowania nieliniowego rozwiązania problemu planowania obiegu pociągów

Źródło: [168]

Jak wskazano powyżej, możliwe jest stosowanie różnych metod wspomagania decyzji przy problemie doboru taboru do realizacji zadań. Poniżej opisano wybrane z tych, które często pojawiają się w literaturze i wybrane mechanizmy, które mogą być zaadoptowane do rozwiązania problemu będącego przedmiotem niniejszej dysertacji. Przedstawiono metody:

- Branch and bound,
- algorytmy genetyczne [61], [159],
- symulowane wyżarzanie [73].

### 3.2.2. Branch and Bound

Metoda Branch and Bound (podziału i ograniczeń) jest popularną metodą programowania dyskretnego opracowaną przez Land i Doig [103]. Ogólna jej postać została przedstawiona przez Filipowicza [56] i prezentuje się następująco:

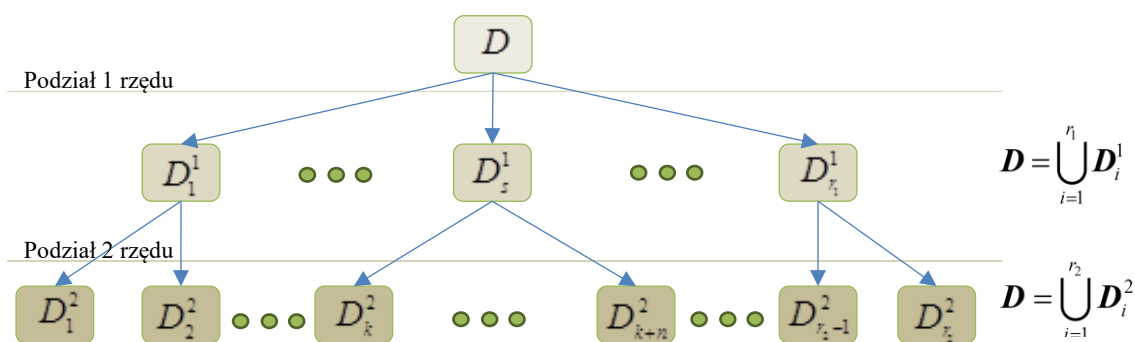
Przyjmując funkcję celu jako:  $\min_{x \in D} f(x)$ , gdzie  $D$  jest zbiorem rozwiązań dopuszczalnych, a  $x$  są zmiennymi decyzyjnymi problemu. Dla założenia  $B \subset A \subset D$  prawdziwe jest:

$\min_{x \in A} f(x) \leq \min_{x \in B} f(x)$ . Ograniczeniem funkcji  $f(x)$  na zbiorze  $A$  nazywa się  $g(A)$ :  
 $g(A) \leq f(x), \forall x \in A$ .

Algorytm pozwalający na znalezienie minimum  $f(x)$  w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych  $D$  realizowany jest wg następujących kroków:

- KROK 1: Wyznaczyć wartość  $g(D)$ , przy czym jeżeli  $x_0 \in D$  i  $f(x_0) = g(D)$  to  $x_0$  jest rozwiązaniem optymalnym. Jeżeli nie jest to rozwiązanie optymalne wykonać krok 2.
- KROK 2: Podzielić zbiór rozwiązań dopuszczalnych  $D$  na  $r_1$  podzbiorów gdzie takich, że  $D = \bigcup_{i=1}^{r_1} D_i^1$  oraz wyznaczyć wartość  $\min_i g(D_i^1)$ . Niech wyznaczona wartość będzie realizowana dla  $i=s$  oraz istnieje  $x_1$  dla którego  $g(D_s^1) = f(x_1)$  to  $x_1$  jest rozwiązaniem optymalnym ponieważ  $f(x_1) \leq g(D_i^1) \leq f(x)$  dla  $x \in D_i^1$  oraz  $i = 1, \dots, r_1$ . Jeżeli taki punkt nie istnieje to przejść do kroku 3.
- KROK 3: Podzielić zbiór  $D_i^1$  na podzbiory  $D_s^i$  takie, że  $D_s^1 = \bigcup_{i=1}^n D_{s,i}^1$  gdzie  $n$  jest liczbą podzbiorów. Dołączyć do nich podzbiory z poprzedniego podziału i numerować  $D_1^1 = D_1^2, D_2^1 = D_2^2 \dots D_{s,1}^1 = D_k^2, D_{s,2}^1 = D_{k+1}^2 \dots D_{s,n}^1 = D_{k+n}^2 \dots D_n^1 = D_{r_2}^2$ . Otrzymany w ten sposób podział jest taki, że  $D = \bigcup_{i=1}^{r_2} D_i^2$ . Wyznaczyć wartość  $\min_i g(D_i^2)$  i dalej jak w kroku 2.

Powyższe kroki postępowania można zobrazować za pomocą drzewa przeszukiwań, gdzie każdy węzeł jest krokiem obliczeń pozwalających podział zbioru na mniejsze podzbiory. Przykładowe drzewo przedstawiono na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Drzewo podziału w metodzie Branch and Bound (podziału i ograniczeń)

źródło: opracowanie własne na podstawie [56]

Jak wskazuje Filipowicz [56] ważną kwestią jest sposób podziału na podzbiory, oraz sposób poszukiwania ekstremum w podzbiorych. Przedstawiony algorytm jest ogólną postacią metody *Branch and Bound* i jej stosowanie w konkretnych problemach wymaga odpowiedniego dostosowania. Ważnym elementem tej metody jest wybór podprzestrzeni rozwiązań do dalszych obliczeń, aby nie przeszukiwać całego drzewa. Po podziale na podzbiory oblicza się tzw. dolne ograniczenia (ang. *lower bound*) i wybiera podzbiór z mniejszą wartością.

Stosowanie metody podziału i ograniczeń w problemach takich jak obiegowanie pociągów wymaga stosowania metod relaksacji problemu dyskretnego, tj. metod kombinatorycznych w zakresie warunków całkowitoliczbowości, zmniejszania liczby ograniczeń itp., jak np. procedura generacji kolumn „column generation”.

### 3.2.3. Algorytmy genetyczne

Reprezentantem metod ewolucyjnych bardzo popularnym w rozwiązywaniu rzeczywistych problemów jest algorytm genetyczny. Algorytmy oparte o mechanizmy ewolucyjne pozwalają na efektywne przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań wykazując przy tym odporność na błędzenie w optimach lokalnych. Algorytmy genetyczne są często wykorzystywane w różnych problemach optymalizacji, w tym w problemach cyrkulacji pociągów czy harmonogramowaniu.

Kolejne kroki ogólnego algorytmu genetycznego można przedstawić następująco:

- KROK 1: Generuj rozwiązanie początkowe w postaci populacji  $P_0$  i przypisz  $P = P_0$ .
- KROK 2: Wyznacz wartość funkcji przystosowania dla poszczególnych osobników w populacji  $P$ .
- KROK 3: Sprawdź czy spełniony został warunek stopu, jeżeli tak to zwróć populację  $P$  i wskaż najlepszego osobnika, jeżeli nie przejdź do kroku 4.
- KROK 4: Wykonaj selekcję osobników w populacji  $P$ .
- KROK 5: Wykonaj krzyżowanie wybranych osobników.
- KROK 6: Wykonaj mutację na wybranych osobnikach i utwórz z nich populację potomną  $P^*$ .
- KROK 7: Oceń populację  $P^*$  i zastąp populację  $P$  oraz wróć do kroku 3.

Opracowywane algorytmy genetyczne różnią się sposobami reprezentacji rozwiązania, funkcją przystosowania, generowaniem rozwiązania początkowego, mechanizmami selekcji, krzyżowania, mutacji, naprawy osobników, a także warunkiem stopu.

Reprezentacja rozwiązania w algorytmach genetycznych (GA) pozwala na dopasowanie wyniku do potrzeb decydenta. W GA stosowane są różne reprezentacje związane ze sposobem kodowania poszczególnego osobnika (np. kodowanie binarne, dziesiętne itd.), a także związane ze sposobem reprezentacji populacji. W metodach tych rozróżnia się dwa główne podejścia tj. podejście Michigan i podejście Pittsburg. W podejściu Michigan w chromosomie pojedynczego osobnika zakodowane jest całe rozwiązanie i osobniki w ramach jednej populacji rywalizują ze sobą. Natomiast w podejściu Pittsburg osobniki wchodzące w skład całej populacji współpracują ze sobą celem uzyskania najlepszego wyniku dla całej populacji, która w tym podejściu jest rozwiązaniem.

Generowanie populacji początkowej to pierwszy etap algorytmu mający na celu utworzenie populacji o określonej wielkości. Dobór liczby osobników (lub liczby generowanych populacji) może wpływać na rozwiązanie i przy małej liczbie może błądzić wśród minimów lokalnych, natomiast przy dużej liczbie zwiększa się czas obliczeń.

Kolejnym problemem jest metoda generowania populacji początkowej. Na ogół, przyjmuje się, iż osobniki są generowane losowo, natomiast możliwe jest także stosowanie innych algorytmów pozwalających na uzyskanie lepszych rozwiązań początkowych. Stosowanie takich rozwiązań może jednak prowadzić do sytuacji patologicznych gdzie populacje potomne będą uzyskiwały gorsze rezultaty od populacji początkowej.

Funkcja przystosowania osobnika w populacji ma często interpretację funkcji celu rozważanego zadania. Konieczna jest ocena każdego osobnika, aby móc dokonać selekcji osobników. W funkcji przystosowania często uwzględnia się również ograniczenia zadania optymalizacyjnego. Oznacza to, że w funkcji tej uwzględnia się kary za ich niespełnienie. Możliwe jest jednak egzekwowanie ograniczeń poprzez zabijanie lub naprawę osobników.

Selekcja osobników jest mechanizmem, który pozwala na wybór osobników z których zostanie utworzona populacja potomna. Wśród najbardziej popularnych metod selekcji wyróżnia się metodę ruletki, metodę turniejową czy rankingową.

Metoda ruletki polega na podziale koła na obszary odpowiadające poszczególnym osobnikom ( $q_i$ ) i o wielkości proporcjonalnej do wartości funkcji przystosowania  $f(q_i)$ .

Prawdopodobieństwo wybrania osobnika wynosi więc 
$$p(q_i) = \frac{f(q_i)}{\sum_{q_i \in P} f(q_i)} .$$

Metoda turniejowa polega natomiast na losowym wyborze grup turniejowych, z których wybiera się najlepszego osobnika. Grupy turniejowe mogą składać się z dwóch lub więcej osobników. W przypadku metody rankingowej występuje sortowanie osobników wg wartości funkcji przystosowania i poszczególne osobniki wybierane są proporcjonalnie do jej wartości. Należy jednak zwrócić uwagę, iż do utworzenia populacji potomnej powinno się wybierać nie tylko te osobniki o najwyższej wartości funkcji przystosowania lecz także te słabsze. Wynika to z tego, iż dwa słabe osobniki mogą dać bardzo dobrego osobnika potomnego oraz powoduje to, iż algorytm nie jest zbyt zachłanny.

Krzyżowanie osobników jest mechanizmem pozwalającym na generowanie z osobników rodzicielskich jednego lub większej liczby osobników potomnych. Ten etap odpowiada za poprawę kolejnych wyznaczanych rozwiązań, przy czym nie może się to odbywać zupełnie przypadkowo. Występuje dużo różnych metod, często zależnych od sposobu kodowania chromosomu osobnika, a jako przykładowe mechanizmy można wskazać PMX (partially matched crossover), OX (ordered crossover), UOBX (uniform order based crossover), RBX (route based crossover). Krzyżowanie realizowane na osobnikach rodzicielskich wykonywane może być z pewnym prawdopodobieństwem. Możliwe jest także stosowanie zasady elitaryzmu (ang. elitism) czyli przenoszenia do nowej populacji najlepszych osobników bez modyfikacji, mogą jednak oni być nadal wykorzystani do krzyżowania.

#### **3.2.4. Symulowane wyżarzanie**

Na podstawie pracy [97] przedstawiono ogólny opis, algorytmu Symulowanego Wyżarzania (Simulated Annealing – SA). Algorytm ten jest heurystyką, nie daje gwarancji znalezienia rozwiązania optymalnego, ale umożliwia znalezienie rozwiązania w akceptowalnym czasie. W pracach badawczych pojawia się wiele wersji algorytmu SA. Pseudokod algorytmu przedstawiono na rys. 3.3.

Parametry algorytmu to:

- $k$  - to numer iteracji,
- $N$  - liczba iteracji,
- $Temp$  - temperatura (zmienna w czasie),
- $t^0$  to - początkowy krok algorytmu,
- $e$  – bieżąca pozycja, sprawdzana na każdym kolejnym kroku algorytmu sąsiedztwo bieżącej pozycji.

---

**Algorithm 1.** Simulated Annealing

---

```

1: function Ascent(N, Temp, t0)
2:   e = π0 = 0                                     ▷ Initial
3:   for k = 0 → N do
4:     e' = GetNeighbor(e, tk)
5:      $\Delta$  = Fitness(e') – Fitness(e)           ▷ Maximize fitness
6:     if  $\Delta \geq 0$  then                           ▷ Better solution
7:       e = e'
8:     else
9:       if  $\exp(\frac{-\Delta}{Temp}) \geq Uniform(0, 1)$  then   ▷ Accept worse solution with
probability
10:        e = e'
11:       end if
12:     end if
13:     Temp = Cooling(Temp)
14:     tk+1 = Cooling(tk)                       ▷ Decrease step size
15:   end for
16: end function

```

---

Rys. 3.3. Algorytm symulowanego wyżarzania

Źródło: [152]

W przypadku znalezienia lepszego rozwiązania takie rozwiązanie jest akceptowane jako obecne. Jeśli rozwiązanie uzyskane z sąsiedztwa jest gorsze, w stosunku do obecnego, takie rozwiązanie jest akceptowane z pewnym prawdopodobieństwem. Im wyższa temperatura, tym większe prawdopodobieństwo. Funkcja Uniform zwraca losową wartość z zakresu [0, 1) rozkładu jednolitego. Po każdej iteracji algorytmu następuje proces chłodzenia - zarówno temperatury, jak i kroku. Fitness oznacza ocenę rozwiązania.

Algorytm Symulowanego wyżarzania podobnie jak np. w algorytmach genetycznych charakteryzuje się stosowaniem różnych technik przeszukiwania przestrzeni rozwiązań. Należy określić procedurę generowania sąsiednich rozwiązań oraz funkcję prawdopodobieństwa akceptacji rozwiązania czy harmonogram temperatury wyżarzania. Wybór poszczególnych cech algorytmu ma znaczący wpływ na jej skuteczność.

W badaniach naukowych często stosowane są rozwiązania komercyjne nie dedykowane do rozwiązywania konkretnego problemu. Może to być m.in. CPLEX, Mathematica czy MatLab. CPLEX jest oprogramowaniem IBM, służącym do rozwiązywania liniowych problemów w wariantach prymalno-dualnych z zastosowaniem metody simplex, programowania kwadratowego itp. MATHEMATICA to narzędzie, a zasadniczo środowisko programowania do rozwiązywania różnych zagadnień matematycznych, w tym problemów optymalizacji. Moduł optymalizacji pozwala na optymalizację statyczną z ograniczeniami z zastosowaniem programowania liniowego, optymalizacji nieliniowej, np. metodą symulowanego wyżarzania. MATLAB środowisko inżynierskie wyposażone w moduł optymalizacji rozwiązującej



zagadnienia programowania liniowego, programowania kwadratowego, i nieliniowego, a także moduł pozwalający na stosowanie metod ewolucyjnych w zagadnieniach jedno i wielokryterialnych.

### **3.3. Wnioski wynikające z analizy stanu wiedzy**

Analiza literatury przedmiotu wykazała, że problem badawczy polegający na doborze taboru do realizacji zadań przewozowych w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach, ze względu na jego skomplikowany charakter nie może być rozwiązany metodami klasycznymi i numerycznymi. Dlatego też zdecydowano się na zastosowanie przybliżonych algorytmów heurystycznych umożliwiających uzyskanie rozwiązania dla tego problemu.

Dla rozwiązania problemu badawczego wybrano metodę polegającą na budowie modelu, a następnie zastosowanie algorytmu heurystycznego do jego rozwiązania. Jak wcześniej przedstawiono heurystyka stała się alternatywą w stosunku do tradycyjnych metod rozwiązujących zadania optymalizacyjne. Stanowi ona zbiór specyficznych dla danego problemu reguł, które mogą przyczynić się do odkrycia najlepszego rozwiązania. Rozwiązań heurystycznych nie da się udowodnić teoretycznie, lecz można pokazać ich trafność w rozwiązywaniu zagadnień praktycznych.

Prezentowany w dalszej części rozprawy algorytm odwzorowuje dobór taboru do realizacji zadań przewozowych w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach. Zastosowanie tej metody znacznie poprawi wykorzystanie taboru w szerokim tego słowa znaczeniu i zwiększy efektywność funkcjonowania podmiotu, którego jest własnością.

## **4. GOSPODARKA WAGONAMI TOWAROWYMI W KONTEKŚCIE OBROTU TABOREM**

### **4.1. Gospodarka wagonami towarowymi**

Zmieniający się na przestrzeni lat rynek transportowy oraz zmiany w ilości transportowanej masy towarowej wymagają od przewoźników kolejowych dostosowania swojego potencjału do podatności transportowej przewożonych ładunków oraz struktury zapotrzebowania na wagony towarowe. W przewozach masy towarowej środkami transportu kolejowego bardzo dużą rolę odgrywają najwięksi usługobiorcy, którymi są zakłady petrochemiczne, zakłady przemysłu drzewnego, zakłady przemysłu energetycznego, zakłady przemysłu budowlanego, kopalnie, żwirownie, cementownie, zakłady przemysłu spożywczego oraz wojsko.

Zróżnicowany asortyment przewożonych przez kolej ładunków wymaga od przewoźnika dysponowania odpowiednimi wagonami, które są konstrukcyjnie przystosowane do przewozu różnych rodzajów towarów. Konstrukcja wagonu musi ponadto pozwalać na łatwe stosowanie zmechanizowanych technologii ładunkowych (czynności załadunkowych i wyładunkowych) np. za pomocą wózków widłowych, urządzeń załadunku pionowego bądź urządzeń do rozładunku grawitacyjnego czy pneumatycznego. Wśród ogółu eksploatowanych wagonów występują wagony specjalistyczne, które są przystosowane do przewozu wyłącznie jednego rodzaju ładunku np. wagony do przewozu: kontenerów (wagony kontenerowe), naczep samochodowych (wagony kieszeniowe), samochodów osobowych (wagony dwupoziomowe), towarów w stanie płynnym (cysterny), sypkich (wagony „kotły” i niekryte samowyładowcze), towarów zamrożonych (wagony chłodnie) czy też do przewozu ładunków nienormatywnych i szczególnie ciężkich (wagony z zagłębioną podłogą, członowe i burtowe).

Ogólnie można powiedzieć, że wagon towarowy to pojazd kolejowy przeznaczony do transportu ładunków. Wagon ten składa się z dwóch głównych części: podwozia oraz nadwozia. W skład podwozia wchodzi ostoja (rama wagonu), która oparta jest na kołach. Na ostoi oparty jest układ hamulcowy i mechaniczny, zderzaki i urządzenie ciąglowe. Nadwozie ma budowę przystosowaną odpowiednio do rodzaju transportowanego ładunku. Wagony towarowe dzieli się na [158]:

- wagony kryte,
- wagony węglarki,

- wagony platformy,
- wagony cysterny,
- wagony specjalne.

Ze względu na przeznaczenie wagonów i ich budowę można wyróżnić tabor kolejowy do:

- przewozu materiałów niebezpiecznych w postaci cieczy, gazów lub chemii, materiałów sypkich i drobnicy,
- przewozów specjalnych np. do realizacji przewozów ponadgabarytowych,
- przewozów skonteneryzowanych (np. wagony techniczne).

Ze względu na przeznaczenie eksploatacyjne wagony dzieli się na:

- handlowe – przeznaczone do obsługi wszystkich użytkowników korzystających z usług kolei,
- służbowe – przeznaczone do potrzeb własnych przedsiębiorstw kolejowych.

Ponadto, często stosuje się inne kryteria podziału takie jak ze względu na podmiot własności oraz ze względu na parametry konstrukcyjne.

Według jednolitej klasyfikacji sporządzonej przez Międzynarodowy Związek Kolei (UIC) wagony towarowe kolei europejskich podzielone są na następujące rodzaje [126]:

- wagony węglarki typu normalnego (**E**) – wagony z wysokimi ścianami i płaską podłogą, bez dachu, przeznaczone do przewozu materiałów sypkich (węgiel, rudy, tłuczeń), ziemiopłodów (buraki, ziemniaki), albo nielicznych towarów jednostkowych (drewno, części maszyn),
- wagony węglarki typu specjalnego (**F**) – wagony dostosowane do wyładunku grawitacyjnego, dzięki odpowiedniemu kształtowi nadwozia i zastosowaniu mechanizmów z urządzeniami zsypowymi,
- wagony kryte typu normalnego (**G**) – wagony mające nadwozie pokryte dachem, a pudło wyposażone w drzwi przeznaczone do załadunku i wyładunku towaru,
- wagony kryte typu specjalnego (**H**) – wagony kryte wyposażone w dodatkowe urządzenia ułatwiające załadunek i wyładunek (np. przesuwane ściany, półki) oraz wagony przystosowane do przewozu żywych zwierząt, albo owoców i warzyw,
- wagony chłodnie (**I**) – wagony wyposażone w izolację termiczną i szczelne nadwozie oraz urządzenia chłodzące, przeznaczone przede wszystkim do przewozu ładunków łatwopsujących się,
- wagony platformy typu normalnego 2- i 4-osiowe (**K** i **L**) – wagony o dużej powierzchni ładunkowej przeznaczone do przewozu odpowiednich jednostek

ładunkowych (naczepy samochodowe, kontenery lub samochody ciężarowe), a także rur i szyn kolejowych,

- wagony platformy typu specjalnego 2- i 4-osiowe (**R** i **S**) – wagony przeznaczone np. do transportu samochodów, przewozu kontenerów,
- wagony z przesuwającym dachem (**T**) – wagony z odkładanym albo przesuwającym dachem umożliwiające załadunek z góry przy użyciu suwnicy,
- wagony cysterny (**Z**) – wagony przeznaczone do przewozów ładunków płynnych i gazowych,
- wagony specjalne (**U**) – wysokospecjalistyczne wagony, niemożliwe do zaklasyfikowania w pozostałych grupach.

Międzynarodowy Związek Kolejowy (UIC), uwzględniając zasadnicze kryteria techniczno-eksploatacyjne wagonów towarowych, podzielił je na następujące rodzaje, oznaczane równolegle cyframi i dużymi literami alfabetu [126]:

- 0-T - wagon z otwieranym dachem,
- 1-G - wagon kryty normalnej budowy,
- 2-H - wagon kryty specjalnej budowy,
- 3-K - wagon platforma normalnej budowy na osiach niezależnych,
- 3-O - wagon mieszany (węglarko-platforma) normalnej budowy 2- lub 3-osiowy,
- 3-R - wagon platforma normalnej budowy na wózkach,
- 4-L - wagon platforma specjalnej budowy na osiach niezależnych,
- 4-S - wagon platforma specjalnej budowy na wózkach,
- 5-E - wagon węglarka normalnej budowy,
- 6-F - wagon węglarka specjalnej budowy,
- 7-Z - wagon cysterna,
- 8-I - wagon chłodnia (izotermiczny),
- 9-U - wagon specjalny lub służbowy.

W przypadku wagonów towarowych zastosowanie mają przepisy o wzajemnym użytkowaniu wagonów towarowych w komunikacji międzynarodowej - RIV (Regolameto Internazionale dei Veicoli). Warunkiem prowadzenia gospodarki taborem wagonów towarowych jest zapewnienie ich identyfikacji przez odpowiednie oznakowanie, tzn. umieszczenie na wagonach symboli i liczb, które oznaczają: system wymiany, rodzaj oraz cechy konstrukcyjne i eksploatacyjne wagonu, numer inwentarzowy, dane o terminach

napraw okresowych itp. Oznaczenie wagonów jest dwojaki - cyfrowe i literowe, przy czym w obu przypadkach określają one:

- system wymiany w ruchu międzynarodowym;
- zarząd kolejowy będący właścicielem wagonu;
- rodzaj, typ i serię wagonu;
- kolejny numer wagonu w danej serii.

Przy określaniu danych techniczno-eksploatacyjnych wagonu, obok dużych liter, zamieszcza się małe litery oznaczające poszczególne cechy konstrukcyjne wagonu. Małe litery dzielą się na litery o znaczeniu międzynarodowym (umieszcza się je w porządku alfabetycznym za dużą literą rodzaju wagonu; litery te posiadają takie samo znaczenie w różnych państwach) oraz na litery o znaczeniu krajowym - umieszcza się je także w kolejności alfabetycznej po literach o znaczeniu międzynarodowym oddzielonych poziomą kreską (myślnikiem). Każdy wagon towarowy posiada odpowiednie oznaczenia, składające się z ujednoliconego, dwunastocyfrowego numeru inwentarzowego oraz oznaczenia literowe serii wagonów, zamieszczane na jego bocznych ścianach z lewej strony. Poniżej przedstawiony zostanie przykład oznaczenia wraz z interpretacją [126], [143]:

- 31 RIV MC – kod interoperacyjności (oznaczenie 31) – wagon towarowy TSI lub COTIF, których posiadacz jest przedsiębiorstwem kolejowym wykazanim w OPE TSI; wagon PPW, wagon na wózkach (oznaczenie: 3), zdatny do kursowania po torach o stałej szerokości (oznaczenie: 1), wagon zdatny do kursowania w systemie RIV (oznaczenie: RIV) i PPW (oznaczenie: MC),
- 51 PL-PKPC – identyfikator cyfrowy państwa rejestracji pojazdu kolejowego (oznaczenie: 51), identyfikator literowy państwa rejestracji pojazdu kolejowego (oznaczenie: PL), w którym dysponent uzyskał certyfikat bezpieczeństwa, autoryzację bezpieczeństwa lub świadectwo bezpieczeństwa (oznaczenie: PL) oraz identyfikator literowy dysponenta (VKM) (oznaczenie: PKPC = PKP Cargo),
- 082 2 253-2 - pierwsza cyfra oznacza kategorię wagonu towarowego (oznaczenie: 0 = wagon z otwieranym dachem, seria T), trzy następne cyfry to kolejne cechy techniczne wagonu (oznaczenie: 82 2), następne trzy cyfry to kolejny numer wagonu w danej serii produkcyjnej (oznaczenie: 253), ostatnia cyfra to cyfra samokontroli (oznaczenie: 2),
- Tadds – oznaczenie literowe, wagon z otwieranymi dachami (oznaczenie: T), czteroosiowy (oznaczenie: a), rozładunek samoczynny grawitacyjny na jedną lub

drugą stronę zsypy rozładunkowe usytuowane nisko (oznaczenie: dd) oraz przystosowany do kursowania z prędkością 100 km/h (oznaczenie: s),

- 2151 – identyfikator cyfrowy zarządu eksploatującego wagon.

W ramach każdego z wymienionych wyżej rodzajów wagonów istnieje kilka, a niejednokrotnie nawet kilkanaście, serii wagonów, różniących się właściwościami techniczno-eksploatacyjnymi, takimi jak: liczba osi, pojemność lub odpowiednio powierzchnia ładunkowa, granica obciążenia, wyposażenie wnętrza wagonu w odpowiednie urządzenia pozwalające na mocowanie ładunków, ich ewentualną wentylację czy też na zastosowanie zmechanizowanego załadunku i wyładunku towarów. Wszystkie właściwości techniczno-eksploatacyjne uwidocznione są na każdym wagonie za pomocą symboli, znaków i liter alfabetu oraz zawarte są w dwunastocyfrowym numerze inwentarzowym. Dane te stanowią istotną i wyczerpującą informację dostarczaną zainteresowanemu, bez konieczności wizualnego kontaktu z wagonem zamawianym pod załadunek. Mają też praktyczne znaczenie przy wnoszeniu reklamacji, kiedy utraciło się już możliwość wizualnego kontaktu z rozładowanym wcześniej i zwróconym przewoźnikowi wagonem.

Bliższe dane, dotyczące poszczególnych wagonów towarowych, znajdują się w katalogach wagonów towarowych, wydawanych przez przewoźników kolejowych.

## **4.2. Terminy stosowane przy gospodarce wagonowej**

W gospodarce wagonowej, zasadnym jest prowadzenie na bieżąco ewidencji wagonowej, która pozwala na bieżąco identyfikację taboru (wagonów ) znając ich status. Dla lepszego zrozumienia treści dysertacji zdefiniowano następujące terminy stosowane przy gospodarce wagonowej [79]:

- ilostan ewidencyjny – są to wszystkie wagony towarowe, które należą zarówno do przewoźnika kolejowego jak i prywatne oraz wynajęte,
- ilostan inwentarzowy – są to wszystkie wagony towarowe będące własnością przewoźnika kolejowego,
- ilostan ogólny – są to wszystkie wagony kolejowe zlokalizowane na sieci określonego zarządcy infrastruktury, niezależnie od ich przeznaczenia i przynależności; do tego ilostanu nie bierze się pod uwagę wagonów będących na granicy i wagonów szerokotorowych będących na liniach szerokotorowych,

- ilostan roboczy – są to wagony towarowe wykonujące pracę przewozową lub wagony, które mają zostać skierowane do pracy w niedługim czasie,
- ilostan wagonów wyłączonych z przewozu – są to wagony, które aktualnie znajdują się w naprawie, remontach i na bocznicach oraz wagony służbowe i prywatne,
- ilostan rozporządzalny – są to wagony towarowe, które można zadysponować do wykonania pracy w dniu bieżącym lub w kolejnym dniu; taki ilostan ustala się codziennie do godziny 09:00,
- dyspozycja wagonowa – są to wagony próżne, które zostały przydzielone pod załadunek,
- spływ wagonowy – są to określonego rodzaju wagony przydzielone pod masowy załadunek w danym obszarze sieci,
- spis wagonów – jest to numeryczna, ilościowa i rodzajowa identyfikacja wagonów towarowych.

### **4.3. Wagony towarowe prywatne**

#### **4.3.1. Uwagi ogólne**

Najemcy mogą wynajmować wagony od określonego przewoźnika kolejowego lub innego podmiotu, który jest ich dysponentem, w celu realizacji przewozów międzynarodowych oraz wewnętrznych [79]. Dysponent taboru może wnioskować o włączenie jego wagonów do ruchu na sieci poprzez złożenie odpowiedniego wniosku do komórki odpowiedzialnej za planowanie przewozów u przewoźnika kolejowego, do którego przynależy stacja macierzysta obsługująca dany rodzaj taboru. Przed włączeniem prywatnych wagonów do składu pociągu musi odbyć się komisja określająca stan techniczny wagonów. Każdy wagon prywatny musi posiadać nazwę i adres dysponenta wagonu.

#### **4.3.2. Zamawianie wagonów**

Dysponent (przewoźnik kolejowy lub inny podmiot) udostępnia zamawiającym wagony do realizacji określonych przewozów na podstawie dokonania zamówienia. Takie zamówienie

wypełnia nadawca ładunku lub w jego imieniu spedytor na specjalnym druku R-46 na stacji nadania przesyłki do przewozu. Nadawca ładunku podaje następujące dane niezbędne do realizacji zamówienia [79]:

- stację przeznaczenia i odbiorcę,
- dzień, na jaki chce zamówić wagony,
- ładunek, jego masę i wymiary/objętość,
- datę wystawienia,
- adres nadawcy,
- kraj przeznaczenia,
- stacje graniczne - jeśli wagon ma opuścić sieć macierzystego zarządcy infrastruktury.

Przy realizowaniu przewozów międzynarodowych mogą być używane wagony dysponowane przez danego przewoźnika kolejowego, jednak muszą być oznaczone, iż przystosowane są do komunikacji międzynarodowej RIV lub MC.

#### **4.3.3. Wykaz wagonów w składzie pociągu**

Po sformowaniu składu pociągu należy sporządzić wykaz wagonów na druku R-7 i R-8 [79]. Te wykazy pozwalają na sporządzanie sprawozdań przemieszczania się wagonów między rejonami zarządzanymi przez konkretne sekcje eksploatacji przewoźnika kolejowego. Dzięki nim można także ustalić gdzie i jaki wagon został wyłączony w momencie nie dotarcia do stacji przeznaczenia.

Sporządzenia wykazów mówiących o wagonach będących w składzie pociągu należy dokonać podczas postoju spisując je w kolejności, przyjmując że pierwszy wagon to wagon za lokomotywą. Na wykazie należy umieścić adnotację „Czoło pociągu”. Wykaz R-7, sporządza się w 2 egzemplarzach. Jeden zostaje na stacji macierzystej, a drugi na stacji przeznaczenia. Na stacji przeznaczenia rewident ustala, na podstawie wykazu R-7, wagony które przybyły na stację.

#### **4.3.4. Wagony podstawiane na punkt ładunkowy**

Po przybyciu pociągu na stację docelową należy odpowiednio zagospodarować wagony. Jednym z wariantów jest ich przekazanie na punkt ładunkowy z wykorzystaniem lokomotywy



manewrowej. Odbywa się to przy pomocy wykazów R-25 i R-26 [79]. Dla każdego punktu ładunkowego sporządza się oddzielne dokumenty. Tego typu wykazy zdawcze sporządzane są na podstawie dokumentów przewozowych, dyspozycji na przewóz taboru oraz poleceń pracy manewrowej (wykaz R-10). Do wykazu zdawczego wpisuje się wagony próżne i ładowne, zadysponowane do podstawienia w tej samej obsłudze.

Przyjmujący wagon na punkt ładunkowy ma prawo zażądać pisemnego odnotowania w wykazie zdawczym usterek i braków technicznych wagonów. Po zakończeniu obsługi punktu ładunkowego, przekazujący wagon dostarcza jeden egzemplarz wykazu zdawczego przyjmującemu wagony. Wykazy zdawcze są podstawą do rozliczeń i obciążeń klienta za obsługę manewrową.

#### **4.3.5. Wagony zabierane z punktu ładunkowego**

Po zakończeniu prac ładunkowych na terenie punktu ładunkowego, właściciel lub najemca boczniccy powiadamia kolej o zakończonych czynnościach pisemnie na druku R-27 i R-28, w godzinach zawartych na umowie bocznicowej [79]. Takiego powiadomienia należy dokonać najpóźniej godzinę przed ukończeniem prac bocznicowych.

Zawiadomienie powinno dotyczyć całej grupy wagonów do jednorazowego zabrania. Jeśli właściciel nie zakończył prac związanych z załadunkiem lub rozładunkiem, powinien powiadomić kolej przed planowaną obsługą. Jeśli obsługa odbyła się poza planowaną obsługą należy w zawiadomieniu odpisać, że odbyła się ona na żądanie właściciela boczniccy.

#### **4.4. Mierniki ruchu towarowego**

Każdy przewoźnik oprócz analizy opłacalności uruchamiania pociągów w poszczególnych relacjach przewozowych, bada również i inne aspekty pracy przedsiębiorstwa z wykorzystaniem mierników [90], w zakresie ekonomicznym, logistycznym odzwierciedlające zdarzenia i fakty z zakresu prowadzonej gospodarki w przedsiębiorstwie oraz jego otoczeniu wyrażone w odpowiednich jednostkach miary. Mierniki można podzielić na [90]:

- przewozowe:
  - tony – przewieziona masa,

- netto-tonokilometr – miernik pracy przewozowej odpowiadający przewiezieniu jednej tony towaru na odległość 1 km,
- pociągokilometr – miernik pracy eksploatacyjnej odpowiadający przejazdowi jednego pociągu na odległość 1 km,
- dotyczące pracy wagonów:
  - załadunek statyczny – stosunek masy przewozowej netto w tonach i ilości wagonów, w których ta masa została przewieziona,
  - liczba nadań wagonów w miesiącu,
- przychodowe:
  - przychody uzyskane z działalności przewozowej,
  - marża na realizowanych przewozach,
  - rentowność,
  - zysk,
- kosztowo-sprawnościowe:
  - cykl pracy wagonu towarowego,
  - łączny koszt przemieszczania wagonów,
  - stopień wykorzystania wagonów – jest to [%] stosunek przebiegu wagonów próżnych do ładownych.

Wyżej wymienione mierniki są odwzorowaniem pracy wykonanej przez przewoźnika. Ważną rolę spełnia cykl pracy wagonu (wagonów). Miernik ten obrazuje jak sprawnie funkcjonuje przewoźnik w obszarze eksploatacyjnym. Jak już wcześniej zostało zasygnalizowane cykl pracy wagonu zaczyna się od podstawienia wagonu próżnego pod załadunek i kończy z chwilą ponownego podstawienia tego samego wagonu pod kolejny załadunek. Każdy właściciel wagonu (wagonów) dąży do tego, aby cykl wagonu (wagonów) był jak najkrótszy.

## 5. GOSPODARKA POJAZDAMI TRAKCYJNYMI

### 5.1. Założenia ogólne dotyczące gospodarki pojazdami trakcyjnymi

Duże znaczenie w realizacji potrzeb przewozowych mają zagadnienia racjonalnego wykorzystania pojazdów trakcyjnych oraz właściwej organizacji pracy obsługujących je drużyn trakcyjnych. Osoby odpowiedzialne za planowanie pracy zespołów obsługujących pojazdy na wszystkich szczeblach zarządzania i kierowania wiele uwagi poświęcają tym zagadnieniom. Efektywna technicznie i ekonomicznie praca dyspozytury trakcyjnej wymaga nie tylko stosowania odpowiednich środków trakcyjnych, ale również należytego ich utrzymania i wykorzystania. Wymaga także doboru odpowiednich serii lokomotyw i wagonów do rodzaju zadania przewozowego, określonego masą i prędkością pociągu, masą i objętością ładunku, profilem linii kolejowej, dopuszczalnym naciskiem osi na szyny itp. Bardzo istotnym zagadnieniem jest również właściwa organizacja pracy pojazdów, która pozwala na to by ich praca była efektywna (zarówno pod względem czasu jak i kosztów).

Zasadniczymi zadaniami gospodarki pojazdami trakcyjnymi są [70]:

- utrzymanie ich w jak najlepszym stanie technicznym,
- zapewnienie sprawnej i dobrej obsługi,
- wykonywanie zadań przewozowych minimalną liczbą pojazdów,
- troska o racjonalne zużycie materiałów pędnych (energii elektrycznej i paliwa) i smarów oraz innych materiałów niezbędnych do utrzymania i eksploatacji posiadanych pojazdów trakcyjnych.

Aby gospodarka pojazdami trakcyjnymi mogła być realizowana w sposób racjonalny należy [70]:

- prowadzić ścisłą ewidencję pojazdów będących w dyspozycji,
- racjonalnie planować ich pracę,
- rejestrować i śledzić osiągnięte wartości uzyskanych wskaźników techniczno-eksploatacyjnych przez ich analizę i krytyczną ocenę,
- skrócić nieproduktywne postoje pojazdów podczas przebywania w naprawie, w obrządzaniu bądź w oczekiwaniu na podjęcie pracy pociągowej czy manewrowej,
- przydzielać pojazdy trakcyjne do realizacji takiej pracy, przy której ich właściwości trakcyjne mogą być najlepiej wykorzystywane.

Właściwe wykonanie przedstawionych powyżej zadań zapewnia sprawną obsługę trakcyjną przy minimalnych kosztach eksploatacyjnych. Należy zauważyć, że zakres zagadnień obsługi trakcyjnej jest bardzo szeroki, a jej rola w transporcie kolejowym ma podstawowe znaczenie dla sprawności pracy kolei. Staje się oczywiste, jak ważną sprawą jest właściwa gospodarka pojazdami oraz właściwe ich wykorzystanie i jaki wpływ ma ona obniżenie kosztów eksploatacji.

## 5.2. Rodzaje pracy pojazdów trakcyjnych

Podstawową zasadą racjonalnej gospodarki pojazdami trakcyjnymi jest ich racjonalne wykorzystanie odpowiednio do ich przeznaczenia. Wykorzystanie pojazdu trakcyjnego do realizacji określonych zadań w transporcie kolejowym nazywa się ich pracą.

Pracę pojazdów trakcyjnych można podzielić w sposób następujący [70], [90]:

- praca właściwa:
  - praca pociągowa:
    - zasadnicza: prowadzenie pociągu trakcją pojedynczą lub podwójną (oraz popychanie pociągu),
    - dodatkowa: manewry pociągowe, postój w tzw. pogotowiu (w celu podjęcia pracy pociągowej zasadniczej), jazdę luzem na szlaku do albo od pociągu oraz do pilotowania pociągu,
  - praca pozapociągowa:
    - zasadnicza: manewry stacyjne oraz ogrzewanie składów wagonów,
    - dodatkowa: postój w tzw. pogotowiu celem podjęcia pracy pociągowej zasadniczej, jazda luzem do i z pracy zasadniczej pozapociągowej oraz do i z naprawy,
- praca zastępcza: wykonuje ją pojazd trakcyjny wtedy, gdy jest użytkowany w zastępstwie innych urządzeń.

Pojazdy trakcyjne mogą być wykorzystywane w następujących rodzajach ruchu: pasażerskim, towarowym, służbowym, roboczym oraz w pracy manewrowej. Wymienione rodzaje ruchu łącznie noszą nazwę ruchu ogólnego. Należy zauważyć, że [70]:

- do pociągów osobowych dalekobieżnych zalicza się te, które kursują na odległość dłuższą niż 200 km,

- do pociągów osobowych miejscowych zalicza się pociągi kursujące na odległość do 200 km,
- do pociągów mieszanych osobowo-towarowych zalicza się pociągi, które przede wszystkim służą do przewozu osób i w składzie posiadają więcej wagonów osobowych niż towarowych,
- do pociągów mieszanych towarowo-osobowych zalicza się pociągi, które służą przede wszystkim do przewozu towarów i w składzie mają więcej wagonów towarowych niż osobowych,
- do pociągów towarowych dalekobieżnych zalicza się pociągi, których trasa przebiega przez co najmniej jedną stację rozrządową lub manewrową bez rozrządzenia,
- do pociągów gospodarczych zalicza się pociągi, które służą do przewozu wyłącznie ładunków dla potrzeb kolei,
- do pociągów towarowo-roboczych zalicza się pociągi, które są wysyłane na szlak i służą dla naładunku bądź wyładunku materiałów do robót drogowych.

Wielkość pracy wykonywanej przez pojazdy trakcyjne określa się w stosunku do [70]:

- odległości, na którą praca została wykonana – miernikiem pracy pojazdu trakcyjnego są pojazdokilometry (np. jeżeli pojazd trakcyjny przebył odległość 150 km to wówczas wykonał on pracę 150 pojazdokm.),
- masy brutto wagonów w składzie pociągu, który pojazd trakcyjny prowadzi na danym szlaku kolejowym – miernikiem pracy pojazdu trakcyjnego są bruttotonokilometry (btkm.), które określa się iloczynem masy brutto składu wagonów w tonach i odległości przewozu w kilometrach,
- czasu pracy pojazdu trakcyjnego – miernikiem pracy pojazdu trakcyjnego są pojazdogodziny, które przelicza się na pojazdokilometry w następującej wysokości: jedna godzina pracy manewrowej, ogrzewania wagonów, mycia i odkazania wagonów lub gaszenia pożarów odpowiada 5 pojazdokilometrom, a jedna godzina postoju w pogotowiu - 2 pojazdokilometrom.

Pracę pociągową zasadniczą określa się liczbą wykonanych pojazdokilometrów i bruttotonokilometrów. Przy trakcji podwójnej i popychaniu liczbę wykonanych bruttotonokilometrów dzieli się równo między oba pojazdy trakcyjne, zliczając jednocześnie oddzielnie dla każdego pojazdu liczbę wykonanych pojazdokilometrów. Pracę czynnego pojazdu trakcyjnego niebiorącego udziału w prowadzeniu pociągu, do którego został włączony, zalicza się również jako jazdę luzem.

### 5.3. Zasady eksploatacji pojazdów trakcyjnych

Racjonalna i ekonomiczna eksploatacja pojazdów trakcyjnych wymaga nie tylko doboru odpowiednich typów lokomotyw do rodzaju pracy pociągowej, lecz także właściwej organizacji pracy pojazdów. Wyrazem takiej organizacji są plany pracy pojazdów trakcyjnych. Plan pracy pojazdów trakcyjnych ustala porządek i kolejność ich przejść z pociągu na pociąg (tzw. obieg pojazdów trakcyjnych). Z wielu wariantów obiegów pojazdów trakcyjnych, w danej dobie tylko jeden może być przyjęty jako plan jego pracy. Powinien to być wariant spełniający warunki stawiane prawidłowej eksploatacji pojazdów trakcyjnych i organizacji pracy drużyn trakcyjnych. Plan jest sporządzany dla wszystkich pojazdów trakcyjnych i obsługujących drużyn w celu wykonania wszystkich zadań przewozowych przydzielonych do wykonania uwzględniając potrzeby rynku, zatem są one przeznaczone do obsługi [70]:

- stałych i sezonowych pociągów pasażerskich,
- stałych pociągów towarowych: dalekobieżnych, zdawczych liniowych i zdawczych międzystacyjnych,
- pociągów okazjonalnych przewożących masowo pasażerów (np. kolonijnych),
- wszelkich innych pociągów, które należy ująć w planie pracy,
- pracy pozapociągowej.

W planach pracy pojazdów trakcyjnych powinny być zaprezentowane najważniejsze elementy obrotu pojazdu trakcyjnego:

- odcinki obsługi trakcyjnej i ich długości,
- godziny przyjazdów i odjazdów pociągów dla stacji macierzystych i zwrotnych,
- numery pociągów i kolejność ich obsługi,
- rozkładowe obciążenie, lecz tylko dla pociągów towarowych.

W celu jak najlepszego wykorzystania pojazdów trakcyjnych przy sporządzaniu planów pracy należy [70]:

- tak dobrać kolejność pociągów obsługiwanych przez pojazd trakcyjny, aby czas przejścia od pociągu do pociągu był możliwie najkrótszy (czas postoju na stacjach zwrotnych), lecz wystarczający dla zapewnienia przygotowania pojazdu trakcyjnego do obsługi następnego pociągu,
- dobierać taki sposób obsługi, który zapewni najlepsze wykorzystanie pojazdów trakcyjnych,

- rozważyć możliwość obsłużenia pojedynczych pociągów kursujących na krótkich odcinkach, przez pojazdy trakcyjne z obrębu innych planów pracy, wykorzystując ich dłuższe przerwy między pociągowe.

Plany pracy pojazdów trakcyjnych są opracowywane na podstawie systemu informatycznego SKRJ (System Konstrukcji Rozkładu Jazdy), w którym znajduje się rozkład jazdy wszystkich pociągów danego przewoźnika kolejowego przewidzianych do obsługi na obowiązujący rozkład jazdy. Po ustaleniu listy pociągów, dla których przeprowadzany będzie proces planowania, oraz ustaleniu wykazu pociągów obsługiwanych przez konkretną sekcję eksploatacji przewoźnika, na podstawie przydzielonych odcinków obsługi trakcyjnej są sporządzane obiegi pojazdów trakcyjnych.

Do planowania pracy pojazdów trakcyjnych wykorzystuje się dedykowane narzędzia informatyczne z zaimplementowanymi algorytmami optymalizacyjnymi, takimi jak np. „OBIEG 9” czy DPK Railways. Stosowanie wyżej wymienionych systemów pozwala m.in.:

- ustalić minimalną liczbę pojazdów trakcyjnych niezbędnych do realizacji analizowanych zadań,
- ustalić niezbędną liczbę jazd luzem oraz wskazać najodpowiedniejsze przedziały czasu ich kursowania,
- ustalić pełny zbiór optymalnych przejść pojazdów trakcyjnych,
- zaprojektować plan obiegu pojazdów trakcyjnych.

Zastosowanie komputerów w planowaniu obsługi trakcyjnej pociągów otwiera możliwości naukowego doskonalenia metod organizacji pracy pojazdów, składów pociągów i drużyn trakcyjnych. Należy też oczekiwać poprawy efektów ekonomicznych przez zmniejszenie liczby jazd luzem pojazdów trakcyjnych oraz próżnych składów pociągów zarówno do przewozu pasażerów jak i towarów.

Plan pracy pojazdów trakcyjnych opracowuje się dla poszczególnych sekcji eksploatacji przewoźnika kolejowego. Plany te określają powiązanie obrotu pojazdów i drużyn trakcyjnych z wyznaczonymi w wykresie ruchu pociągami, które mają być prowadzone pojazdami danej sekcji. Plany opracowuje się w sposób zapewniający jak najlepsze wykorzystanie pojazdów trakcyjnych, przy jednoczesnym przestrzeganiu nieprzekraczalnego czasu pracy drużyn trakcyjnych i czasu niezbędnego na obrządzanie oraz czasu na przeglądy techniczne pojazdów trakcyjnych.

Odcinki linii kolejowej na których sekcja eksploatacji przewoźnika kolejowego obsługuje pociągi przynależnymi do niej pojazdami trakcyjnymi, są dla niej odcinkami obsługi trakcyjnej. Należy zauważyć, że ten sam odcinek linii kolejowej może być odcinkiem obsługi trakcyjnej dla kilku sekcji eksploatacji lub nawet kilku przewoźników kolejowych. Przy ustalaniu przydziału i długości odcinków obsługi trakcyjnej, dąży się do wykonania zadań przewozowych możliwie najmniejszą liczbą pojazdów trakcyjnych, uwzględniając także wykorzystanie czasu pracy drużyn obsługujących pojazdy.

Gdy pojazdy trakcyjne danej sekcji eksploatacji przewoźnika kolejowego obsługują pociągi w jednym kierunku na dwóch odcinkach o różnej długości, to odcinki te nazywają się odcinkami nakładanymi. Konieczność pracy na nakładanych odcinkach obsługi trakcyjnej wynika z potrzeby prowadzenia pociągów pasażerskich i towarowych. Prędkość handlowa pociągów pasażerskich jest znacznie większa niż pociągów towarowych, dlatego mogą one kursować na dłuższych odcinkach obsługi trakcyjnej.

## **5.4. Planowanie pracy pojazdów trakcyjnych**

### **5.4.1. Wykresy pracy pojazdów trakcyjnych**

Pracę pojazdów trakcyjnych planuje się w sposób graficzny. Wykresem pracy pojazdów trakcyjnych (turnusem) nazywa się plan pracy pojazdów trakcyjnych przedstawiony wykreślnie (graficznie) na podstawie obowiązującego wykresu ruchu pociągów, z uwzględnieniem przyjętego sposobu obsługi pociągów przez pojazdy trakcyjne ustalonego systemu trakcyjnego.

Praca pojazdów trakcyjnych powinna być tak zorganizowana (w postaci wcześniej opracowanych planów pracy - turnusów), aby umożliwić jak najlepsze wykorzystanie tych pojazdów. Plan pracy pojazdów trakcyjnych ustala porządek i kolejność przejść lokomotyw z pociągu na pociąg na stacjach początku i końca jazdy pociągów, tworząc obieg pojazdów trakcyjnych. Uaktualnienie lub ustalenie na nowo planów pracy pojazdów trakcyjnych odbywa się przy każdej zmianie rozkładu jazdy pociągów, wymagającej zapewnienia określonego sposobu obsługi trakcyjnej oraz organizacji pracy punktów rewizyjnych i gniazd drużyn trakcyjnych. Proces ustalania obiegów pojazdów trakcyjnych można podzielić na trzy etapy [70]:



- wybór pociągów,
- optymalizacja przejeżdż,
- ustalenie obiegów pojazdów trakcyjnych.

Przy ustalaniu planów pracy pojazdów trakcyjnych dąży się do takiej obsługi przydzielonych pociągów, aby była użyta możliwie najmniejsza ich liczba . Dla opracowania planów pracy niezbędne jest przyjęcie następujących założeń [70]:

- Należy dokonać racjonalnego podziału zadań przewozowych w ruchu pasażerskim i towarowym pomiędzy poszczególne rodzaje trakcji, uwzględniając ich właściwości i przydatność technologiczną, eksploatacyjną oraz przesłanki ekonomiczne.
- Dokonać podziału terenowego zadań uwzględniając alokację środków stanowiących inwentarz poszczególnych sekcji eksploatacji przewoźnika kolejowego.
- Zgromadzić dane obrazujące istniejący stan dotyczący:
  - utrzymania i wyposażenia pojazdów trakcyjnych,
  - zajętości torów komunikacyjnych łączących sekcję eksploatacji przewoźnika kolejowego z grupami torów stacyjnych,
  - rozmieszczenie grup torów postojowych.
- Informacje statystyczne o wypełnieniu poszczególnych pociągów.
- Plany obiegu pojazdów trakcyjnych muszą być nawiązane do organizacji pracy drużyn trakcyjnych.

#### **5.4.2. Metody planowania pracy pojazdów trakcyjnych**

Problem ustalania planów pracy pojazdów trakcyjnych powstaje przy każdej zmianie rozkładu jazdy pociągów, wymagającej zapewnienia określonego sposobu obsługi trakcyjnej oraz organizacji pracy punktów rewizyjnych. Opracowanie racjonalnych planów pracy pojazdów trakcyjnych wymaga spełnienia warunków, które można określić jako:

- warunek inwestycyjny,
- warunek trakcyjny.

Warunek inwestycyjny jest to żądanie wykonania zadanej pracy przy użyciu możliwie najmniejszej liczby pojazdów trakcyjnych. Każdy organizator obsługi trakcyjnej dąży do spełnienia tego warunku, będącego z punktu widzenia ekonomicznego warunkiem podstawowym. Przez warunek trakcyjny rozumie się żądanie wykonania zadania przy najmniejszym koszcie związanym z pracą pojazdów trakcyjnych w zakresie zależnym od

organizacji obsługi trakcyjnej. Jest to warunek minimum: jazd luzem i czasu zaangażowania w pracy pojazdów trakcyjnych. Minimum jazd luzem może być rozumiane jako minimum liczby, długości drogi lub czasu tych jazd. Organizator obsługi trakcyjnej ustalając plany pracy pojazdów trakcyjnych, musi brać ponadto pod uwagę różne ograniczenia wynikające z:

- technologii pracy sekcji eksploatacji przewoźnika kolejowego,
- technologii pracy stacji,
- warunków pracy drużyn trakcyjnych.

Stosowany dotychczas sposób układania obiegów opiera się w głównej mierze na modyfikowaniu planów wykorzystywanych w ubiegłych latach. Jakość uzyskiwanych rozwiązań zależy w dużym stopniu od umiejętności i doświadczenia zatrudnionych pracowników. Otrzymanie rozwiązań racjonalnych z uwagi na wielkość zagadnienia i ograniczony czas jest praktycznie niemożliwe. Opracowujący plany pracy nie dysponują również możliwością dokonania w pełni obiektywnej oceny. Sporządzając plany pojazdów trakcyjnych, konstruktorzy dążą do znalezienia minimalnej liczby potrzebnych pojazdów. Stosują przy tym metody prób i błędów. Do metod prób i błędów zaliczamy:

- metodę dwóch kartek,
- metodę łączenia najbliższych przyjazdów i odjazdów,
- metodę bilansową.

Metoda dwóch kartek polega na tym, że oddzielnie dla każdej stacji obsługiwanego rejonu wypisuje się na jednej kartce godziny przyjazdów pociągów, a na drugiej - odjazdów. Następnie przykładą się kartkę z odjazdami do kartki z przyjazdami tak, aby pierwszy odjazd korespondował z pierwszym przyjazdem. Później sprawdza się, czy jest możliwe przejście pojazdu trakcyjnego z pierwszego przyjeżdżającego pociągu na pierwszy odjeżdżający. Jeśli nie jest to możliwe, to ponawia się próbę, przesuając kartkę z odjazdami w dół o jeden przyjazd i znów sprawdza się. Jeśli taka możliwość istnieje, to sprawdza się następnie pary przejść, postępując w ten sposób go, aż osiągnie się taką sytuację, w której będą mogły być zrealizowane wszystkie przejścia. Wielkość minimalnego czasu na przejścia dla każdej stacji ustala konstruktor w trakcie tych czynności.

Metoda łączenia najbliższych przyjazdów i odjazdów może być stosowana dwojako: na wyodrębnionym wykresie ruchu pociągów nawiasami kwadratowymi łączy się przyjazdy i odjazdy albo grupuje się kolejno pociągi według relacji - oddzielnie kierunek parzysty i nieparzysty, oraz kolejno tworzy się „figurki” obrotów, które następnie wyrysowuje na specjalnie do tego przeznaczonym druku.

W metodzie bilansowej do każdego momentu przyjazdu pociągu dodaje się minimalny czas na przejście na danej stacji, znajdując w ten sposób terminy gotowości pojazdów trakcyjnych do ponownej pracy. Następnie oblicza się i wykreśla kolejne wartości różnicy między narastającą sumą gotowych do pracy pojazdów trakcyjnych  $\Sigma N_p$ , które przybyły na stację od początku doby, a narastającą sumą odjazdów pojazdów trakcyjnych (pociągów)  $\Sigma N_o$ , liczoną też od początku doby. Wielkość różnicy  $\Sigma N_p - \Sigma N_o$  oblicza się dla każdej chwili gotowości pojazdu trakcyjnego i dla każdego odjazdu pociągu. Potem sporządza się wykres zależności różnicy  $\Sigma N_p - \Sigma N_o = f(t)$  w funkcji czasu. Dodatnia wartość różnicy stanowi o nadwyżce w danej chwili gotowych pojazdów trakcyjnych, ujemna - stanowi o ich braku. Aby zapewnić terminowy odjazd wszystkich pociągów potrzebne jest, aby w każdej chwili doby różnica ta była dodatnia lub równa zero. Metoda bilansowa służy do znalezienia racjonalnego przejścia pojazdów trakcyjnych za pierwszym razem, bez kolejnych prób. Pozwala ona także ocenić, czy właściwe jest powiązanie rozkładu jazdy pociągów z planami pracy pojazdów trakcyjnych. Znalezienie jednego z racjonalnych wariantów planu przejść pojazdów trakcyjnych i najmniejszej liczby pojazdów trakcyjnych nie kończy opracowania ich planu pracy.

### 5.4.3. Ograniczenia w planowaniu pracy pojazdów trakcyjnych

Rozkłady jazdy pociągów, dla których organizujemy obsługę trakcyjną, dzielimy na:

- okresowe i nieokresowe (24-godzinne, tygodniowe i inne),
- równoodstępowe (przedziałami) i nierównoodstępowe,
- symetryczne i niesymetryczne.

Przy 24-godzinnej okresowości rozkładu jazdy pociągów plany pracy pojazdów trakcyjnych opracowywane są tylko dla jednej doby. Przy innej okresowości rozkładu jazdy (np. gdy rozkład jazdy w niedzielę różni się od rozkładu jazdy w dni robocze), sporządza się plany pracy pojazdów trakcyjnych osobno na dzień roboczy i osobno na niedzielę, a następnie opracowuje się przejścia pojazdów trakcyjnych z soboty na niedzielę i z niedzieli na poniedziałek. Równoodstępowe rozkłady jazdy pociągów są przeważnie sporządzane dla mało skomplikowanego, wyodrębnionego układu sieci kolejowej. Ułożenie planów pracy pojazdów w tym przypadku nie przysparza poważniejszych trudności, ale jest pracochłonne.

Symetryczny rozkład jazdy polega na tym, że liczba pociągów przyjeżdżających na każdą stację jest równa liczbie odjeżdżających. Niesymetryczny rozkład jazdy przewiduje, że istnieje w tym rozkładzie co najmniej jedna stacja, do której przyjeżdża więcej pociągów niż z niej odjeżdża, oraz że istnieje co najmniej jedna stacja, z której odjeżdża więcej pociągów niż do niej przyjeżdża. Cykliczność jest pierwszym podstawowym założeniem wstępnym planowania obiegów pojazdów trakcyjnych. Cykliczność polega na tym, że po zakończeniu obsługi wszystkich pociągów ujętych w ułożonym planie pracy, pojazd trakcyjny zaczyna obsługę od początku. Cykliczność obiegu pojazdów trakcyjnych zapewnia rozkład jazdy symetryczny. Dla przekształcenia niesymetrycznego rozkładu jazdy w symetryczny trzeba trafnie dodać jazdy luzem (pociągi służbowe). Drugim podstawowym warunkiem opracowywanego planu obiegu pojazdów trakcyjnych jest zapewnienie realnego czasu przejścia potrzebnego na czynności technologiczno-techniczne. Jest więc niezbędne, aby minimalne czasy przejścia na poszczególnych stacjach nie były mniejsze od technologicznie niezbędnych czasów na te czynności wykonywane na każdej stacji zwrotnej (zmiana czoła pociągu). Trzecim warunkiem jest uwzględnienie w planie obiegu odpowiedniego czasu zarówno dla czynności stałych (standardowych), jak i dla czynności okresowych (np. przegląd kontrolny, wyposażenie itp.).

#### **5.4.4. Zasady rozliczania czasu pracy i gotowości**

Do czasu pracy pojazdu trakcyjnego należy zaliczyć wszystkie elementy czasu pobytu lokomotywy na torach należących do zarządcy infrastruktury innego niż przewoźnik kolejowy będący dysponentem lokomotywy, z wyłączeniem czasu gotowości. Do czasu gotowości należy zaliczać wszelkie czasy przesyłania lokomotywy luzem oraz przejścia i przebywania w tzw. pogotowiu pojazdu trakcyjnego z drużyną trakcyjną gotowego do pracy. Wszelkie czasy postoju zamówionego pojazdu trakcyjnego spowodowane jego usterkami technicznymi lub z winy drużyn trakcyjnych obciążają przewoźnika kolejowego.

Miernikiem pracy do wyliczenia kosztu energii trakcyjnej i opłat przesyłowych są tys. brtkm. wynikające z wykonanej obsługi lokomotywami elektrycznymi poruszającymi się po sieci zarządcy infrastruktury.

Należność za wykonaną obsługę trakcyjną składa się z należności za wykonaną pracę i za gotowość. Ustalony jest następujący sposób wyliczenia składników należności za wykonaną obsługę trakcyjną  $R$ , dla poszczególnych grup pojazdów trakcyjnych:

$$R = K \cdot C_K + P \cdot C_P + M \cdot C_M + E \cdot B \quad [\text{PLN}] \quad (5.1)$$

gdzie:

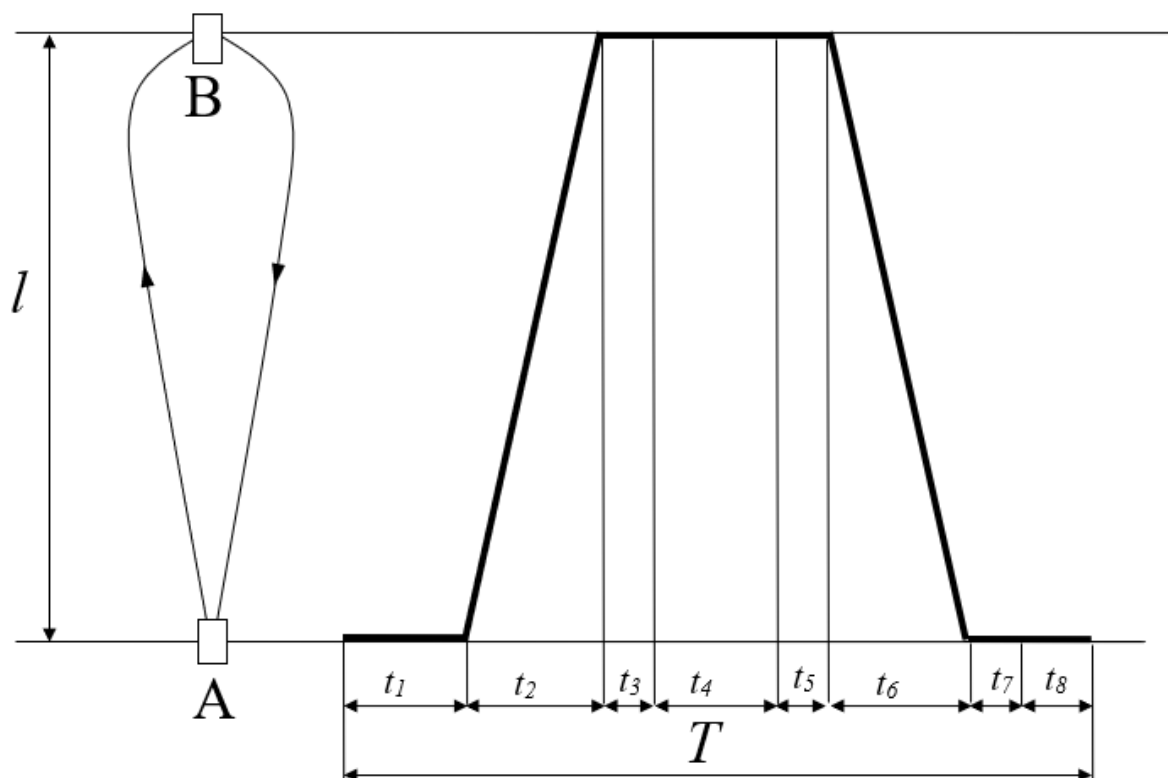
- $R$  – należność za wykonaną obsługę trakcyjną,
- $K$  – suma ilości godzin pracy pojazdów trakcyjnych, w obsłudze stałej i doraźnej, wykonanej w danym miesiącu,
- $C_K$  – stawka jednostkowa pracy pojazdu trakcyjnego [zł/pojgodz.],
- $E$  – stawka jednostkowa kosztu energii trakcyjnej i opłat przesyłowych (dotyczy tylko lokomotyw elektrycznych) [zł/tyśbrtkm.],
- $B$  – suma ilości brtkm w obsłudze stałej i doraźnej, wykonanej w danym miesiącu lokomotywami elektrycznymi,
- $P$  – suma ilości godzin gotowości pojazdów trakcyjnych w obsłudze stałej i doraźnej, wykonanej w danym miesiącu,
- $C_P$  – stawka jednostkowa za gotowość pojazdu trakcyjnego [zł/pojgodz.],
- $M$  – suma godzin przepracowanych przez członków drużyn trakcyjnych w danym miesiącu na sieci zarządcy infrastruktury,
- $C_M$  – stawka jednostkowa dla członka drużyny trakcyjnej (1 pracownika) [zł/godz.]

## 5.5. Obrót pojazdu trakcyjnego

### 5.5.1. Całkowity obrót pojazdu trakcyjnego

Miernikiem zaangażowania pojazdu trakcyjnego do realizacji zadań przewozowych jest całkowity obrót pojazdu trakcyjnego [70]. Jest to czas jaki upływa od chwili zgłoszenia się pojazdu trakcyjnego w punkcie kontrolnym macierzystej sekcji eksploatacji przewoźnika kolejowego w celu obsługi określonej pary pociągów do chwili ponownego zgłoszenia się tego samego pojazdu w tym samym punkcie kontrolnym w celu obsługi następnej pary pociągów. Obrót pojazdu trakcyjnego jest sumą czasów niezbędnych do wykonania wszystkich czynności związanych z prowadzeniem i obsługą jednej pary pociągów oraz przygotowaniem i obrządzaniem pojazdów trakcyjnych do następnej obsługi.

Graficzną reprezentację całkowitego obrotu pojazdu trakcyjnego przedstawiono na rys. 5.1 (gdzie: A i B to stacje,  $l$  to odległość między stacjami A i B w [km], pozostałe oznaczenia wyjaśnienia pod rysunkiem).



Rys. 5.1. Schemat całkowitego obrotu pojazdu trakcyjnego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [70]

Całkowity obrót pojazdu trakcyjnego  $T$  można przedstawić przy pomocy następującej formuły [70]:

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 \quad [\text{h}] \quad (5.2)$$

Poszczególne jego składniki oznaczają [70]:

- $t_1$  – czas od chwili zgłoszenia pojazdu trakcyjnego na punkcie kontrolnym macierzystej sekcji eksploatacji przewoźnika kolejowego do chwili odjazdu pociągu ze stacji kolejowej przy tej sekcji,
- $t_2$  – czas jazdy pociągu od stacji macierzystej sekcji eksploatacji przewoźnika kolejowego A do stacji zwrotnej B,

- $t_3$  – czas od chwili przyjazdu pociągu na stację zwrotną do chwili zgłoszenia się pojazdu trakcyjnego na punkcie kontrolnym zwrotnej sekcji eksploatacji przewoźnika kolejowego,
- $t_4$  – czas przebywania pojazdu trakcyjnego w zwrotnej sekcji eksploatacji przewoźnika kolejowego,
- $t_5$  – czas od chwili zgłoszenia pojazdu trakcyjnego na punkcie kontrolnym zwrotnej sekcji eksploatacji przewoźnika kolejowego do chwili odjazdu pociągu ze stacji zwrotnej,
- $t_6$  – czas jazdy pociągu od stacji zwrotnej do stacji macierzystej sekcji eksploatacji przewoźnika kolejowego,
- $t_7$  – czas od chwili przyjazdu pociągu na stację macierzystą sekcji eksploatacji przewoźnika kolejowego do chwili zgłoszenia pojazdu trakcyjnego na punkcie kontrolnym tej sekcji,
- $t_8$  – czas przebywania pojazdu trakcyjnego w macierzystej sekcji eksploatacji przewoźnika kolejowego.

### 5.5.2. Eksploatacyjny obrót pojazdu trakcyjnego

Drugim miernikiem wykorzystania pojazdu trakcyjnego jest jego obrót eksploatacyjny [70]. Jest to czas przebywania pojazdu trakcyjnego poza macierzystą sekcją eksploatacji przewoźnika kolejowego, tj. okres od chwili zgłoszenia się go na punkcie kontrolnym macierzystej sekcji w celu obsługi pary pociągów do chwili ponownego zgłoszenia się go w tym samym punkcie po obsłużeniu tej pary. Obrót eksploatacyjny można wyrazić wzorem (oznaczenia poszczególnych symboli znajdują się w podrozdziale 5.5.1) [70]:

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 \quad [\text{h}] \quad (5.3)$$

### 5.5.3. Skrócony obrót pojazdu trakcyjnego

Na krótkich odcinkach jazdy istnieją przypadki, że pojazd trakcyjny obsługuje kilka par pociągów bez zjazdu do macierzystej bądź zwrotnej sekcji eksploatacji przewoźnika kolejowego. Występujący w takich przypadkach obrót pojazdu trakcyjnego nie zawiera

wszystkich ośmiu składników całkowitego obrotu i dlatego nazywa się obrotem skróconym [70].

## 5.6. Mierniki wykorzystania pojazdów trakcyjnych

### 5.6.1. Uwagi ogólne

Właściwa organizacja i racjonalne prowadzenie gospodarki pojazdami trakcyjnymi są podstawowymi warunkami efektywnej pracy kolei i głównymi czynnikami obniżenia kosztów własnych transportu kolejowego. Znajomość mierników charakteryzujących wykorzystanie pojazdów trakcyjnych i umiejętność poprawienia wartości tych mierników jest zatem podstawowym obowiązkiem osób odpowiedzialnych za gospodarkę taborem.

Do mierników charakteryzujących wykorzystanie pojazdów trakcyjnych należą [70]:

- przeciętny przebieg dobowy pojazdu trakcyjnego  $p_d$ ,
- przeciętna liczba godzin pracy pojazdu trakcyjnego w ciągu doby  $t_{pd}$ ,
- przeciętna masa pociągu  $M_w$  i przeciętne obciążenie pojazdu trakcyjnego  $M_o$ .

### 5.6.2. Przeciętny przebieg dobowy pojazdu trakcyjnego

Średni (przeciętny) przebieg dobowy pojazdu trakcyjnego jest podstawowym miernikiem wykorzystania pojazdów trakcyjnych [70]. Przebieg dobowy jest ujmowany w planach jako zadanie planowe i podlega analizie z wykonania planu. Wykorzystanie lokomotywy pod względem trakcyjnym tj. wykorzystanie jej ciężaru napędnego, mocy silników i szybkości, a więc wykorzystanie jej również i pod względem ekonomicznym, polega na wykonaniu przez lokomotywę w określonym czasie jak największej pracy tj. największej liczby bruttonokilometrów, które są miernikiem bardziej syntetycznym. Wartość miernika ( $p_d$ ) oblicza się według wzoru (w liczniku i mianowniku sumuje się wartości dla poszczególnych pojazdów) [70]:

$$p_d = \frac{\sum \text{pojazdokm}}{\sum \text{pojazdodób}} \left[ \frac{\text{pojazdokm}}{\text{dobę}} \right] \quad (5.4)$$



Oprócz przeciętnego przebiegu dobowego wszystkich lokomotyw ustala się też przeciętny przebieg dobowy pojazdów trakcyjnych w ruchu pasażerskim, towarowym, gospodarczym i w pracy manewrowej [70]. Przeciętny przebieg dobowy pojazdu trakcyjnego składa się zarówno z przebiegów pociągowych jak i przebiegów luzem. Najmniejsze przebiegi dobowe pojazdu trakcyjnego występują w pracy manewrowej oraz przy obsłudze pociągów gospodarczych i zdawczych, największe zaś w ruchu pasażerskim dalekobieżnym obsługiwanym trakcją elektryczną.

Znając wartość całkowitego obrotu pojazdu trakcyjnego  $T$  przebieg dobowy pojazdu trakcyjnego  $p_d$  określa się przy pomocy wzoru [70]:

$$p_d = 2l \cdot \frac{24}{T} \left[ \frac{\text{pojazdokm}}{\text{dobę}} \right] \quad (5.5)$$

gdzie:

- $2l$  – przebieg w [km] w czasie jednego obrotu,
- $24/T$  – liczba obrotów pojazdu w ciągu doby.

Należy zauważyć, że istnieje wiele czynników wpływających na zwiększenie przebiegu dobowego i wykorzystania lokomotyw. W istotny sposób na wykorzystanie lokomotyw wpływa rozkład jazdy, w którym dla określonych linii kolejowych ustala się liczbę pociągów, ich czas jazdy, szybkość i postoje na stacjach. Im więcej jest par pociągów oraz im większa jest ich szybkość handlowa, tym szybszy będzie obrót lokomotyw i lepsze ich wykorzystanie. Przy dużej liczbie pociągów na stacji końcowej odcinka obsługi trakcyjnej zbędne staje się oczekiwanie na pociąg powrotny i po dokonaniu niezbędnych czynności technicznych lokomotywa może udać się ze składem wagonowym w kierunku powrotnym. Im większe jest natężenie przewozów na określonej linii tym większy może być przebieg dobowy lokomotyw obsługujących tę linię.

Natężenie przewozów jest różne na różnych liniach zależnie od potrzeb przewozowych. Największe jest ono na liniach magistralnych zelektryfikowanych i dlatego przebiegi dobowe na tych liniach powinny być i są największe. Na liniach o mniejszym natężeniu przewozów wykorzystanie lokomotyw będzie mniejsze. Na wielkość przebiegu dobowego lokomotyw duży wpływ ma także sposób obsługi pociągów, operatywność dyspozytorów ruchu i dyspozytorów trakcyjnych oraz stan techniczny lokomotyw.

### 5.6.3. Przeciętna liczba godzin pracy pojazdu trakcyjnego w ciągu doby

Przeciętną liczbę godzin pracy pojazdu trakcyjnego w ciągu doby ( $t_{pd}$ ) ustala się jako iloraz sumy pojazdgodzin przez sumę pojazdgodób w danym okresie (dobie), czyli (w liczniku i mianowniku sumuje się wartości dla poszczególnych pojazdów) [70]:

$$t_{pd} = \frac{\sum \text{pojazdgodzin}}{\sum \text{pojazdgodób}} \left[ \frac{\text{pojazdgodzin}}{\text{dobę}} \right] \quad (5.6)$$

Miernik ten jest bardzo ważny, jednakże nie charakteryzuje on całkowicie wykorzystania pojazdu trakcyjnego m.in. pod względem przebiegu i mocy. Z tych względów analizuje się go łącznie z miernikiem przeciętnego przebiegu dobowego ( $p_d$ ). Jest to konieczne dlatego, że przeciętna liczba godzin pracy pojazdu trakcyjnego w ciągu doby obejmuje czas pracy pociągowej zasadniczej i dodatkowej oraz czas pracy pozapociągowej zasadniczej i dodatkowej. Czas pracy pociągowej zasadniczej (zwany także czasem jazdy), oznaczający przewidywaną efektywną liczbę godzin pracy pojazdu trakcyjnego w ciągu doby ( $t_{jd}$ ) oblicza się jako [70]:

$$t_{jd} = \left( \frac{2l}{Vh} \right) \cdot \frac{24}{T} \left[ \frac{\text{pojazdgodzin}}{\text{dobę}} \right] \quad (5.7)$$

gdzie:

- $2l/Vh$  – czas pracy pociągowej zasadniczej podczas jednego obrotu pojazdu trakcyjnego ( $Vh$  – prędkość handlowa pociągu [km/h]),
- $24/T$  – liczba obrotów pojazdu w ciągu doby.

Wzór na określenie efektywnego czasu pracy pojazdu trakcyjnego w ciągu doby ( $l_{jd}$ ) ma postać [70]:

$$l_{jd} = \frac{p_d}{Vh} \left[ \frac{\text{pojazdgodzin}}{\text{dobę}} \right] \quad (5.8)$$

Jeśli prędkości handlowe w obu kierunkach ruchu pociągu nie są równe (gdzie:  $Vh1$  – prędkość w jednym kierunku [km/h],  $Vh2$  – prędkość w drugim kierunku [km/h]), to [70]:

$$t_{jd} = \left( \frac{l}{Vh1} + \frac{l}{Vh2} \right) \cdot \frac{24}{T} \left[ \frac{\text{pojazdgodzin}}{\text{dobę}} \right] \quad (5.9)$$

#### 5.6.4. Przeciętna masa wagonów w składzie pociągu i przeciętne obciążenie pojazdu trakcyjnego

Przeciętną masę wagonów w składzie pociągu i przeciętne obciążenie pojazdu trakcyjnego ustala się jako iloraz sumy brutto tonokilometrów (brtkm) wykonanych przez pojazdy trakcyjne i sumy pojazdokilometrów przebytych w tym samym okresie (pojazdokm). Istotna różnica między przeciętną masą wagonów w składzie pociągu  $M_w$ , a przeciętnym obciążeniem pojazdu trakcyjnego  $M_o$  polega na tym, że w pierwszym przypadku bierze się pod uwagę tylko pojazdokilometry wykonane w pracy pociągowej zasadniczej ( $z$ ), natomiast w drugim przypadku pojazdokilometry ogółem ( $o$ ), tj. wykonane w pracy pociągowej oraz pozapociągowej, zarówno zasadniczej, jak i dodatkowej.

Przeciętną masę wagonów w składzie pociągu  $M_w$  oblicza się ze wzoru (w liczniku i mianowniku sumuje się wartości dla poszczególnych pojazdów) [70]:

$$M_w = \frac{\sum \text{brtkm}}{\sum \text{pojazdokm}(z)} \quad [\text{t}] \quad (5.10)$$

Przeciętne obciążenie pojazdu trakcyjnego  $M_o$  oblicza się ze wzoru (w liczniku i mianowniku sumuje się wartości dla poszczególnych pojazdów) [70]:

$$M_o = \frac{\sum \text{brtkm}}{\sum \text{pojazdokm}(o)} \quad [\text{t}] \quad (5.11)$$

Służbami odpowiedzialnymi za ekonomiczne kształtowanie się wartości tych mierników jest zarówno służba trakcji, jak i służba ruchu. Miernikami gospodarki pojazdami trakcyjnymi zależnymi wyłącznie od służby trakcji i zakładów naprawczych taboru kolejowego są: odsetek lokomotyw w naprawie, postój w naprawie oraz ważny miernik charakteryzujący stan techniczny pojazdów trakcyjnych - tj. liczba uszkodzeń lokomotyw podczas prowadzenia pociągów przypadająca na milion lokomotywo-kilometrów.

## **6. MODEL DECYZYJNY DOBORU TABORU DO REALIZACJI ZADAŃ PRZEWOZOWYCH PRZY OGRANICZONYCH ZASOBACH**

### **6.1. Założenia ogólne**

Problematyka doboru taboru do realizacji zadań przewozowych dotyczy odpowiedniego przypisania odpowiedniej liczby lokomotyw konkretnej serii oraz odpowiedniej liczby wagonów określonej serii w celu zrealizowania uprzednio zdefiniowanego zadania przewozowego w kolejowym transporcie towarowym. Budowanie modelu doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach w towarowym transporcie kolejowym polega na uwzględnieniu tylko tych cech charakterystycznych systemu transportu kolejowego, które są istotne z punktu widzenia przyjętego celu modelowania.

Zakłada się, że budowany model doboru taboru do realizacji potrzeb przewozowych powinien spełniać oczekiwania dotyczące odpowiedniej zgodności modelu z rzeczywistością oraz powinien być prosty w użytkowaniu. Główne założenia modelu doboru taboru do realizacji potrzeb przewozowych to:

- realizacja zadania przewozowego polega na przewiezieniu określonego wolumenu ładunków od nadawców do odbiorców,
- ładunki są przewożone z wykorzystaniem lokomotyw oraz wagonów odpowiednich do przewożonych ładunków,
- realizacja zadań przewozowych odbywa się w obrębie ustalonej sieci transportu kolejowego,
- do zadań przewozowych wykorzystywane są odpowiednie typy wagonów dla danych rodzajów ładunków, tj. konkretny ładunek powinien być przewożony wagonem konkretnej serii zgodnie z przypisaniem,
- każda seria wagonów ma przypisane grupy towarowe według katalogu NHM [127] (zharmonizowanego spisu towarów), dla których jest ona najodpowiedniejsza,
- do realizacji danego zadania przewozowego powinny być wykorzystywane wagony, które mogą przewozić konkretny rodzaj ładunku,
- punktem nadania lub punktem odbioru jest stacja, na której znajduje się punkt ładunkowy, gdzie można nadać lub odebrać ładunek,

- w przypadku uruchomienia pociągu z przekroczoną skrajną wykorzystuje się linie do tego dostosowane,
- trasa przewozu przesyłki (zadania przewozowego) będącej potrzebą przewozową powinna składać się z kolejnych odcinków linii kolejowej,
- liczba wagonów przydzielonych do realizacji konkretnego zadania przewozowego powinna być mniejsza niż maksymalna liczba wagonów, która może poruszać się po terenie punktów eksploatacyjnych zlokalizowanych na trasie przewozu,
- liczba wagonów przydzielonych do realizacji konkretnego zadania przewozowego powinna być nie większa niż liczba wagonów będąca w dyspozycji przewoźnika (ograniczone zasoby),
- liczba lokomotyw przydzielonych do realizacji konkretnego zadania przewozowego powinna być nie większa niż liczba lokomotyw będąca w dyspozycji przewoźnika (ograniczone zasoby),
- realizacja danego zadania przewozowego odbywa się według odpowiedniej taryfy przewozowej (opłaty podstawowej właściwej dla danego zadania przewozowego zmienionej z wykorzystaniem odpowiedniej kombinacji mnożników),
- realizacja danego zadania przewozowego może być obłożona odpowiednim współczynnikiem korygującym,
- realizacja danego zadania przewozowego może być obłożona opłatą dodatkową.

## **6.2. Identyfikacja elementów modelu**

Zgodnie z założeniami przyjętymi w podrozdziale 6.1 głównym celem doboru taboru do zadań przewozowych w towarowym transporcie kolejowym jest optymalne – w sensie przyjętych kryteriów – wyznaczenie liczby i typów lokomotyw oraz wagonów realizujących dane zadanie przewozowe. W celu wyznaczenia liczby lokomotyw i wagonów dla realizacji zadania przewozowego niezbędne jest:

- zidentyfikowanie lokalizacji punktów nadania oraz punktów wyładunkowych oraz punktów eksploatacyjnych pośrednich dla realizacji przewozu,
- ustalenie charakterystyk technicznych elementów punktowych (punktów ekspedycyjnych) i liniowych sieci kolejowej np. czasów wyładunku i załadunku lub czasów przejazdu na danym odcinku trasy,

- ustalenie lokomotyw oraz wagonów będących w dyspozycji operatora kolejowego tj. ustalenie charakterystyk technicznych danej lokomotywy lub wagonów np. max. prędkości, liczbę osi, pojemności itp.,
- zdefiniowanie wielkości zadań do realizacji (wielkości przewożonego ładunku w danej relacji),
- zdefiniowanie taryf przewozowych.

Model przedstawiony w rozprawie oparty jest na podejściu do modelowania systemów transportowych prezentowanym w pracach [18], [82], [86], [91], [154]. Biorąc pod uwagę wcześniejsze ustalenia, model doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach (*MDTDP*) zdefiniowano jako uporządkowaną szóstkę:

$$MDTDP = \langle GSK, FSK, ZPD, ST, FST, TTP \rangle \quad (6.1)$$

gdzie:

- **struktura *GSK*** przedstawiająca powiązania między punktami nadania i odbioru ładunku, (miejsca generujące powstawanie strumienia ładunków oraz jego zanik), w tym punkty ładunkowe na stacjach, gdzie odbywa się nadani i odbiór ładunków,
- **charakterystyki sieci kolejowej *FSK*** (charakterystyki określone na punktach ekspedycyjnych sieci kolejowej oraz jej odcinkach),
- **zadania przewozowe *ZPD*** wynikających z wielkości zgłaszanych potrzeb przewozowych,
- **tabor *ST*** wraz z jego charakterystykami *FST*, stanowiących potencjał przewozowy operatora realizującego przewozy kolejowe,
- **taryfy przewozowe *TTP*** charakteryzujących poszczególnych operatorów.

## 6.3. Parametry modelu

### 6.3.1. Ustalenie struktury sieci kolejowej

Sieć kolejową tworzą elementy punktowe i liniowe infrastruktury transportu kolejowego. Na potrzeby realizacji rozprawy doktorskiej zakłada się, że elementy punktowe infrastruktury kolejowej będą reprezentowane przez punkty eksploatacyjne (posterunki ruchu (m.in. stacje i posterunki odgałęźne) i punkty ekspedycyjne). Biorąc po uwagę powyższe, strukturę sieci

kolejowej w modelu doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach (*MDTDP*) przedstawiono przy pomocy grafu *GSK*:

$$\mathbf{GSK} = \langle \mathbf{PE}, \mathbf{OL} \rangle \quad (6.2)$$

gdzie:

*PE* – zbiór punktów eksploatacyjnych, przy czym indeksem *pe* oznaczono numery punktów eksploatacyjnych, a *PE* jako liczbę wszystkich punktów eksploatacyjnych zlokalizowanych na wybranym obszarze sieci kolejowej, co zapisano:

$$\mathbf{PE} = \{pe : pe = 1, \dots, pe', \dots, PE\} \quad (6.3)$$

*OL* – zbiór odcinków linii kolejowych, przy czym odcinek linii kolejowej o początku w punkcie eksploatacyjnym *pe* i końcu w punkcie eksploatacyjnym *pe'* zapisano uporządkowana para  $(pe, pe')$ , tj.:

$$\mathbf{OL} = \{(pe, pe') : pe, pe' \in \mathbf{PE} \wedge pe \neq pe'\} \quad (6.4)$$

W rzeczywistej sieci kolejowej każda linia kolejowa oznaczona jest indywidualnym numerem, który na potrzeby badań zapisano indeksem *nrl*. Zbiór *NRL* numerów analizowanych linii kolejowych jest następujący:

$$\mathbf{NRL} = \{nrl : nrl = 1, \dots, nrl', \dots, NRL\} \quad (6.5)$$

gdzie: *nrl*, *nrl'* to numery linii kolejowych, a *NRL* to liczba analizowanych linii kolejowych.

Każdy odcinek linii kolejowej ma przypisany do siebie numer linii kolejowej na której się znajduje, co można zapisać jako  $((pe, pe'), nrl)$ . Dla jednoznaczności dalszych badań i uproszczenia zapisu wprowadza się zapis postaci:

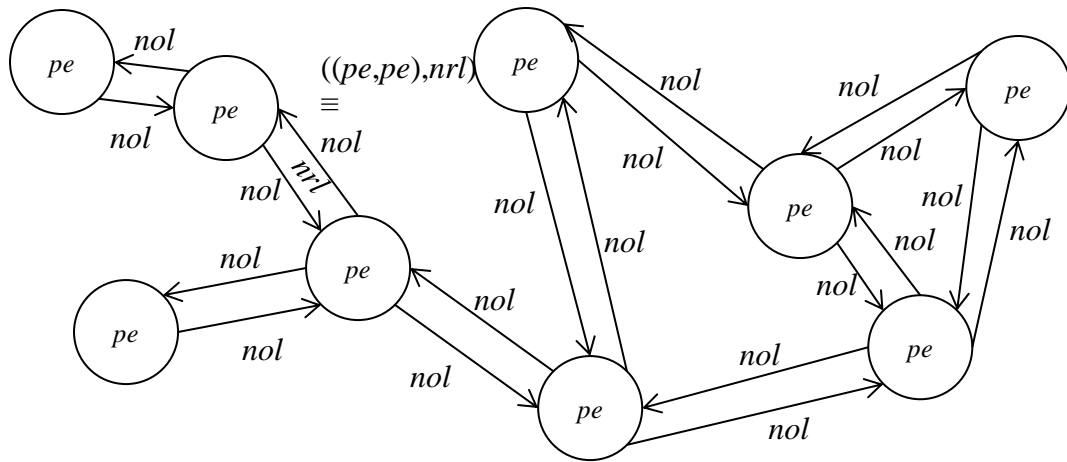
$$((pe, pe'), nrl) \equiv nol \quad (6.6)$$

Zatem zbiór *NOL* odcinków linii kolejowych uwzględniający numerację linii kolejowych można zapisać w formie następującej:

$$\mathbf{NOL} = \{nol : nol = 1, \dots, nol', \dots, NOL\} \quad (6.7)$$

gdzie: *nol*, *nol'* to numer odcinka linii kolejowej, a *NOL* to liczba odcinków linii kolejowej.

Powyższe rozważania można przedstawić jak na rys. 6.1.



Rys. 6.1. Sieć kolejowa zobrazona z wykorzystaniem teorii grafów

Źródło: opracowanie własne

### 6.3.2. Charakterystyki elementów sieci kolejowej

Dla potrzeb budowy modelu decyzyjnego doboru taboru do realizacji zadań przy ograniczonych zasobach niezbędna jest identyfikacja parametrów charakteryzujących punkty ekspedycyjne i odcinki linii kolejowych. Zakłada się, że charakterystyki **FSK** punktów ekspedycyjnych i odcinków linii kolejowych zapisane zostaną uporządkowaną dwójką postaci:

$$FSK = \langle FPE, FOL \rangle \quad (6.8)$$

gdzie:

- FPE** – wektor charakterystyk punktów eksploatacyjnych,
- FOL** – wektor charakterystyk odcinków linii kolejowych.

Punkty eksploatacyjne charakteryzowane są przez następujące parametry:

#### Parametr

#### Interpretacja

Parametr	Interpretacja
$ks(pe)$	kod punktu eksploatacyjnego o nr. $pe$
$ows(pe)$	maksymalna liczba wagonów, która może poruszać się po terenie punktu eksploatacyjnego o nr. $pe$
$oos(pe)$	maksymalna liczba osi wagonów, która może wjechać na teren punktu eksploatacyjnego o nr. $pe$
$oops(pe)$	maksymalna liczby osi pociągu, która może wjechać na teren punktu eksploatacyjnego o nr. $pe$
$odps(pe)$	maksymalnej długości pociągu, która może wjechać na teren punktu eksploatacyjnego o nr. $pe$



Dla jednoznaczności dalszych rozważań przyjmuje się, że każdy  $pe$ -ty punkt ekspedycyjny będzie opisany wektorem **FPE** parametrów tj.:

$$\mathbf{FPE} = [ks(pe), ows(pe), oos(pe), oops(pe), odps(pe)] \quad (6.9)$$

Natomiast odcinki linii kolejowych charakteryzowane są przez następujące parametry:

Parametr	Interpretacja
$okm(nol)$	długość odcinka linii kolejowej o nr. $nol$
$ov(nol)$	maksymalna dopuszczalna prędkość na odcinku linii kolejowej o nr. $nol$
$og(nol)$	maksymalny dopuszczalny nacisk na oś na odcinku linii kolejowej o nr. $nol$
$op(nol)$	możliwość poruszania się po danym odcinku linii kolejowej o nr. $nol$ pociągów z przekroczoną skrajnią
$owo(nol)$	maksymalna liczba wagonów, która może poruszać się na odcinku linii kolejowej o nr. $nol$
$ooo(nol)$	maksymalna liczba osi, która może wjechać na odcinek linii kolejowej o nr. $nol$
$odpo(nol)$	maksymalna długość pociągu, która może wjechać na odcinek linii kolejowej o nr. $nol$
$ot(nol)$	rodzaj trakcji, która może wjechać na odcinek linii kolejowej o nr. $nol$
$pmh(nol)$	wymagany procent masy hamującej na odcinku linii kolejowej o nr. $nol$

Dla jednoznaczności dalszych rozważań przyjmuje się, że każdy odcinek linii kolejowej będzie opisany wektorem **FOL** parametrów tj.:

$$\mathbf{FOL} = \begin{bmatrix} okm(nol), ov(nol), og(nol), op(nol) \\ owo(nol), ooo(nol), odpo(nol), ot(nol), pmh(nol) \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

### 6.3.3. Identyfikacja zadań przewozowych

Każde zadanie przewozowe posiada określone charakterystyki. Zapisano je przy pomocy następujących parametrów:

Parametr	Interpretacja
$zpd$	pojedyncze zadanie przewozowe: $ZPD = \{1, \dots, zpd, \dots, ZPD\}$
$nhm$	numer poszczególnego rodzaju towarów: $NHM = \{1, \dots, nhm, \dots, NHM\}$
$tow(zpd, nhm)$	przedmiotem przewozu dla zadania przewozowego o nr. $zpd$ jest towar o nr. $NHM nhm$

Parametr	Interpretacja
$sp(zpd,pe)$	zadanie przewozowe o nr. $zpd$ rozpoczyna się w punkcie eksploatacyjnym $pe$ zwanym punktem nadania
$sk(zpd,pe)$	zadanie przewozowe o nr. $zpd$ kończy się w punkcie eksploatacyjnym $pe$ zwanym punktem odbioru
$zp(zpd)$	wielkość potrzeby przewozowej o nr. $zpd$
$ps(zpd)$	fakt, że potrzeba przewozowa o nr. $zpd$ ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) jest przesyłką o przekroczonej skrajni

Dla jednoznaczności dalszych rozważań przyjmuje się, że każde zadanie przewozowe będzie opisane wektorem  $\mathbf{ZPD}$  parametrów tj.:

$$\mathbf{ZPD} = [zpd, tow(zpd, nhm), sp(zpd, pe), sk(zpd, pe), zd(zpd), ps(zpd)] \quad (6.11)$$

### 6.3.4. Tabor i jego charakterystyki

Podstawowym elementem przy analizowaniu sposobu realizacji zadań przewozowych jest identyfikacja taboru dedykowanego do tego wraz z jego charakterystykami. Z punktu widzenia realizacji rozprawy doktorskiej istotnymi będą dwa typy taboru: lokomotywy oraz wagony towarowe.

Lokomotywy charakteryzowane są przez następujące parametry:

Parametr	Interpretacja
$lok$	numer lokomotywy: $\mathbf{LOK} = \{1, \dots, lok, \dots, LOK\}$
$ls(lok)$	seria lokomotywy konkretnego rodzaju trakcji o nr. $lok$
$lm(lok)$	uciąg lokomotywy o nr. $lok$
$lo(lok)$	liczba osi lokomotywy o nr. $lok$
$ld(lok)$	długość lokomotywy o nr. $lok$
$lc(lok)$	ciężar własny lokomotywy o nr. $lok$
$lv(lok)$	prędkość maksymalna lokomotywy o nr. $lok$
$lt(lok)$	rodzaj trakcji lokomotywy o nr. $lok$
$ll(lok)$	liczebność danego rodzaju lokomotywy o nr. $lok$
$hl(lok)$	procent ciężaru hamującego lokomotywy o nr. $lok$

Dla jednoznaczności dalszych rozważań przyjmuje się, że każda lokomotywa będzie opisana wektorem  $\mathbf{FL}$  parametrów tj.:

$$\mathbf{FL} = \begin{bmatrix} ls(lok), lm(lok), lo(lok), ld(lok), \\ lc(lok), lv(lok), lt(lok), ll(lok), hl(lok) \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

Natomiast wagony charakteryzowane są przez następujące parametry:

Parametr	Interpretacja
$wag$	numer wagonu: $\mathbf{WAG} = \{1, \dots, wag, \dots, WAG\}$
$ws(wag)$	seria wagonu o nr. $wag$
$wo(wag)$	liczba osi wagonu o nr. $wag$
$wd(wag)$	długość wagonu o nr. $wag$
$wc(wag)$	ciężar własny wagonu o nr. $wag$
$wl(wag)$	ładowność wagonu o nr. $wag$
$wv(wag)$	prędkość maksymalna wagonu o nr. $wag$
$hw(wag)$	procent ciężaru hamującego wagonu o nr. $wag$
$wnhm(ws(wag), nhm)$	przyporządkowanie wagonu konkretnej serii $ws(wag)$ do poszczególnych rodzajów towarów skodyfikowanych w ramach NHM $nhm$

Dla jednoznaczności dalszych rozważań przyjmuje się, że każdy wagon będzie opisany wektorem  $\mathbf{FW}$  parametrów tj.:

$$\mathbf{FW} = \begin{bmatrix} ws(wag), wo(wag), wd(wag), wc(wag), \\ wl(wag), wv(wag), wnhm(ws(wag), nhm) \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

### 6.3.5. Taryfa towarowa przewoźnika

Celem działania każdego przedsiębiorstwa jest m.in. osiągnięcie możliwie najwyższych zysków ze swojej działalności. Tak samo dzieje się w przypadku przewoźników kolejowych. W związku z tym świadczone przez nich usługi są płatne. Wysokość opłaty przewozowej ustala się na podstawie taryfy towarowej opracowanej przez konkretnego przewoźnika kolejowego.

Aby określić wartość opłaty przewozowej za jego realizację niezbędnym jest określenie wartości następujących parametrów:

Parametr	Interpretacja
$op(zpd,nol)$	wysokość opłaty podstawowej dla zadania przewozowego o nr. $zpd$ i dla odcinka o nr. $nol$
$wsk(zpd)$	wysokość współczynnika korygującego dla zadania przewozowego o nr. $zpd$
$ops(zpd,nol)$	wysokość opłaty podstawowej dla zadania przewozowego o nr. $zpd$ będącego pojazdem samochodowym i dla odcinka o nr. $nol$
$wskpsl(zpd)$	wysokość współczynnika korygującego dla zadania przewozowego o nr. $zpd$ będącego pojazdem samochodowym
$wskpsp(zpd)$	wysokość współczynnika korygującego dla zadania przewozowego o nr. $zpd$ będącego wagonem próżnym po przewozie pojazdu samochodowego
$opint(zpd,nol)$	wysokość opłaty podstawowej dla zadania przewozowego o numerze $zpd$ będącego przesyłką intermodalną i dla odcinka o nr. $nol$
$wskintl \leq 22(zpd)$	wysokość współczynnika korygującego dla zadania przewozowego o nr. $zpd$ będącego przesyłką intermodalną do 22 ton brutto
$wskintl > 22(zpd)$	wysokość współczynnika korygującego dla zadania przewozowego o nr. $zpd$ będącego przesyłką intermodalną powyżej 22 ton brutto
$wskintp(zpd)$	wysokości współczynnika korygującego dla zadania przewozowego o nr. $zpd$ będącego wagonem próżnym po przewozie przesyłki intermodalnej
$od(zpd)$	wysokości opłaty dodatkowej dla zadania przewozowego o nr. $zpd$

Dla jednoznaczności dalszych rozważań przyjmuje się, że każde zadanie przewozowe będzie opisane wektorem **TTP** parametrów tj.:

$$\mathbf{TTP} = \begin{bmatrix} op(zpd, nol), wsk(zpd), ops(zpd, nol), wskpsl(zpd), \\ wskpsp(zpd), opint(zpd, nol), wskintl \leq 22(zpd), \\ wskintl > 22(zpd), wskintp(zpd), od(zpd) \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

#### 6.4. Opis zapotrzebowania na wagony

W problemie decyzyjnym doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach należy zapewnić odpowiednią liczbę odpowiedniej serii wagonów do przewozu konkretnego rodzaju towaru według katalogu NHM [127]. Jak już wspomniano, do każdej serii wagonów przypisane są odpowiednie ładunki zgodnie ze spisem NHM. Nie zawsze zdarza się, że wagony te są dostępne na stacji początkowej przewozu. W związku z tym należy dokonać ich dostarczenia z miejsca stacjonowania do miejsca naładunku. Proces ten można opisać w sposób następujący.

Do opisu zapotrzebowania na wagony należy zdefiniować następujące parametry:

Parametr	Interpretacja
<i>wag</i>	numer wagonu
<i>ws(wag)</i>	seria wagonu o nr. <i>wag</i>
<i>zpd</i>	pojedyncze zadanie przewozowe
<i>zap(zpd,ws(wag))</i>	występuje zapotrzebowanie na wagony serii <i>ws(wag)</i> do realizacji zadania przewozowego o nr. <i>zpd</i> (jeśli istnieje = 1, inaczej = 0)
<i>lpw(zpd,ws(wag))</i>	liczba potrzebnych wagonów serii <i>ws(wag)</i> do realizacji zadania przewozowego o nr. <i>zpd</i>
<i>pl</i>	numer punktu ładunkowego
<i>pl(sl)</i>	przyporządkowanie punktu ładunkowego o nr. <i>pl</i> do stacji ładunkowej o nr. <i>sl</i> (jeśli istnieje = 1, inaczej = 0)
<i>mop(pl,ws(wag))</i>	występuje możliwość obsługi wagonów serii <i>ws(wag)</i> na punkcie ładunkowym o nr. <i>pl</i> (jeśli istnieje = 1, inaczej = 0)
<i>zop(pl,ws(wag))</i>	dobowa zdolność przetwórcza wagonów serii <i>ws(wag)</i> na punkcie ładunkowym o nr. <i>pl</i>
<i>lsp(pl,ws(wag))</i>	liczba wagonów serii <i>ws(wag)</i> obsługiwana na punkcie ładunkowym o nr. <i>pl</i>
<i>sl</i>	numer stacji ładunkowej
<i>sl(sm)</i>	przyporządkowanie stacji ładunkowej o nr. <i>sl</i> do stacji manewrowej o nr. <i>sm</i> (jeśli istnieje = 1, inaczej = 0)
<i>mos(sl,ws(wag))</i>	występuje możliwość obsługi wagonów serii <i>ws(wag)</i> na stacji ładunkowej o nr. <i>sl</i> (jeśli istnieje = 1, inaczej = 0)
<i>zos(sl,ws(wag))</i>	dobowa zdolność przetwórcza wagonów serii <i>ws(wag)</i> na stacji ładunkowej o nr. <i>sl</i>
<i>lss(sl,ws(wag))</i>	liczba wagonów serii <i>ws(wag)</i> obsługiwana na stacji ładunkowej o nr. <i>sl</i>
<i>sm</i>	numer stacji manewrowej
<i>sm(sr)</i>	przyporządkowanie stacji manewrowej o nr. <i>sm</i> do stacji rozrządowej o nr. <i>sr</i> (jeśli istnieje = 1, inaczej = 0)
<i>mom(sm,ws(wag))</i>	występuje możliwość obsługi wagonów serii <i>ws(wag)</i> na stacji manewrowej o nr. <i>sm</i> (jeśli istnieje = 1, inaczej = 0)
<i>zom(sm,ws(wag))</i>	dobowa zdolność przetwórcza wagonów serii <i>ws(wag)</i> na stacji manewrowej o nr. <i>sm</i>
<i>lsm(sm,ws(wag))</i>	liczba wagonów serii <i>ws(wag)</i> obsługiwana na stacji manewrowej o nr. <i>sm</i>
<i>sr</i>	numer stacji rozrządowej
<i>mor(sr,ws(wag))</i>	występuje możliwość obsługi wagonów serii <i>ws(wag)</i> na stacji rozrządowej o nr. <i>sr</i> (jeśli istnieje = 1, inaczej = 0)
<i>zor(sr,ws(wag))</i>	dobowa zdolność przetwórcza wagonów serii <i>ws(wag)</i> na stacji rozrządowej o nr. <i>sr</i>
<i>lsr(sr,ws(wag))</i>	liczba wagonów serii <i>ws(wag)</i> obsługiwana na stacji rozrządowej o nr. <i>sr</i>

Schemat przemieszczania wagonów na sieci kolejowej można przedstawić w następujący sposób. Ładunek dostarczany jest na teren punktu ładunkowego ( $pl$ ). Tam ładowany jest do wagonów. Następnie wagony przemieszczane są z punktów ładunkowych do stacji ładunkowych ( $sl$ ), w obszarze ciężenia których znajduje się dany punkt ( $pl(sl) = 1$ ). Więc liczba wagonów poszczególnych serii obsługiwana w  $sl$  - tej stacji ładunkowej jest równa:

$$lss(sl, ws(wag)) = \sum_{pl : pl(sl)=1} lsp(pl, ws(wag)) \quad (6.15)$$

Liczba  $lss(sl, ws(wag))$  nie może przekroczyć dobowej zdolności przetwórczej wagonów poszczególnych serii dla stacji ładunkowej  $sl$  –  $zos(sl, ws(wag))$ .

Stacja ładunkowa ( $sl$ ) przyjmuje wagony różnych serii. Zatem liczba wagonów różnych serii, jakie mogą być dostarczone do  $sl$  - tej stacji ładunkowej  $lss(sl)$  jest równa:

$$lss(sl) = \sum_{ws(wag) : mos(sl, ws(wag))=1} lss(sl, ws(wag)) \quad (6.16)$$

Następnie wagony przemieszczane są ze stacji ładunkowych ( $sl$ ) do stacji manewrowych ( $sm$ ), w obszarze ciężenia których znajduje się dana stacja ( $sl(sm) = 1$ ). Więc liczba wagonów poszczególnych serii obsługiwana w  $sm$  - tej stacji manewrowej jest równa:

$$lsm(sm, ws(wag)) = \sum_{sl : sl(sm)=1} lss(sl, ws(wag)) \quad (6.17)$$

Liczba  $lsm(sm, ws(wag))$  nie może przekroczyć dobowej zdolności przetwórczej wagonów poszczególnych serii dla stacji manewrowej  $sm$  –  $zom(sm, ws(wag))$ .

Stacja manewrowa ( $sm$ ) przyjmuje wagony różnych serii. Zatem liczba wagonów różnych serii, jakie mogą być dostarczone do  $sm$  - tej stacji manewrowej  $lsm(sm)$  jest równa:

$$lsm(sm) = \sum_{ws(wag) : mom(sm, ws(wag))=1} lsm(sm, ws(wag)) \quad (6.18)$$

Następnie wagony przemieszczane są ze stacji manewrowych ( $sm$ ) do stacji rozrządowych ( $sr$ ), w obszarze ciężenia których znajduje się dana stacja ( $sm(sr) = 1$ ). Więc liczba wagonów poszczególnych serii obsługiwana w  $sr$  - tej stacji rozrządowej jest równa:

$$lsr(sr, ws(wag)) = \sum_{sm : sm(sr)=1} lsm(sm, ws(wag)) \quad (6.19)$$

Liczba  $lsr(sr, ws(wag))$  nie może przekroczyć dobowej zdolności przetwórczej wagonów poszczególnych serii dla stacji rozrządowej  $sr - zor(sr, ws(wag))$ .

Stacja rozrządowa ( $sr$ ) przyjmuje wagony różnych serii. Zatem liczba wagonów różnych serii, jakie mogą być dostarczone do  $sr$  - tej stacji rozrządowej  $lsr(sr)$  jest równa:

$$lsr(sr) = \sum_{ws(wag) : mor(sr, ws(wag))=1} lsm(sm, ws(wag)) \quad (6.20)$$

Liczba ta jest równa ogólnej liczbie wagonów różnego rodzaju jakie przemieszczają się w rozważanej sieci transportowej.

Opisana powyżej droga dotyczy rejonu nadania. Następnie wagony przemieszczane są ze stacji rozrządowej w rejonie nadania do stacji rozrządowej w rejonie odbioru, skąd odpowiednio kierowane są do stacji manewrowej, ładunkowej i do punktu ładunkowego.

## 6.5. Opis parametrów eksploatacyjnych stacji w funkcji ich zdolności przerobowych

Z przytoczonych w podrozdziale 6.4. rozważań wynika, że każda  $sm$  - ta stacja manewrowa, podlegała  $sr$  - tej stacji rozrządowej obsługuje wagony serii  $ws(wag)$  w liczbie równej  $lsm(sm, ws(wag))$ . Ponieważ  $lsm(sm, ws(wag))$  może okazać się w rzeczywistości dość dużą liczbą, to dla scharakteryzowania pracy stacji manewrowej przyjęto pewne uproszczenia. Na potrzeby realizacji niniejszej dysertacji wprowadzony został wektor  $lsm(sm)$  o składowych  $lsm(sm, ws(wag))$  tj.:

$$lsm(sm) = [lsm(sm, 1), \dots, lsm(sm, ws(wag)), \dots, lsm(sm, WS(wag))] \quad (6.21)$$

i następującej ich interpretacji:  $lsm(sm, ws(wag))$  jest wielkością o interpretacji liczby wagonów serii  $ws(wag)$ , które mogą być poddane obróbce na  $sm$  - tej stacji manewrowej.

W granicznym przypadku:

$$lsm(sm, ws(wag)) = \sum_{ws(wag) : mom(sm, ws(wag))=1} zom(sm, ws(wag)) \quad (6.22)$$

na ogół jednak:

$$lsm(sm, ws(wag)) \leq \sum_{ws(wag) : mom(sm, ws(wag))=1} zom(sm, ws(wag)) \quad (6.23)$$

Ze względu na to, że  $ws(wag) = 1, \dots, WS(wag)$  oraz dla niektórych  $ws(wag)$  może okazać się, że  $lsm(sm, ws(wag)) = 0$ , zadanie przerobowe  $sm$  - tej stacji manewrowej określone będzie wektorem  $\mathbf{lsm}(sm)$ .

Na potrzeby realizacji niniejszej rozprawy przyjęto, że w zależności od wartości liczbowych wektora  $\mathbf{lsm}(sm)$ , praca każdej stacji manewrowej mierzona będzie zdolnością przetwórczą wykonania zadania  $\mathbf{lsm}(sm)$ , tj.  $zom(\mathbf{lsm}(sm))$  oraz kosztem wykonania zadania określonego wektorem  $\mathbf{lsm}(sm)$ , tj.  $k(\mathbf{lsm}(sm))$ .

Z powyższego wynika, że w zależności od zadania przerobowego  $sm$  - tej stacji manewrowej, tj. w zależności od  $\mathbf{lsm}(sm)$  wartości wielkości  $zom(\mathbf{lsm}(sm))$  oraz  $k(\mathbf{lsm}(sm))$  mogą być różne. Jest oczywiste, że do kosztów wykonania zadania  $\mathbf{lsm}(sm)$  należy pewna stała wielkość kosztów, które są stałe (niezależne od wielkości przerobu). Wpływ na ich wielkość jest minimalny. Może być to jedynie organizacja prac ładunkowych w rozważanym rejonie sieci transportowej.

Analogicznie, pojęcie zadania przerobowego można określić dla innych rodzajów wyróżnionych stacji, tj. dla:

- stacji rozrządowej:

$$\mathbf{lsr}(sr) = [l_{sr}(sr, 1), \dots, l_{sr}(sr, ws(wag)), \dots, l_{sr}(sr, WS(wag))] \quad (6.24)$$

$$l_{sr}(sr, ws(wag)) \leq \sum_{ws(wag) : mor(sr, ws(wag))=1} z_{or}(sr, ws(wag)) \quad (6.25)$$

- stacji ładunkowej

$$\mathbf{lss}(sl) = [l_{ss}(sl, 1), \dots, l_{ss}(sl, ws(wag)), \dots, l_{ss}(sl, WS(wag))] \quad (6.26)$$

$$l_{ss}(sl, ws(wag)) \leq \sum_{ws(wag) : mos(sl, ws(wag))=1} z_{os}(sl, ws(wag)) \quad (6.27)$$

- dla punktu ładunkowego:

$$\mathbf{lsp}(pl) = [l_{sp}(pl, 1), \dots, l_{sp}(pl, ws(wag)), \dots, l_{sp}(pl, WS(wag))] \quad (6.28)$$

$$l_{sp}(pl, ws(wag)) \leq \sum_{ws(wag) : mop(pl, ws(wag))=1} z_{op}(pl, ws(wag)) \quad (6.29)$$



Dla pełnej, w ustalonym powyżej rozumieniu, charakterystyki pracy wyróżnionych stacji, zakłada się, że dysponować będziemy wielkościami:

- $zom(\mathbf{lsm}(sm))$  oraz  $k(\mathbf{lsm}(sm))$ ,
- $zom(\mathbf{l sr}(sr))$  oraz  $k(\mathbf{l sr}(sr))$ ,
- $zom(\mathbf{l ss}(sl))$  oraz  $k(\mathbf{l ss}(sl))$ ,
- $zom(\mathbf{l sp}(pl))$  oraz  $k(\mathbf{l sp}(pl))$ ,

o interpretacji ustalonej powyżej.

Maksymalne możliwości przerobowe wyróżnionych stacji, będą charakteryzowane przez wektory:

- dla stacji rozrządowej:

$$\mathbf{zor}(sr) = [zor(sr, 1), \dots, zor(sr, ws(wag)), \dots, zor(sr, WS(wag))] \quad (6.30)$$

- dla stacji manewrowej:

$$\mathbf{zom}(sm) = [zom(sm, 1), \dots, zom(sm, ws(wag)), \dots, zom(sm, WS(wag))] \quad (6.31)$$

- dla stacji ładunkowej:

$$\mathbf{zos}(sl) = [zos(sl, 1), \dots, zos(sl, ws(wag)), \dots, zos(sl, WS(wag))] \quad (6.32)$$

- dla punktu ładunkowego:

$$\mathbf{zop}(pl) = [zop(pl, 1), \dots, zop(pl, ws(wag)), \dots, zop(pl, WS(wag))] \quad (6.33)$$

Dla pełnej charakterystyki, w ustalonym powyżej rozumieniu, pracy wyróżnionych stacji zakładamy, że dysponować będziemy wielkościami:

- $zom(\mathbf{zom}(sm))$  oraz  $k(\mathbf{zom}(sm))$
- $zom(\mathbf{zor}(sr))$  oraz  $k(\mathbf{zor}(sr))$
- $zom(\mathbf{zos}(sl))$  oraz  $k(\mathbf{zos}(sl))$
- $zom(\mathbf{zop}(pl))$  oraz  $k(\mathbf{zop}(pl))$

o interpretacji maksymalnych zdolności przerobowych odpowiednich stacji i ponoszonych przez nie kosztach.

## 6.6. Wielkości poszukiwane w problemie doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach

W problemach decyzyjnych jednym z ważnych elementów jest ustalenie wielkości poszukiwanych tj. zmiennych decyzyjnych. W przypadku rozwiązywanego problemu doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych tych zmiennych decyzyjnych będzie kilka typów ze względu na rozmiar i złożoność zagadnienia.

Wykorzystanie kilka typów zmiennych decyzyjnych pozwoli na rozwiązanie problemu wieloetapowo. Wśród zmiennych zdefiniowano:

- **zasadnicze zmienne decyzyjne** binarne  $x(nol, zpd)$  o interpretacji wykorzystania odcinka o numerze  $nol$  ( $nol \in NOL$ ) do realizacji zadania przewozowego  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ), które zapisano następująco:

$$\mathbf{X}(zpd) = [x(nol, zpd)] \quad (6.34)$$

$$x(nol, zpd) \in \{0, 1\} \quad (6.35)$$

przy czym  $x(nol, zpd) = 1$  w przypadku, gdy odcinek o numerze  $nol$  ( $nol \in NOL$ ) został wykorzystany do realizacji zadania przewozowego  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ), w przeciwnym wypadku  $x(nol, zpd) = 0$ .

- **wynikowe zmienne decyzyjne** o interpretacji ciągu odcinków linii kolejowych o numerach  $nol$  ( $nol \in NOL$ ) stanowiących najkrótszą drogę, po której można zrealizować potrzebę przewozową  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ), które zapisano następująco:

$$\mathbf{D}(zpd) = \langle 1, \dots, nol, nol', \dots, NOL \rangle \quad (6.36)$$

Uzyskanie wartości w/w zmiennych decyzyjnych pozwoli na udzielenie odpowiedzi **jaką drogą** najlepiej przetransportować przesyłkę  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ) będącą zgłoszoną do przewozu.

- **wynikowe zmienne decyzyjne** o interpretacji długości drogi realizacji przewozu dla potrzeby przewozowej  $zpd$  –  $dl(zpd)$  ( $zpd \in ZPD$ ) po ustalonej trasie, które zapisano następująco:

$$dl(zpd) = \sum_{nol \in \mathbf{NOL}} okm(nol) \cdot x(nol, zpd) \quad [\text{km}] \quad (6.37)$$

Uzyskanie wartości w/w zmiennych decyzyjnych pozwoli na udzielenie odpowiedzi **po jakiej długości drogi** zostanie przetransportowana przesyłka  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) będąca zgłoszoną do przewozu.

- **zasadnicze zmienne decyzyjne** binarne  $dtr(zpd, lok, wag)$  o interpretacji przydziału do realizacji danego zadania przewozowego  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) lokomotywy o numerze  $lok$  ( $lok \in \mathbf{LOK}$ ) oraz określonej liczby wagonów o numerach  $wag$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ), które zapisano następująco:

$$\mathbf{DTR}(zpd) = [dtr(zpd, lok, wag)] \quad (6.38)$$

$$dtr(zpd, lok, wag) \in \{0, 1\} \quad (6.39)$$

przy czym  $dtr(zpd, lok, wag) = 1$  w przypadku, gdy do realizacji zadania przewozowego  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) zadysponowano lokomotywę o numerze  $lok$  ( $lok \in \mathbf{LOK}$ ) oraz określoną liczbę wagonów o numerach  $wag$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ), w przeciwnym wypadku  $dtr(zpd, lok, wag) = 0$ .

- **wynikowe zmienne decyzyjne** o interpretacji czasu realizacji przewozu dla potrzeby przewozowej  $zpd$  –  $t(zpd)$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) po ustalonej trasie, które zapisano następująco:

$$t(zpd) = \sum_{nol \in \mathbf{NOL}} t(nol, \mathbf{DTR}(zpd)) \cdot x(nol, zpd) \quad [\text{s}] \quad (6.40)$$

Aby uzyskać wartość parametru  $t(nol, \mathbf{DTR}(zpd))$  o interpretacji czasu przejazdu pociągu na danym odcinku linii kolejowej  $nol$  ( $nol \in \mathbf{NOL}$ ) stanowiącym trasę przewozu. Zostanie do tego wykorzystana metoda obliczeń uproszczonych [137], ze względu na prostotę obliczeń i stosunkowo mały zakres danych wejściowych.

Uzyskanie wartości w/w zmiennych decyzyjnych pozwoli na udzielenie odpowiedzi **w jakim czasie** zostanie przetransportowana przesyłka  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) będąca zgłoszoną do przewozu.

- **wynikowe zmienne decyzyjne** o interpretacji kosztu realizacji przewozu wynikającego z zaspokojenia potrzeby przewozowej  $zpd - k(zpd)$  ( $zpd \in ZPD$ ) po ustalonej trasie przewozu, które zapisano następująco:

$$\forall zpd \in ZPD \quad k(zpd) = \sum_{nol \in NOL} k(nol, zpd, \mathbf{D}(zpd), \mathbf{DTR}(zpd), TTP) \cdot x(nol, zpd) \quad [\text{PLN}] \quad (6.41)$$

Uzyskanie wartości w/w zmiennych decyzyjnych pozwoli na udzielenie odpowiedzi **jaki będzie koszt przewozu** przesyłki będącej zgłoszoną do przewozu  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ).

- **wynikowe zmienne decyzyjne** o interpretacji warunków przewozu przesyłki będącej zgłoszoną do przewozu  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ) dla ustalonej drogi oraz dobranej lokomotywy i wagonów zapisane w postaci wektora  $\mathbf{WP}(zpd)$ :

$$\mathbf{WP}(zpd) = \begin{bmatrix} sp(zpd, pe), sk(zpd, pe), dl(zpd), \mathbf{O}(zpd), \\ \mathbf{VMAX}(zpd), \mathbf{NMAX}(zpd), \mathbf{WMAX}(zpd), \\ \mathbf{OMAX}(zpd), \mathbf{DMAX}(zpd), rzmh(\mathbf{DTR}(zpd)), \\ \mathbf{TNOL}(zpd), t(zpd), k(zpd) \end{bmatrix} \quad (6.42)$$

gdzie:

- $\mathbf{O}(zpd)$  – wektor zawierający wykaz odcinków linii kolejowych  $nol$  ( $nol \in NOL$ ) po których będzie realizowana potrzeba przewozowa  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ),
- $\mathbf{VMAX}(zpd)$  – wektor zawierający wykaz dopuszczalnych prędkości dla odcinków linii kolejowych  $nol$  ( $nol \in NOL$ ) po których będzie realizowana potrzeba  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ),
- $\mathbf{NMAX}(zpd)$  – wektor zawierający wykaz dopuszczalnych nacisków osi dla odcinków linii kolejowych  $nol$  ( $nol \in NOL$ ) po których będzie realizowana potrzeba przewozowa  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ),
- $\mathbf{WMAX}(zpd)$  – wektor zawierający wykaz dopuszczalnej liczby wagonów dla odcinków linii kolejowych  $nol$  ( $nol \in NOL$ ) po których będzie realizowana potrzeba przewozowa  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ),
- $\mathbf{OMAX}(zpd)$  – wektor zawierający wykaz dopuszczalnej liczby osi dla odcinków linii kolejowych  $nol$  ( $nol \in NOL$ ) po których będzie realizowana potrzeba  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ),
- $\mathbf{DMAX}(zpd)$  – wektor zawierający wykaz dopuszczalnej długości pociągów dla odcinków linii kolejowych  $nol$  ( $nol \in NOL$ ) po których będzie realizowane zadanie  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ),

- $rmh(\mathbf{DTR}(zpd))$  – rzeczywista masa hamująca pociągu: zadysponowanej lokomotywy  $lok$  ( $lok \in \mathbf{LOK}$ ) oraz zadysponowanych wagonów  $wag$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ),
- $\mathbf{TNOL}(zpd)$  – wektor zawierający teoretyczne czasy jazdy dla odcinków linii kolejowych  $nol$  ( $nol \in \mathbf{NOL}$ ) po których będzie realizowane zadanie przewozowe  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ),
- $t(zpd)$  – teoretyczny czas jazdy dla realizacji potrzeby przewozowej  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ),
- $k(zpd)$  – koszt przewozu dla realizacji potrzeby przewozowej  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ).

## 6.7. Wskaźniki oceny jakości rozwiązania doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach

Do oceny jakości rozwiązania doboru taboru do zadań przy ograniczonych zasobach przyjęto następujące kryteria:

- a)  $F_1(\mathbf{D}(zpd))$  - minimalizacja długości drogi pokonanej po poszczególnych odcinkach linii kolejowych  $nol$  ( $nol \in \mathbf{NOL}$ ) zapisanej wzorem:

$$\forall zpd \in \mathbf{ZPD} \quad F_1(\mathbf{D}(zpd)) = \sum_{nol \in \mathbf{NOL}} x(nol, zpd) \cdot okm(nol) \longrightarrow \min \quad (6.43)$$

- b)  $F_2(\mathbf{DTR}(zpd))$  minimalizacja kosztów  $\mathbf{TTP}(zpd)$  związanych z przydziałem do realizacji zadania przewozowego  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) lokomotywy o numerze  $lok$  ( $lok \in \mathbf{LOK}$ ) oraz określonej liczby wagonów o numerach  $wag$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ) zapisanej wzorem:

$$F_2(\mathbf{DTR}(zpd)) = dtr(zpd, lok, wag) \cdot \mathbf{TTP}(zpd) \longrightarrow \min \quad (6.44)$$

- c)  $F_3(t(zpd))$  – minimalizacja czasu przewozu przesyłki  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) po sieci kolejowej opisanej grafem  $\mathbf{GSK}$  zapisanej wzorem:

$$F_3(t(zpd)) = \sum_{nol \in \mathbf{NOL}} t(nol, \mathbf{DTR}(zpd)) \cdot x(nol, zpd) \longrightarrow \min \quad (6.45)$$

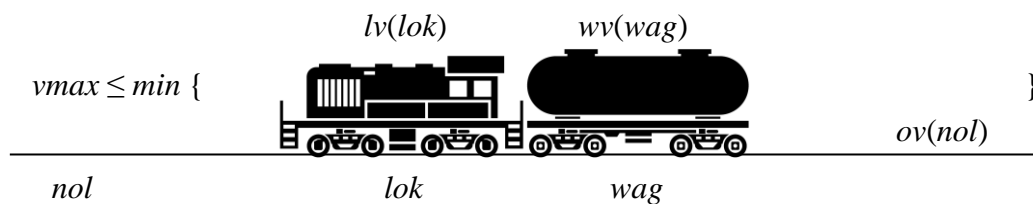
- d)  $F_4(k(zpd))$  – minimalizacja kosztu przewozu przesyłki  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) po sieci kolejowej opisanej grafem  $\mathbf{GSK}$  zapisanej wzorem:

$$F_4(k(zpd)) = \sum_{nol \in \mathbf{NOL}} k(nol, zpd, \mathbf{D}(zpd), \mathbf{DTR}(zpd), \mathbf{TTP}) \cdot x(nol, zpd) \longrightarrow \min \quad (6.46)$$

## 6.8. Ograniczenia stosowane w modelu doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach

Aby możliwy był dobór taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach trzeba zdefiniować następujące ograniczenia i warunki brzegowe:

- (1) maksymalna prędkość pociągu na odcinku linii kolejowej  $nol$  ( $nol \in \mathbf{NOL}$ ) uruchomionego w związku z koniecznością zaspokojenia potrzeby przewozowej  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ), powinna być nie większa niż maksymalna prędkość lokomotyw ( $lv(lok)$ ) ( $lok \in \mathbf{LOK}$ ) przydzielonych do realizacji zadania, maksymalna prędkość wagonów stanowiących skład pociągu ( $wv(wag)$ ) ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ) przydzielonych do realizacji zadania lub maksymalna prędkość obowiązująca na poszczególnych odcinkach linii kolejowej stanowiących drogę przewozu ( $ov(nol)$ ) ( $nol \in \mathbf{NOL}$ ); ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.2 oraz w postaci wzoru (6.47),

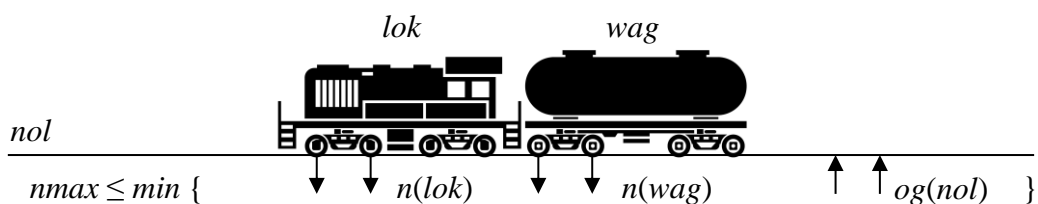


Rys. 6.2. Ilustracja ograniczenia (1)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector / Freepik*

$$vmax \leq \min \left\{ \begin{array}{l} ov(nol) \\ lv(lok) \\ wv(wag) \end{array} \right\} \quad (6.47)$$

- (2) maksymalne naciski na oś pojazdów (lokomotyw ( $n(lok)$ ) ( $lok \in \mathbf{LOK}$ ) i wagonów ( $n(wag)$ )) ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ) stanowiących skład pociągu uruchomionego w związku z koniecznością zaspokojenia potrzeby przewozowej  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) na odcinku linii kolejowej  $nol$  ( $nol \in \mathbf{NOL}$ ) powinny być nie większe niż maksymalne dopuszczalne naciski na oś na poszczególnych odcinkach linii kolejowej stanowiących drogę przewozu ( $og(nol)$ ) ( $nol \in \mathbf{NOL}$ ), ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.3 oraz w postaci wzoru (6.48),

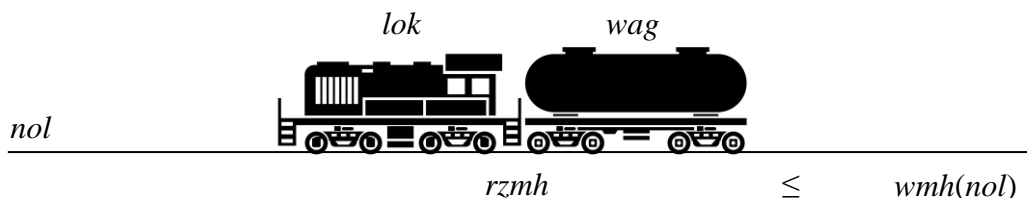


Rys. 6.3. Ilustracja ograniczenia (2)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector / Freepik*

$$nmax \leq \min \left\{ \begin{array}{l} og(nol) \\ n(lok) \\ n(wag) \end{array} \right\} \quad (6.48)$$

- (3) rzeczywista masa hamująca ( $rzmh$ ) składu pociągu uruchomionego w związku z koniecznością zaspokojenia potrzeby przewozowej  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ) powinna być większa bądź równa od wymaganej masy hamującej czyli wymaganej masy hamującej składu pociągu dobraneo do realizacji potrzeby przewozowej  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ) na odcinku linii kolejowej  $nol - wmh(nol)$  ( $nol \in NOL$ ), ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.4 oraz w postaci wzoru (6.49),

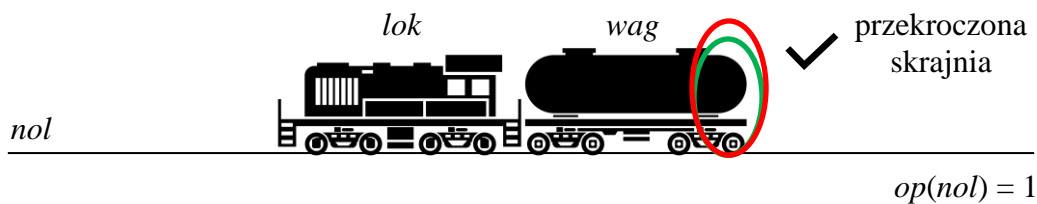


Rys. 6.4. Ilustracja ograniczenia (3)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector / Freepik*

$$rzmh \leq wmh(nol) \quad (6.49)$$

- (4) jeśli skład pociągu uruchomionego w związku z koniecznością zaspokojenia potrzeby przewozowej  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ) jest pociągiem z przekroczoną skrajną ( $ps(zpd) = 1$ ,  $zpd \in ZPD$ ) to może on poruszać się tylko po odcinkach, po których dopuszczone jest kursowanie takich pociągów –  $op(nol) = 1$  ( $nol \in NOL$ ), ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.5 oraz w postaci wzoru (6.50),

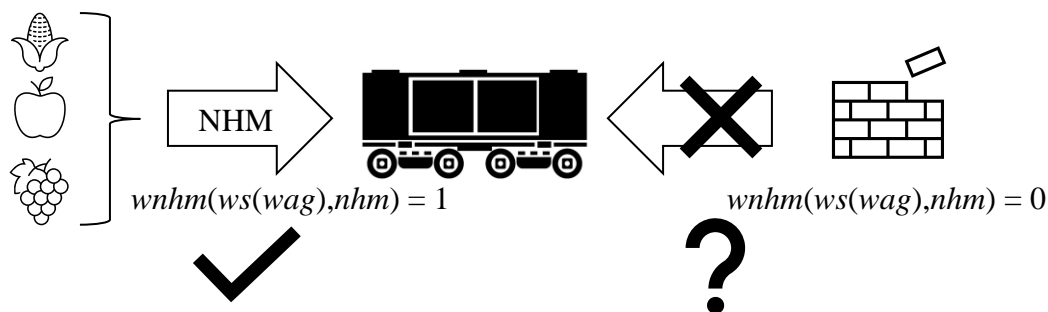


Rys. 6.5. Ilustracja ograniczenia (4)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector* / *Freepik*

$$\exists zpd \in \mathbf{ZPD} \quad ps(zpd)=1 \Rightarrow x(nol, zpd) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } op(nol)=1 \\ 0 & \text{gdy } op(nol)=0 \end{cases} \quad (6.50)$$

- (5) konkretny ładunek powinien być przewożony wagonem konkretnej serii zgodnie z przypisaniem  $wnhm(ws(wag),nhm)$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ,  $nhm \in \mathbf{NHM}$ ) (do realizacji danego zadania przewozowego  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) powinny być zadysponowane takie wagony  $wag$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ), które mogą przewozić konkretny rodzaj towaru  $nhm$  –  $tow(zpd,nhm) = 1$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ,  $nhm \in \mathbf{NHM}$ ), ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.6 oraz w postaci wzoru (6.51),



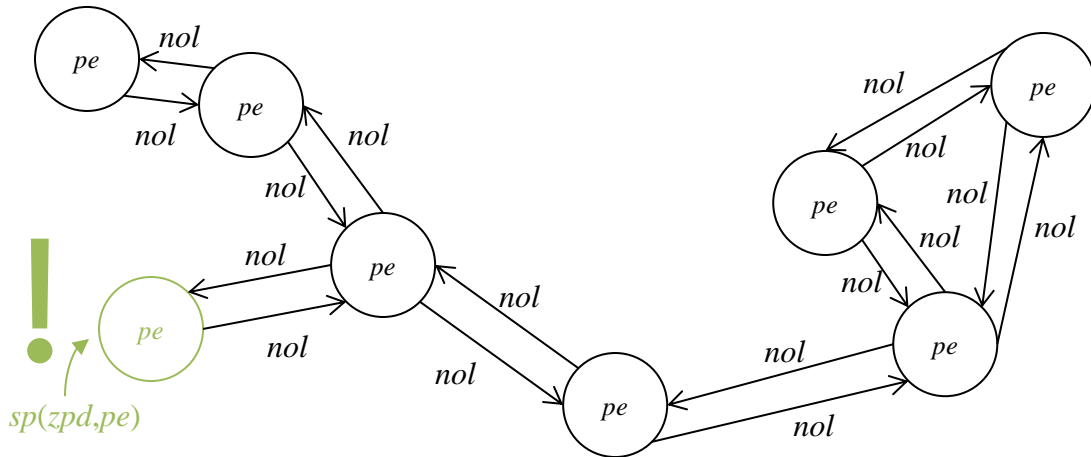
Rys. 6.6. Ilustracja ograniczenia (5)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector* / *Freepik*

$$\begin{aligned} & \left. \begin{array}{l} \exists zpd \in \mathbf{ZPD} \\ \exists nhm \in \mathbf{NHM} \end{array} \right\} tow(zpd, nhm)=1 \Rightarrow \\ \Rightarrow & \quad dtr(zpd, lok, wag) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } wnhm(ws(wag),nhm)=1 \\ 0 & \text{gdy } wnhm(ws(wag),nhm)=0 \end{cases} \quad (6.51) \end{aligned}$$



- (6) trasa przewozu przesyłki będącej potrzebą przewozową powinna rozpoczynać się na posterunku ruchu początkowym  $sp(zpd,pe)$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ,  $pe \in \mathbf{PE}$ ), ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.7 oraz w postaci wzoru (6.52),



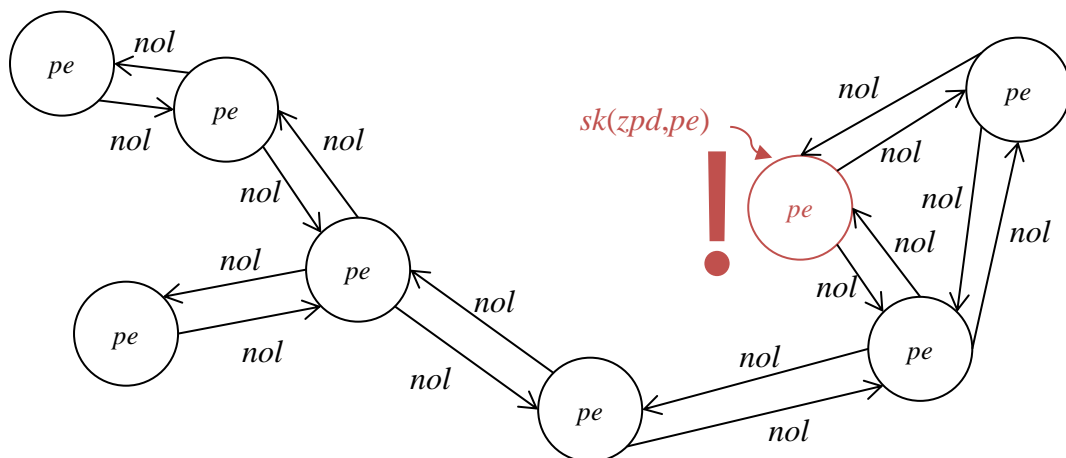
Rys. 6.7. Ilustracja ograniczenia (6)

Źródło: opracowanie własne

$$\sum_{((sp(zpd,pe),pe^{(pe+1)}),nrl) \in OL} x(((sp(zpd,pe),pe^{(pe+1)}),nrl),zpd) = 1 \quad (6.52)$$

UWAGA: W powyższym wyrażeniu postać zmiennej decyzyjnej  $x(nol,zpd)$  zapisano w postaci  $x(((sp(zpd,pe),pe^{(pe+1)}),nrl),zpd)$

- (7) trasa przewozu przesyłki będącej potrzebą przewozową powinna kończyć się na posterunku ruchu końcowym  $sk(zpd,pe)$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ,  $pe \in \mathbf{PE}$ ), ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.8 oraz w postaci wzoru (6.53),



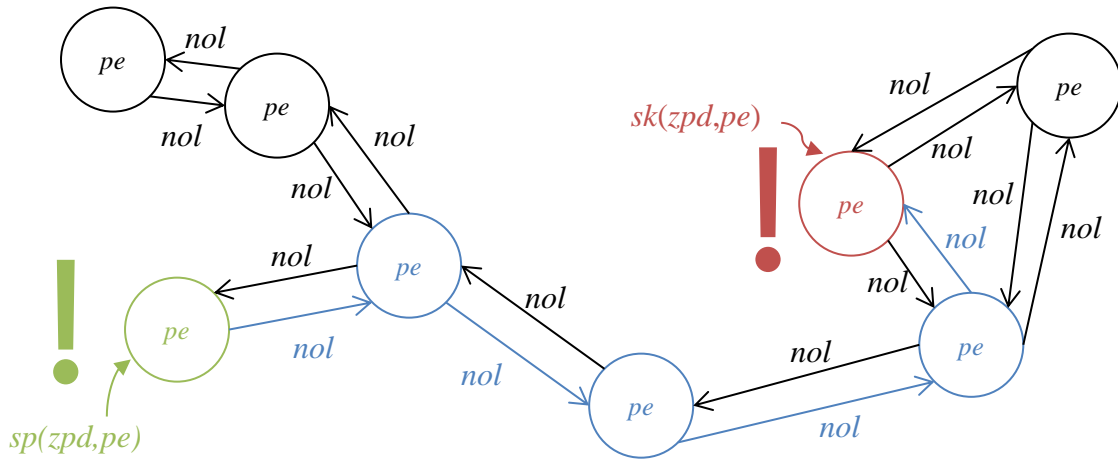
Rys. 6.8. Ilustracja ograniczenia (7)

Źródło: opracowanie własne

$$\sum_{((pe^{(pe-1)}, sk(zpd, pe)), nrl) \in OL} x(((pe^{(pe-1)}, sk(zpd, pe)), nrl), zpd) = 1 \quad (6.53)$$

UWAGA: W powyższym wyrażeniu postać zmiennej decyzyjnej  $x(nol, zpd)$  zapisano w postaci  $x((pe^{(pe-1)}, (sk(zpd, pe)), nrl), zpd)$

- (8) trasa przewozu przesyłki będącej potrzebą przewozową powinna składać się z kolejnych odcinków linii kolejowej – patrz rys. 6.9 oraz w postaci wzoru (6.54),



Rys. 6.9. Ilustracja ograniczenia (8)

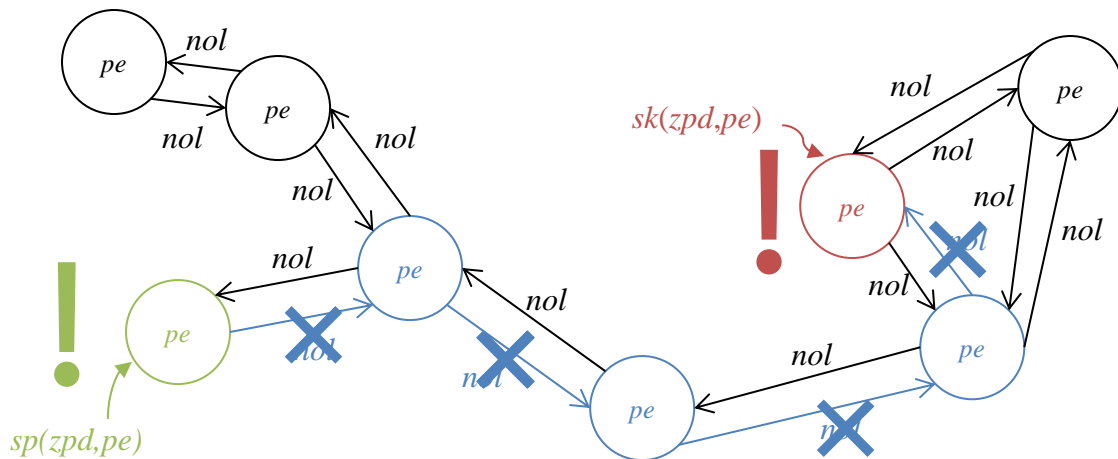
Źródło: opracowanie własne

$$x(((pe^{(pe-1)}, pe^{pe}), nrl), zpd) = x(((pe^{pe}, pe^{(pe+1)}), nrl), zpd) \quad (6.54)$$

UWAGA: W powyższym wyrażeniu postać zmiennej decyzyjnej  $x(nol, zpd)$  zapisano w postaci  $x((pe^{(pe-1)}, pe^{(pe)}, nrl), zpd)$  i  $x((pe^{(pe)}, pe^{(pe+1)}, nrl), zpd)$

- (9) dany odcinek linii kolejowej  $nol$  ( $nol \in \mathbf{NOL}$ ) powinien występować w trasie realizacji konkretnego zadania przewozowego  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) tylko raz – patrz rys. 6.10 oraz w postaci wzoru (6.55),

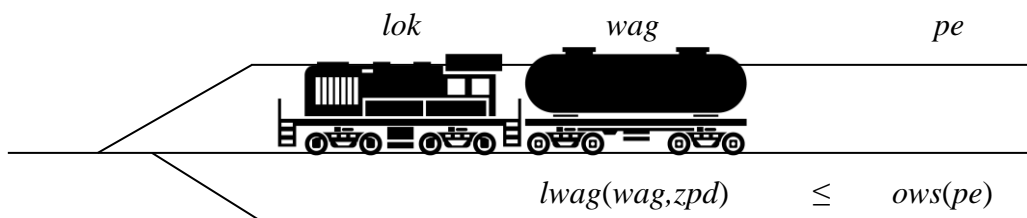
$$\sum_{nol \in \mathbf{NOL}} x(nol, zpd) = 1 \quad (6.55)$$



Rys. 6.10. Ilustracja ograniczenia (9)

Źródło: opracowanie własne

- (10) liczba wagonów  $wag$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ) przydzielonych do realizacji konkretnego zadania przewozowego  $zpd$  –  $lwag(wag, zpd)$  ( $wag \in \mathbf{WAG}, zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) powinna być mniejsza bądź równa maksymalnej liczbie wagonów  $ows(pe)$  ( $pe \in \mathbf{PE}$ ), która może poruszać się po terenie punktów eksploatacyjnych  $pe$  ( $pe \in \mathbf{PE}$ ) zlokalizowanych na trasie przewozu, ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.11 oraz w postaci wzoru (6.56),

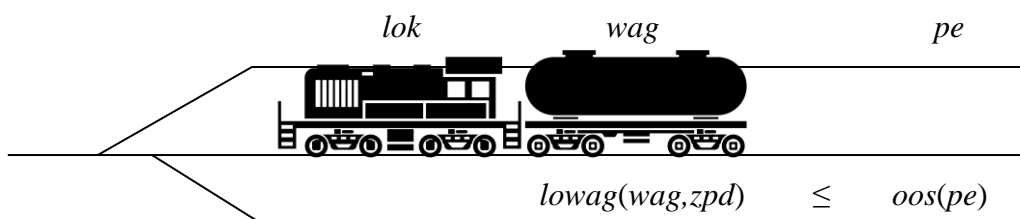


Rys. 6.11. Ilustracja ograniczenia (10)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector / Freepik*

$$lwag(wag, zpd) \leq ows(pe) \quad (6.56)$$

- (11) liczba osi wagonów  $wag$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ) przydzielonych do realizacji konkretnego zadania przewozowego  $zpd$  –  $lowag(wag, zpd)$  ( $wag \in \mathbf{WAG}, zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) powinna być mniejsza bądź równa maksymalnej liczbie osi wagonów  $oos(pe)$  ( $pe \in \mathbf{PE}$ ), która może poruszać się po terenie punktów eksploatacyjnych  $pe$  ( $pe \in \mathbf{PE}$ ) zlokalizowanych na trasie przewozu, ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.12 oraz w postaci wzoru (6.57),

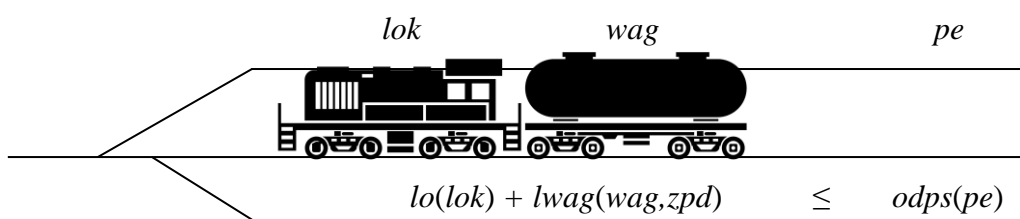


Rys. 6.12. Ilustracja ograniczenia (11)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector / Freepik*

$$lowag(wag, zpd) \leq oos(pe) \quad (6.57)$$

- (12) suma długości lokomotywy  $lok$  –  $lo(lok)$  ( $lok \in \mathbf{LOK}$ ) i wagonów  $wag$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ) przydzielonych do realizacji konkretnego zadania przewozowego  $zpd$  –  $lwag(wag, zpd)$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ,  $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) powinna być mniejsza bądź równa maksymalnej liczby osi  $odps(pe)$  ( $pe \in \mathbf{PE}$ ), która może poruszać się po terenie punktów eksploatacyjnych  $pe$  ( $pe \in \mathbf{PE}$ ) zlokalizowanych na trasie przewozu, ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.13 oraz w postaci wzoru (6.58),



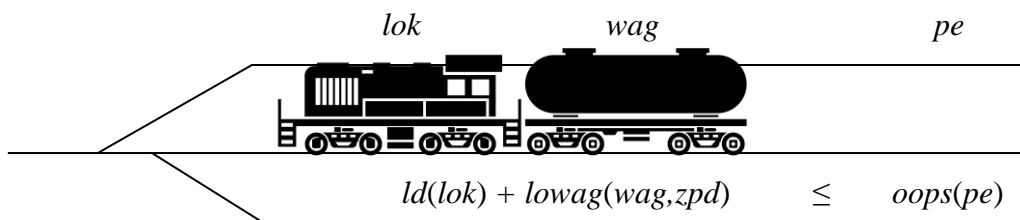
Rys. 6.13. Ilustracja ograniczenia (12)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector / Freepik*

$$lo(lok) + lwag(wag, zpd) \leq odps(pe) \quad (6.58)$$

- (13) suma liczby osi lokomotywy  $lok$  –  $ld(lok)$  ( $lok \in \mathbf{LOK}$ ) i wagonów  $wag$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ) przydzielonych do realizacji konkretnego zadania przewozowego  $zpd$  –  $lowag(wag, zpd)$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ,  $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) powinna być mniejsza bądź równa maksymalnej liczbie osi pociągu  $oops(pe)$  ( $pe \in \mathbf{PE}$ ), która może poruszać się po terenie punktów eksploatacyjnych  $pe$  ( $pe \in \mathbf{PE}$ ) zlokalizowanych na trasie przewozu, ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.14 oraz w postaci wzoru (6.59),

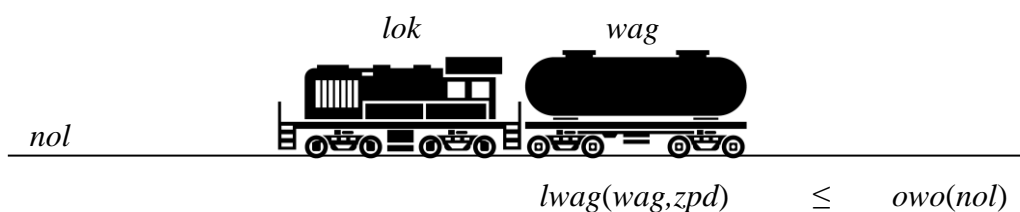
$$ld(lok) + lowag(wag, zpd) \leq oops(pe) \quad (6.59)$$



Rys. 6.14. Ilustracja ograniczenia (13)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector / Freepik*

- (14) liczba wagonów  $wag$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ) przydzielonych do realizacji konkretnego zadania przewozowego  $zpd - lwag(wag, zpd)$  ( $wag \in \mathbf{WAG}, zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) powinna być mniejsza bądź równa maksymalnej liczbie wagonów, która może poruszać się po poszczególnych odcinkach linii kolejowej  $nol$  ( $nol \in \mathbf{NOL}$ ) zlokalizowanych na trasie przewozu –  $owo(nol)$  ( $nol \in \mathbf{NOL}$ ), ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.15 oraz w postaci wzoru (6.60),

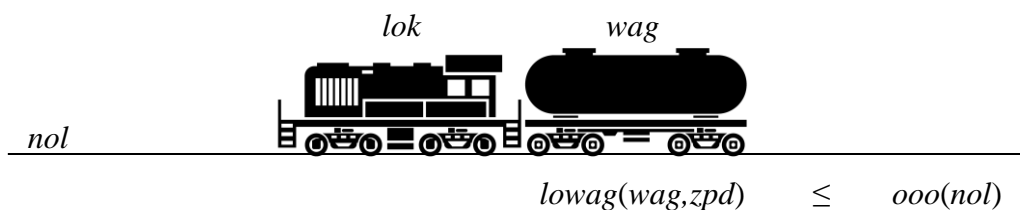


Rys. 6.15. Ilustracja ograniczenia (14)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector / Freepik*

$$lwag(wag, zpd) \leq owo(nol) \quad (6.60)$$

- (15) liczba osi wagonów  $wag$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ) przydzielonych do realizacji konkretnego zadania przewozowego  $zpd - lowag(wag, zpd)$  ( $wag \in \mathbf{WAG}, zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) powinna być mniejsza bądź równa niż maksymalna liczba osi wagonów  $ooo(nol)$  ( $nol \in \mathbf{NOL}$ ), która może poruszać się po poszczególnych odcinkach linii kolejowej  $nol$  ( $nol \in \mathbf{NOL}$ ) zlokalizowanych na trasie przewozu, ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.16 oraz w postaci wzoru (6.61),

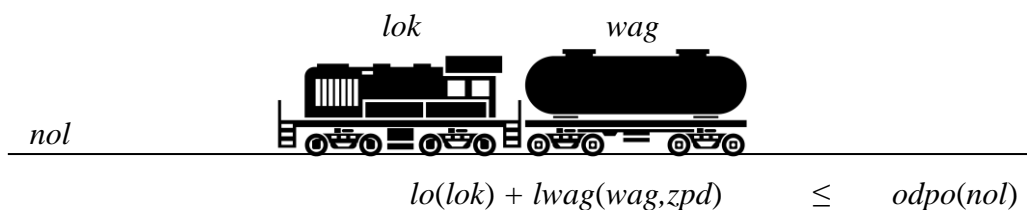


Rys. 6.16. Ilustracja ograniczenia (15)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector / Freepik*

$$lwag(wag, zpd) \leq ooo(nol) \quad (6.61)$$

- (16) suma liczby osi lokomotywy  $lok$  –  $lo(lok)$  ( $lok \in LOK$ ) i wagonów  $wag$  ( $wag \in WAG$ ) przydzielonych do realizacji konkretnego zadania przewozowego powinna być  $zpd$  –  $lwag(wag, zpd)$  ( $wag \in WAG, zpd \in ZPD$ ) powinna być mniejsza bądź równa niż maksymalna długość pociągu  $odpo(nol)$  ( $nol \in NOL$ ), która może poruszać się po poszczególnych odcinkach linii kolejowej zlokalizowanych na trasie przewozu, ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.17 oraz w postaci wzoru (6.62),

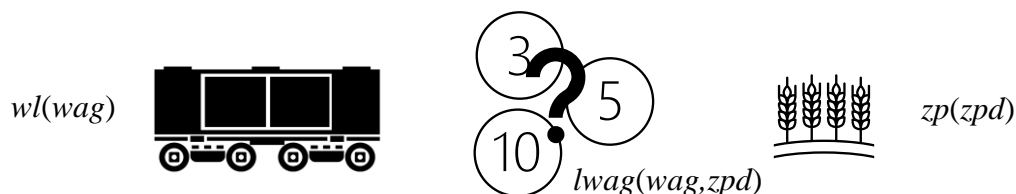


Rys. 6.17. Ilustracja ograniczenia (16)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector / Freepik*

$$lo(lok) + lwag(wag, zpd) \leq odpo(nol) \quad (6.62)$$

- (17) do realizacji danego zadania przewozowego  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ) należy zadysponować taką liczbę wagonów  $wag$  ( $wag \in WAG$ ) o ładowności  $wl(wag)$  ( $wag \in WAG$ ), która pozwoli na pełne zaspokojenie wielkości potrzeb przewozowych zgłoszonych do transportu –  $zp(zpd)$  ( $zpd \in ZPD$ ), liczba wagonów  $lwag(wag, zpd)$  ( $wag \in WAG, zpd \in ZPD$ ) powinna być mniejsza bądź równa od stosunku wielkości zadania przewozowego do ładowności wagonu, ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.18 oraz w postaci wzoru (6.63),

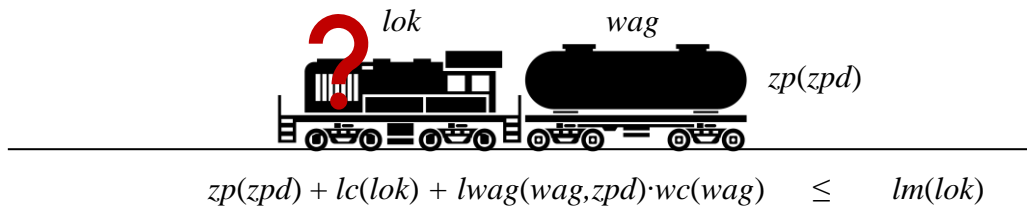


Rys. 6.18. Ilustracja ograniczenia (17)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector / Freepik*

$$\sum_{wag \in WAG} lwag(wag, zpd) \leq \frac{zp(zpd)}{\sum_{wag \in WAG} wl(wag)} \quad (6.63)$$

- (18) do realizacji danego zadania przewozowego  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ) należy zadysponować taką lokomotywę  $lok$  ( $lok \in LOK$ ), której uciąg  $lm(lok)$  ( $lok \in LOK$ ) pozwoli na wprawienie składu pociągu w ruch, do oszacowania wielkości niezbędnego uciągu potrzebny jest ciężar wybranej lokomotywy –  $lc(lok)$  ( $lok \in LOK$ ), ciężar zadysponowanych wagonów –  $wc(wag)$  ( $wag \in WAG$ ) oraz wielkość zadania przewozowego –  $zp(zpd)$  ( $zpd \in ZPD$ ), ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.19 oraz w postaci wzoru (6.64),

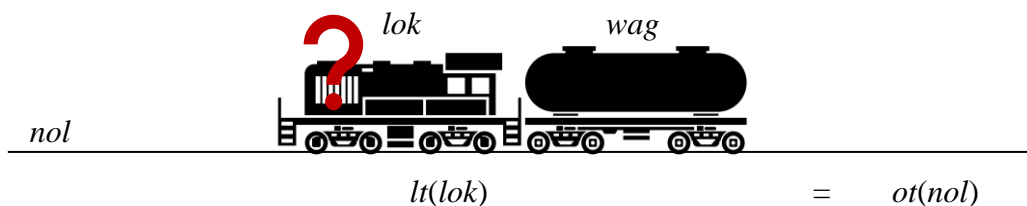


Rys. 6.19. Ilustracja ograniczenia (18)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector* / *Freepik*

$$lc(lok) + \sum_{wag \in WAG} wc(wag) \cdot lwag(wag, zpd) + zp(zpd) \leq lm(lok) \quad (6.64)$$

- (19) do realizacji danego zadania przewozowego  $zpd$  ( $zpd \in ZPD$ ) należy zadysponować taką lokomotywę  $lok$  ( $lok \in LOK$ ), której rodzaj trakcji  $lt(lok)$  ( $lok \in LOK$ ) odpowiada rodzajowi trakcji zlokalizowanej na poszczególnych odcinkach linii kolejowych  $ot(nol)$  ( $nol \in NOL$ ), ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.20 oraz w postaci wzoru (6.65),



Rys. 6.20. Ilustracja ograniczenia (19)

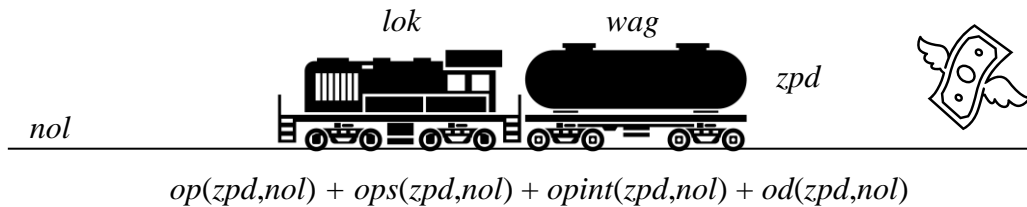
Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector* / *Freepik*

$$lt(lok) \leq ot(nol) \quad (6.65)$$

(20) do realizacji wszystkich zaplanowanych zadań przewozowych  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) nie można przydzielić większej liczby lokomotyw niż posiada dany zakład eksploatacji przewoźnika  $ll(lok)$  ( $lok \in \mathbf{LOK}$ ), ilustrację ograniczenia przedstawiono w postaci wzoru (6.66),

$$\sum_{lok \in \mathbf{LOK}} dtr(zpd, lok, wag) \leq ll(lok) \quad (6.66)$$

(21) realizacja danego zadania przewozowego  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) po konkretnym odcinku powinna być obłożona opłatą podstawową  $op(zpd, nol)$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ,  $nol \in \mathbf{NOL}$ ), dla zadania przewozowego będącego pojazdem samochodowym  $ops(zpd, nol)$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ,  $nol \in \mathbf{NOL}$ ), dla zadania przewozowego będącego przesyłką intermodalną  $opint(zpd, nol)$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ,  $nol \in \mathbf{NOL}$ ) oraz ewentualnie opłatą dodatkową  $od(zpd, nol)$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ,  $nol \in \mathbf{NOL}$ ), ilustrację ograniczenia przedstawiono na rys. 6.21 oraz w postaci wzoru (6.67),



Rys. 6.21. Ilustracja ograniczenia (21)

Źródło: opracowanie własne; ikony zaprojektowane przez *macrovector* / *Freepik*

$$k(nol, zpd, \mathbf{D}(zpd), \mathbf{DTR}(zpd), \mathbf{TTP}) = \begin{cases} dtr(zpd, lok, wag) \cdot op(zpd, nol) + \\ dtr(zpd, lok, wag) \cdot ops(zpd, nol) + \\ dtr(zpd, lok, wag) \cdot opint(zpd, nol) + \\ dtr(zpd, lok, wag) \cdot od(zpd, nol) \end{cases} \quad (6.67)$$

(22) realizacja danego zadania przewozowego  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) może być obłożona współczynnikiem korygującym  $wsk(zpd)$ ,  $wskpsl(zpd)$ ,  $wskpsp(zpd)$ ,  $wskintl \leq 22(zpd)$ ,  $wskintl > 22(zpd)$ ,  $wskintp(zpd)$ , ilustrację ograniczenia przedstawiono w postaci wzoru (6.68),



$$k(zpd) = \begin{cases} wsk(zpd) \cdot k(nol, zpd, \mathbf{D}(zpd), \mathbf{DTR}(zpd), TTP) \\ wskpsl(zpd) \cdot k(nol, zpd, \mathbf{D}(zpd), \mathbf{DTR}(zpd), TTP) \\ wskpsp(zpd) \cdot k(nol, zpd, \mathbf{D}(zpd), \mathbf{DTR}(zpd), TTP) \\ wskintl \leq 22(zpd) \cdot k(nol, zpd, \mathbf{D}(zpd), \mathbf{DTR}(zpd), TTP) \\ wskintl > 22(zpd) \cdot k(nol, zpd, \mathbf{D}(zpd), \mathbf{DTR}(zpd), TTP) \\ wskintp(zpd) \cdot k(nol, zpd, \mathbf{D}(zpd), \mathbf{DTR}(zpd), TTP) \end{cases} \quad (6.68)$$

## 7. METODA ROZWIĄZANIA PROBLEMU BADAWCZEGO WRAZ Z ALGORYTMEM

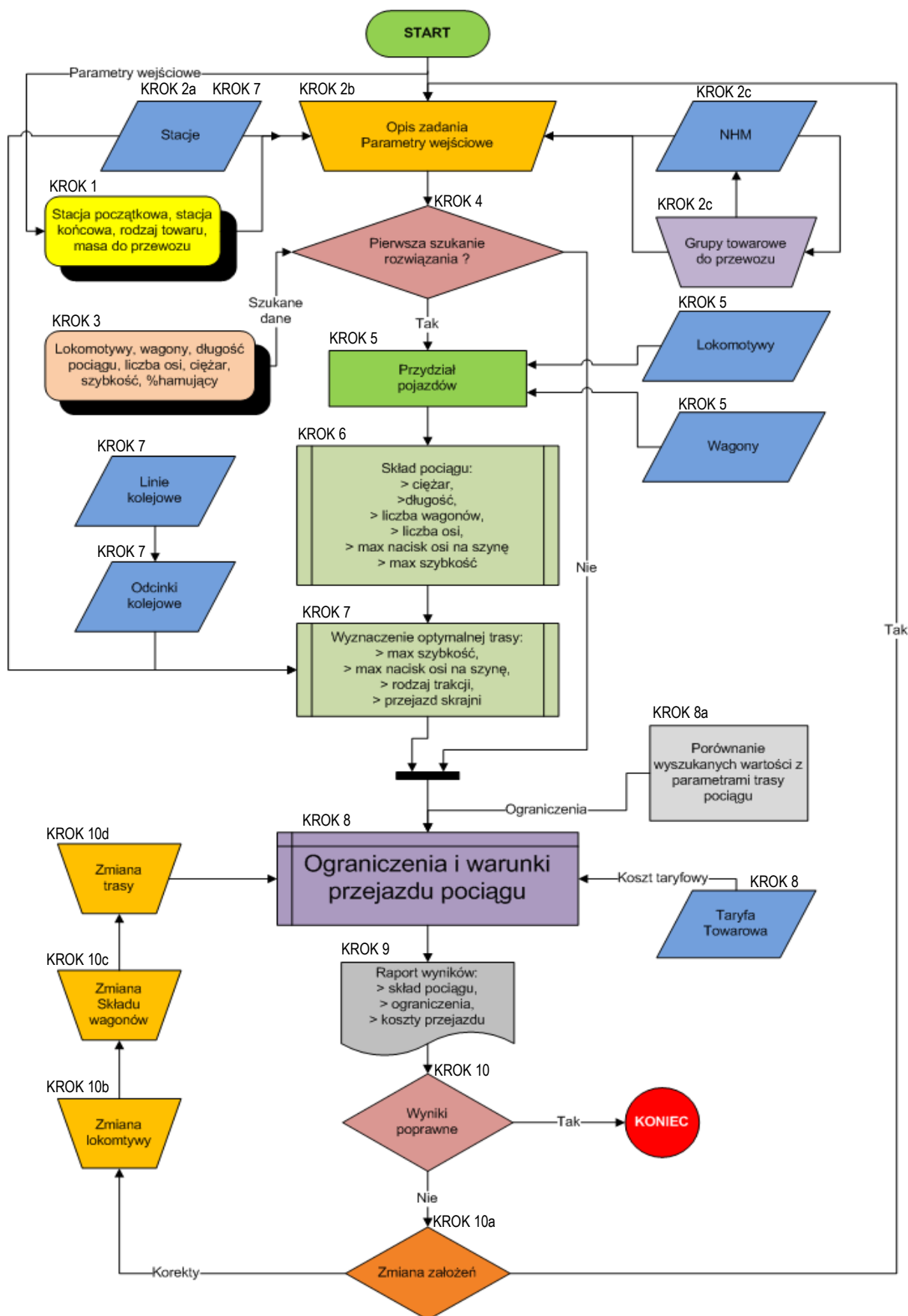
### 7.1. Procedura metody

W rozdziale 6 przedstawiono model decyzyjny problemu badawczego, którym był dobór taboru do realizacji zadań w kolejowym transporcie towarowym, przy ograniczonej jego liczebności. Poprzez ten problem należy rozumieć w pierwszej fazie dobór odpowiedniej liczby lokomotyw konkretnej serii oraz odpowiedniej liczby wagonów odpowiednich serii do realizacji konkretnego zadania (uprzednio zdefiniowanego), a następnie wybór najkrótszej trasy, po której zostanie dokonany przewóz i na tej podstawie określenie warunków handlowych jego realizacji. Kolejnym etapem pracy naukowej jest opracowanie metody rozwiązania tak zdefiniowanego problemu.

Jednym ze sposobów przedstawienia metody jest opracowanie jej algorytmu. Biorąc pod uwagę literaturowe podejście należy zauważyć, że algorytm definiowany jest jako przepis postępowania prowadzący do rozwiązania ustalonego problemu, określający ciąg czynności elementarnych, które należy w tym celu wykonać w postaci ściśle określonych reguł i metod [78]. Zatem głównym zadaniem metody jest uzyskanie rozwiązania sformułowanego w rozdziale 6 modelu decyzyjnego. Rozwiązaniem zadania będzie uzyskanie konkretnych wartości liczbowych zdefiniowanych zmiennych decyzyjnych, dla których zapisane funkcje kryterium osiągają wartości ekstremalne. Rozwiązanie powinno spełniać nałożone warunki brzegowe zadania (ograniczenia). Schemat metody zaprezentowano na rys. 7.1.

Metodę doboru taboru do realizacji zadań w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach można zapisać w sposób następujący.

- **KROK 1:** Określenie parametrów wejściowych. Niezbędnym jest zdefiniowanie stacji początkowej i końcowej przewozu towaru, określenie jego rodzaju oraz wielkości masy do przewozu.
- **KROK 2:** Przy pomocy parametrów wejściowych oraz słownika „Stacje” (KROK 2a) możliwe jest dokonanie opisu zadania przewozowego (KROK 2b). Dokonując opisu zadania należy posłużyć się słownikiem „NHM” zawierającym znormalizowane rodzaje ładunków, aby rodzaj towaru został zapisany w postaci grup towarowych do przewozu (KROK 2c).

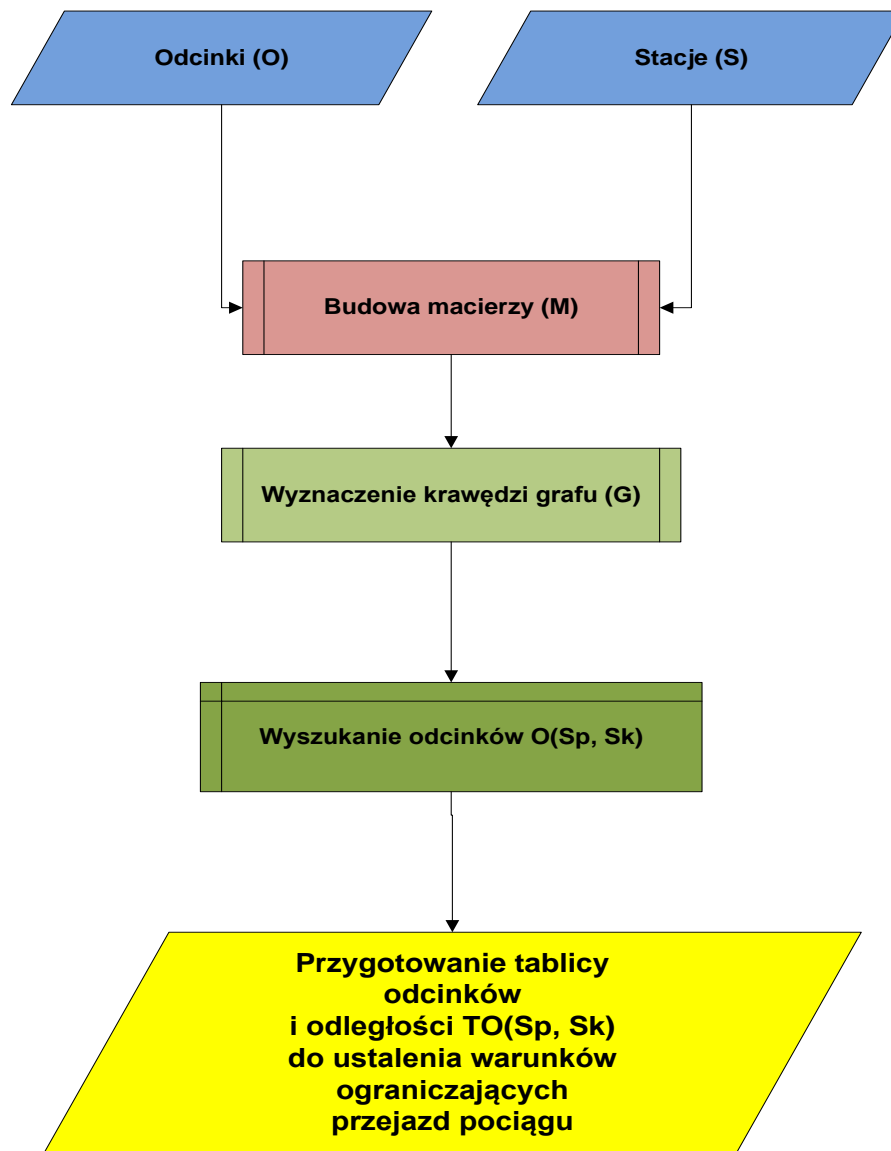


Rys. 7.1. Schemat blokowy metody doboru taboru do zadań przy ograniczonych zasobach

Źródło: opracowanie własne

- **KROK 3:** Identyfikacja danych, które są poszukiwane: m.in. lokomotywy, wagony, długość pociągu, liczba osi, ciężar, szybkość, procent masy hamującej.
- **KROK 4:** Odpowiedź na pytanie czy następuje pierwsze poszukiwanie rozwiązania. Jeśli **nie** to należy przejść do sekcji „Ograniczenia i warunki przejazdu pociągu”. Jeśli **tak**, to należy przejść do następnego kroku.
- **KROK 5:** Na podstawie słownika „Lokomotywy” oraz „Wagony” następuje dokonanie przydziału pojazdów do realizacji zdefiniowanego zadania przewozowego.
- **KROK 6:** Zdefiniowanie składu pociągu niezbędnego do realizacji przewozu poprzez określenie jego ciężaru, długości, liczby wagonów, liczby osi, maksymalnego nacisku osi na szynę i maksymalnej szybkości.
- **KROK 7:** Na podstawie określonych parametrów składu pociągu, a także na podstawie danych zawartych w słownikach „Stacje”, „Linie kolejowe” i „Odcinki kolejowe” następuje wyznaczenie optymalnej trasy dla realizacji przewozu poprzez określenie: maksymalnej szybkości, maksymalnego nacisku osi na szynę, rodzaju trakcji oraz parametrów skrajniowych.
- **KROK 8:** W efekcie prac otrzymujemy zbiór ograniczeń i warunków przejazdu pociągu. Ograniczenia powstają poprzez porównanie wyszukanych wartości z parametrami trasy pociągu (KROK 8a). W ramach warunków przewozu wyznaczany jest m.in. koszt taryfowy na podstawie słownika „Taryfa Towarowa”.
- **KROK 9:** Generowany jest raport wyników w postaci określenia składu pociągu, ograniczeń oraz kosztów przejazdu.
- **KROK 10:** Sprawdzenie poprawności otrzymanych wyników. Jeśli wyniki są prawidłowe to następuje koniec działania metody. Jeśli uzyskane wyniki nie są zadowalające to następuje zmiana założeń (KROK 10a). Korekty możliwe są poprzez zmianę lokomotywy, zmianę składu wagonów lub zmianę trasy (KROKI 10b, 10c i 10d). Po korekcie należy przejść do kroku 8 „Ograniczenia i warunki przejazdu pociągu”.

Definiując algorytm metody należy również wspomnieć o algorytmie wyznaczania najkrótszej odległości pomiędzy dwoma węzłami grafu (G). Algorytm ten został przedstawiony na rys. 7.2.



Rys. 7.2. Algorytm wyznaczania najkrótszej odległości pomiędzy dwoma węzłami grafu (G)

Źródło: opracowanie własne

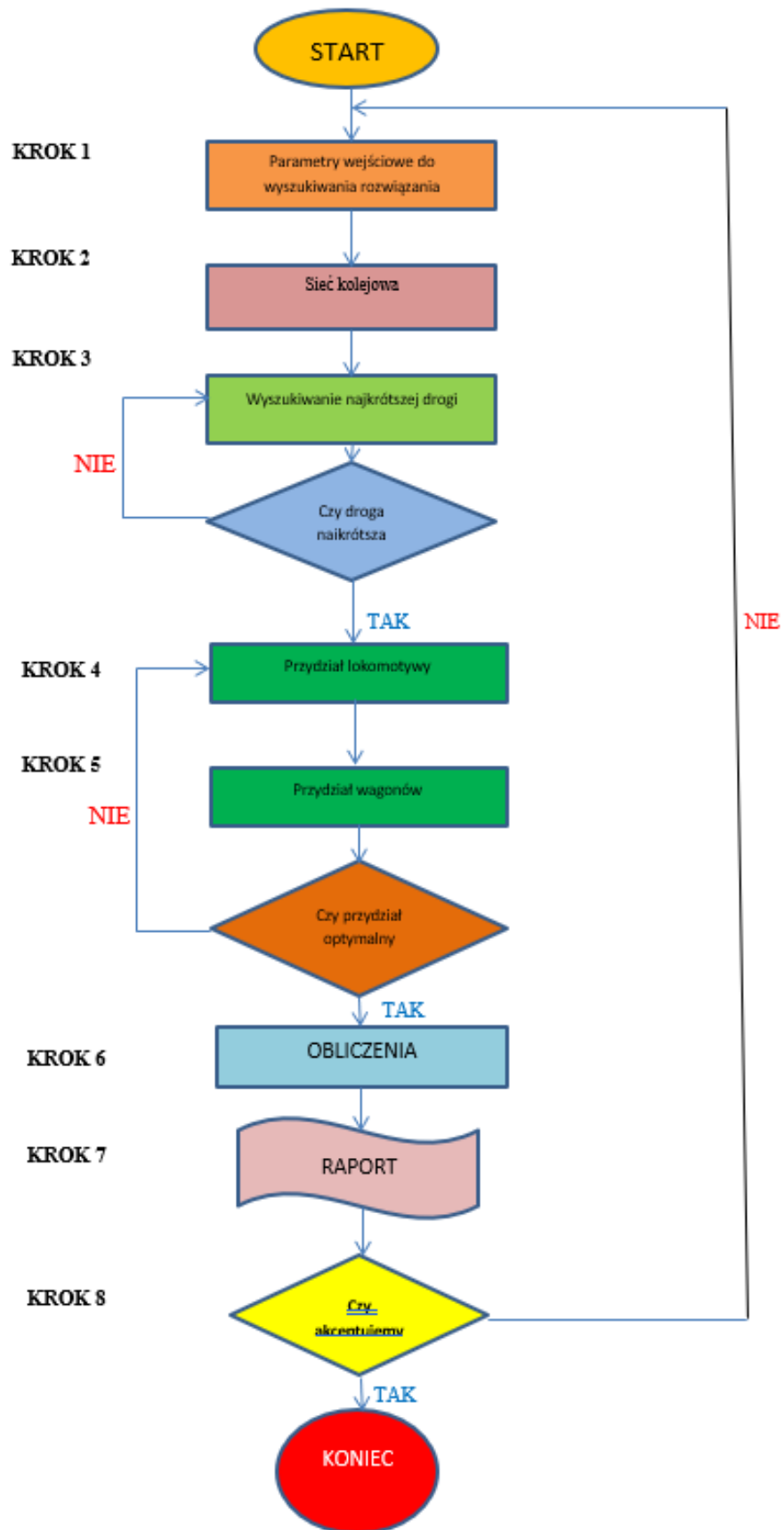
Na podstawie słowników „Odcinki” (charakteryzującego odcinki linii kolejowej) oraz „Stacje” (charakteryzującego stacje na sieci kolejowej) buduje się macierz odległości pomiędzy poszczególnymi stacjami (M). Następnie wyznacza się krawędzie grafu (G) oraz wyszukuje się odcinków  $O(Sp, Sk)$  wchodzących w skład trasy przewozu ładunku ze stacji początkowej ( $Sp$ ) do stacji końcowej ( $Sk$ ). Na podstawie danych ze słowników i ustalonego przebiegu przygotowuje się tablicę odcinków i odległości  $TO(Sp, Sk)$  do ustalenia warunków ograniczających przejazd pociągu.

## 7.2. Algorytm metody

Jednym z celów częściowych niniejszej rozprawy doktorskiej jest opracowanie algorytmu metody doboru taboru do zadań przy ograniczonych zasobach. Schemat ogólny algorytmu przedstawiono na rys. 7.3.

W algorytmie wyróżniono następujące kroki:

- **KROK 1:** wprowadzenie danych wejściowych, które są niezbędne do wyszukania ostatecznego rozwiązania – następuje identyfikacja zadania przewozowego dla którego nastąpi dobór taboru – lokomotyw i wagonów, wyszukanie najlepszej trasy oraz określenie warunków przewozu; następnie przechodzi się do **kroku 2**,
- **KROK 2:** zdefiniowanie i sparametryzowanie sieci kolejowej, która jest zlokalizowana na określonym terenie objętym procesem planowania doboru taboru do zadań, wyszukania najlepszej trasy oraz określenia warunków przewozu; następnie przechodzi się do **kroku 3**,
- **KROK 3:** wyszukanie najkrótszej drogi łączącej stację początkową ze stacją końcową, po której ma zostać zrealizowany transport ładunku określonego w ramach **kroku 1**; wyszukiwanie odbywa się na sieci zdefiniowanej i sparametryzowanej w ramach **kroku 2**,
- ze względu na to, że algorytm poszukuje wszystkich możliwych dróg przemieszczenia między stacją początkową i końcową, należy sprawdzić za każdym razem **czy wyszukany wynik jest mniejszy od dotychczas znalezionych**; jeśli **tak** to przechodzi się do **kroku 4**, w **przeciwnym wypadku** wraca się do **kroku 3** i poszukuje się kolejnej drogi,
- **KROK 4:** dokonuje się doboru serii pojazdu trakcyjnego (lokomotywy) i niezbędnej ich liczby do realizacji konkretnego zadania przewozowego, które zostało zdefiniowane w ramach **kroku 1**, należy pamiętać, że liczba pojazdów danej serii jest ograniczona; następnie przechodzi się do **kroku 5**,
- **KROK 5:** dokonuje się doboru serii wagonów towarowych oraz niezbędnej ich liczby do realizacji konkretnego zadania przewozowego, które zostało zdefiniowane w ramach **kroku 1**, należy pamiętać, że liczba pojazdów danej serii jest ograniczona; następnie przechodzi się do **kroku 6**,



Rys. 7.3. Algorytm metody doboru taboru do zadań przy ograniczonych zasobach

Źródło: opracowanie własne

- ze względu na to, że algorytm poszukuje wszystkich możliwych wariantów doboru taboru do realizacji konkretnego zadania przewozowego i zwraca najlepsze dopasowanie, należy sprawdzić czy **dopasowanie jest optymalne i możliwe do zaakceptowania przez użytkownika**; jeśli **tak** to przechodzi się do **kroku 6**, w **przeciwnym wypadku** wraca się do **kroku 4** i manualnie dokonuje się korekty przydziału lokomotywy i wagonów do realizacji konkretnego zadania przewozowego,
- **KROK 6:** dokonuje się szeregu obliczeń w celu określenia warunków przewozu dla zadania przewozowego zdefiniowanego w ramach **kroku 1**; następnie przechodzi się do **kroku 7**,
- **KROK 7:** generuje się raport dotyczący zaproponowanych w metodzie warunków przewozu, które są efektem **kroku 6**; następnie przechodzi się do **kroku 8**,
- **KROK 8:** następuje sprawdzenie zaproponowanych w metodzie warunków przewozu, które są efektem **kroku 6**; jeśli są one **do zaakceptowania** przez użytkownika to następuje **koniec pracy metody**, w **przeciwnym wypadku** należy cofnąć się do **kroku 1** i dokonać korekty sformułowania zadania przewozowego i/lub trasy przewozu i/lub doboru taboru do realizacji zadania.



## 8. IMPLEMENTACJA METODY W POSTACI APLIKACJI DST

### 8.1. Opis programu DST

Na potrzeby realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej opracowana została aplikacja DST – Dobór Środków Transportu. Celem działania niniejszego programu jest dokonanie doboru środków transportu kolejowego – odpowiedniej liczby lokomotyw konkretnych serii oraz odpowiedniej liczby wagonów towarowych konkretnych serii do realizacji konkretnego towarowego zadania przewozowego. Następnie wyznaczana jest trasa, po której ten przewóz ma zostać zrealizowany oraz określone są jego warunki handlowe. Interfejs aplikacji DST przedstawiono na rys. 8.1.



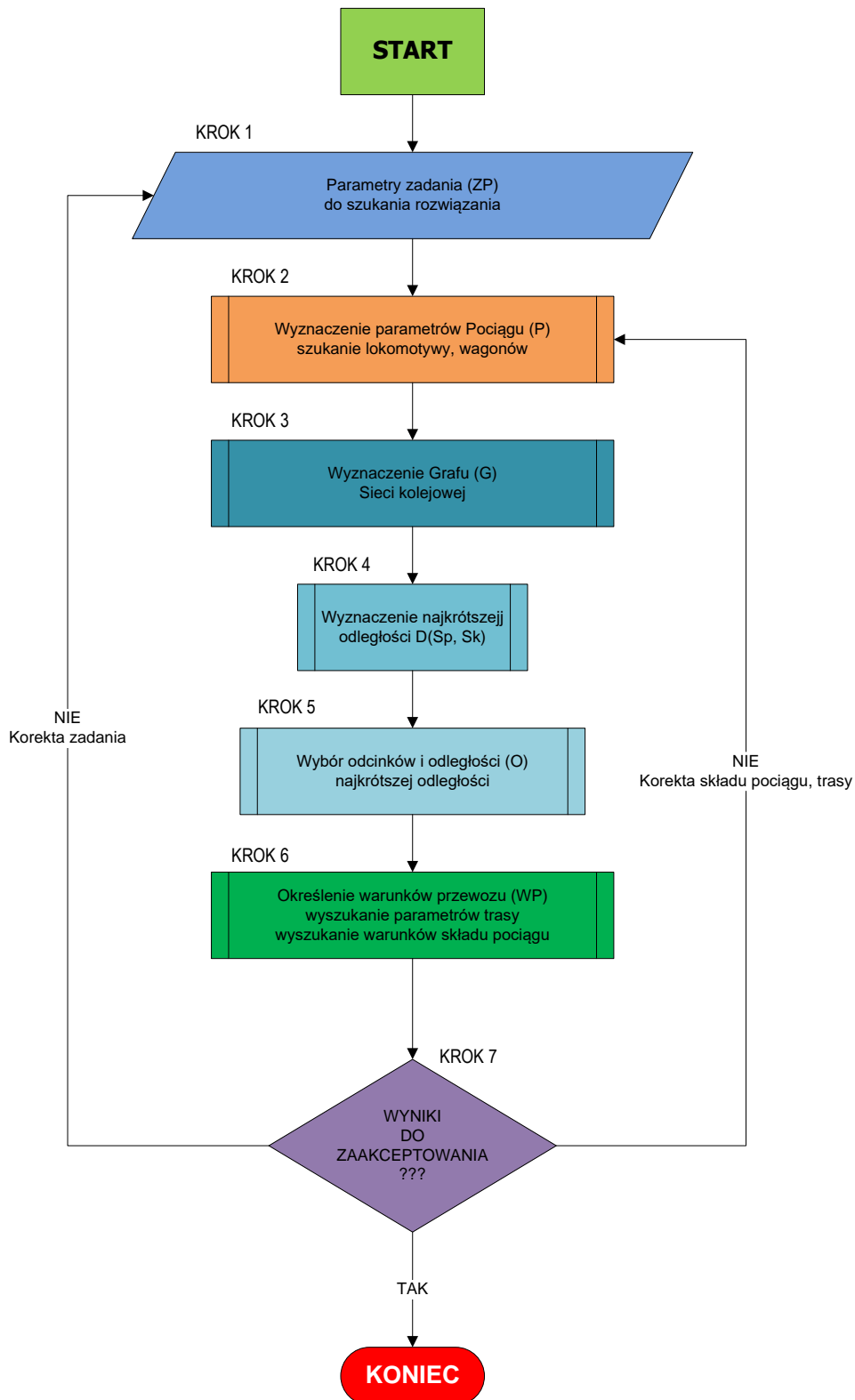
Rys. 8.1. Interfejs aplikacji DST

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST

Aplikacja DST jest implementacją metody, której schemat blokowy został przedstawiony na rys. 7.1. Została przygotowana w środowisku programowania Delphi z wykorzystaniem języka programowania Object Pascal. Język ten umożliwia tworzenie aplikacji, które są dedykowane dla systemu Windows. Jego prostota jest kolejną przyczyną wybrania go jako język programowania aplikacji przygotowanej na potrzeby niniejszej dysertacji. Do zalet należy zaliczyć także programowanie docelowego okna aplikacji poprzez przypisywanie określonym zachowaniom konkretnych akcji. Przedstawione powyżej zalety powodują, że przygotowana aplikacji jest dostępna do użytku praktycznie na każdym komputerze i do tego przez większość użytkowników.

## 8.2. Funkcjonalności aplikacji DST

Algorytm działania programu DST przedstawiono na rys. 8.2.



Rys. 8.2. Algorytm działania programu DST

Źródło: opracowanie własne

Użytkownik, który chce skorzystać z aplikacji DST, postępuje według następującego algorytmu:

- **KROK 1:** zdefiniowanie zadania przewozowego (ZP), dla którego będzie poszukiwane odpowiednie rozwiązanie,
- **KROK 2:** wyznaczenie parametrów pociągu (P) czyli dobór taboru do realizacji zadania – odpowiedniego typu i odpowiedniej liczby lokomotyw oraz wagonów towarowych,
- **KROK 3:** tworzony jest graf (G) sieci kolejowej, by móc znaleźć trasę przewozu ładunku,
- **KROK 4:** program poszukuje drogi w uprzednio zdefiniowanym grafie między stacją początkową przewozu ( $S_p$ ) i stacją końcową przewozu ( $S_k$ ) –  $D(S_p, S_k)$  według kryterium najmniejszej odległości (najkrótszej drogi w grafie),
- **KROK 5:** definiowane są odcinki linii kolejowych (O) wchodzące w skład najkrótszej drogi przewozu i na podstawie ich długości wyznaczana jest długość drogi,
- **KROK 6:** określa się warunki przewozu (WP) dotyczące parametrów trasy oraz parametrów składu pociągu,
- **KROK 7:** dokonuje się sprawdzenia otrzymanego rozwiązania; jeśli jest ono niesatysfakcjonujące można dokonać jego korekty na dwa sposoby – albo skorygować skład pociągu i/lub trasę przewozu albo skorygować parametry zadania przewozowego (włącznie z warunkami brzegowymi); jeśli użytkownik jest usatysfakcjonowany to następuje wydruk raportów i zakończenie pracy z programem.

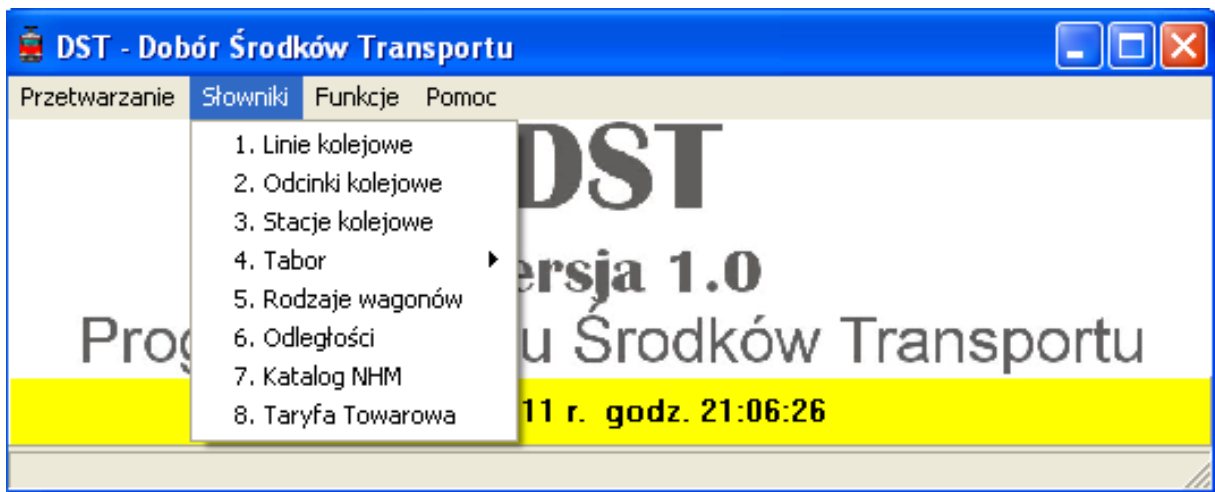
Podsumowując aplikacja DST ma trzy zasadnicze funkcjonalności:

- dokonywanie przydziału kolejowych pojazdów dedykowanych do ruchu towarowego: lokomotyw oraz wagonów do realizacji konkretnego zadania przewozowego – dzięki tej funkcjonalności aplikacja DST do obsługi konkretnego zadania przewozowego wyznacza konkretną liczbę lokomotyw konkretnej serii o odpowiednich parametrach trakcyjnych oraz konkretną liczbę wagonów dedykowanych do przewozu danego rodzaju ładunku,
- trasowanie pociągów na sieci kolejowej – dzięki tej funkcjonalności aplikacja DST pozwala na znalezienie najkrótszej drogi realizacji danego zadania przewozowego między stacją nadania oraz stacją odbioru przy uwzględnieniu szeregu warunków brzegowych, w tym uprzednio dokonanego przydziału pojazdów do jego realizacji,

- określenie warunków przewozu dla zdefiniowanego zadania przewozowego – dzięki tej funkcjonalności aplikacja DST pozwala na podsumowanie finalnego rozwiązania i przedstawienie kosztów jego realizacji (zarówno w zakresie kosztów taryfowych jak i kosztów dostępu do infrastruktury).

### 8.3. Dane wejściowe do programu DST o charakterze stałym

Prawidłowa praca programu DST, dzięki której możliwe jest uzyskanie odpowiedniego rozwiązania, zależy od wprowadzenia szeregu danych wejściowych. Dane te w programie zostały umieszczone w postaci słowników. Ich listę przedstawiono na rys. 8.3.



Rys. 8.3. Słowniki z danymi wejściowymi

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST

Słowniki zawierają podstawowe dane niezbędne do uzyskania warunków przewozu dla zdefiniowanego zadania przewozowego towarów. Są podstawą do doboru składu pociągu oraz porównania wymagań z przydzieloną trasą i możliwością realizacji zadania. Ze względu na dużą ilość danych niektóre słowniki zostały ograniczone co do liczby zapisów oraz wartości charakterystycznych. Szczegółowe omówienie poszczególnych słowników zawarto w załączniku 1.

Oprócz wypełnienia zawartości słowników niezbędne jest także zdefiniowanie pozostałych warunków brzegowych, które mają wpływ na pracę programu i realizację zadania przewozowego. Są to:

- odległość obsługi trakcyjnej [km],
- liczba lokomotyw, która powinna zostać zadysponowana do przewozu,
- maksymalny czas pracy drużyny trakcyjnej [h],
- limity czasu potrzebne na przyjęcie i zdanie lokomotywy przez pracowników drużyn trakcyjnych [min.].

Ograniczenia są uwzględniane przy automatycznym doborze lokomotyw do pociągu oraz pozwala wskazać potrzebny czas przyjęcia i zdania lokomotywy. Przedstawiono je na rys. 8.4.

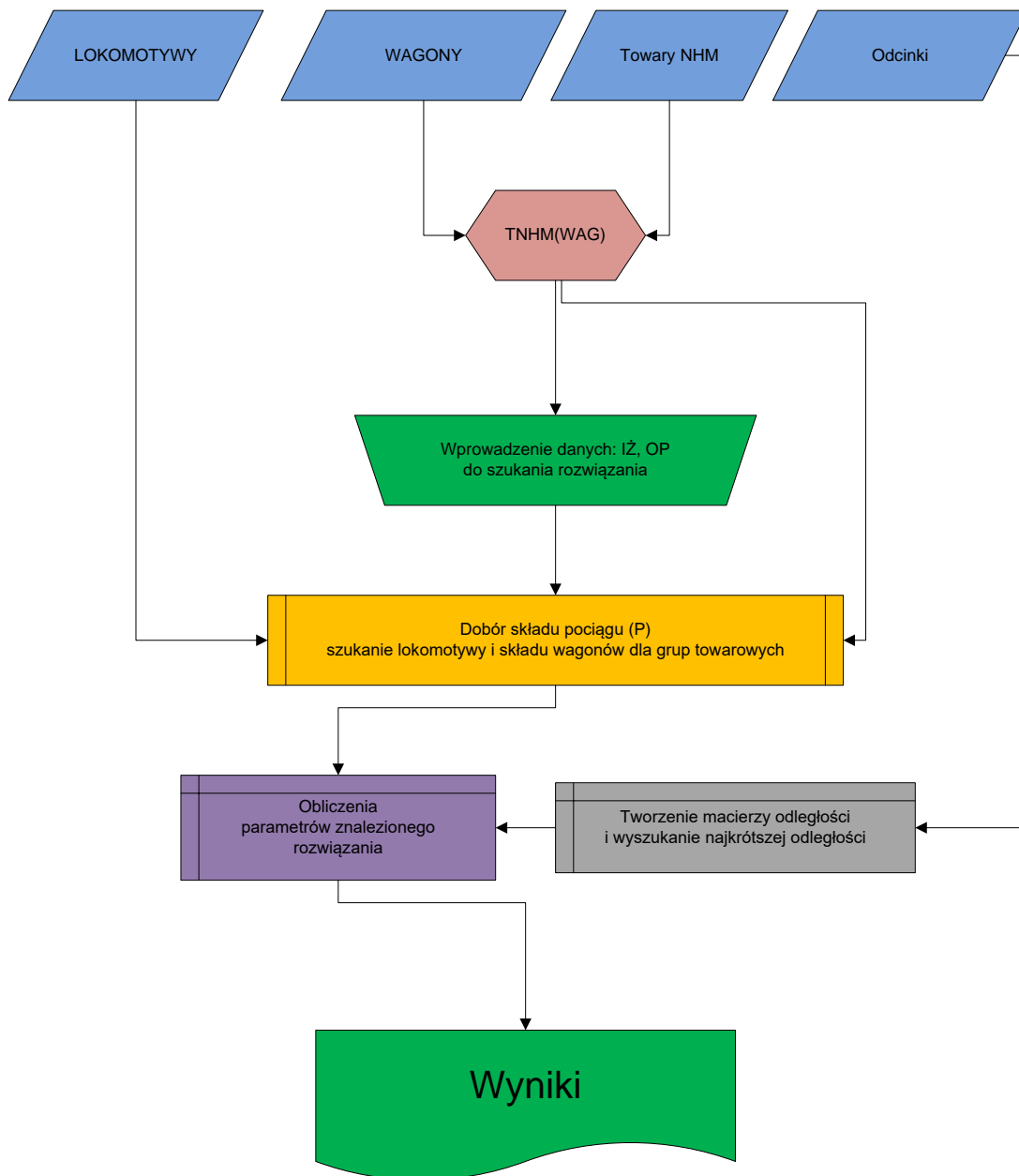
Ograniczenia		Limity czasu przyjęcia/zdania lokomotywy			
Odległość obsługi	100 km	Elaktryczna	15 min	15 min	
Liczba lokomotyw	1	Spalinowa	30 min	45 min	
Czas pracy drużyny	12 godz.	Parowa	60 min	60 min	

Rys. 8.4. Ograniczenia dodatkowe programu i zadania przewozowego

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST

Po dokonaniu zdefiniowania słowników i dodatkowych ograniczeń dotyczących pracy programu oraz zadania przewozowego przedstawiony zostanie schemat przepływu danych – patrz rys. 8.5.

Do danych dotyczących wagonów towarowych (WAGONY) dołączane są informacje dotyczące obsługiwanych przez nie towarów z listy NHM (Towary NHM). W ten sposób powstaje przyporządkowanie TNHM(WAG). Następnie wprowadzane są dane IŻ oraz OP, które są niezbędne do szukania rozwiązania. Na podstawie w/w danych oraz danych dotyczących lokomotyw (LOKOMOTYWY) następuje dobór składu pociągu (P). Na podstawie danych o odcinkach linii kolejowych (Odcinki) generowana jest macierz odległości oraz wyszukiwana jest najkrótsza odległość przewozu. Na tej podstawie obliczane są warunki przewozu i generowane są wyniki.



Rys. 8.5. Schemat przepływu danych

Źródło: opracowanie własne

## 8.4. Funkcjonowanie programu DST

Prace z programem DST należy rozpocząć od określenia zadania przewozu towarów (ZPT). Okno wprowadzania danych przedstawiono na rys. 8.6.

ZAMOWIENIE	NAZWA	DATA_OD	DATA_DO	BLOKADA
2222	Zadanie testowe	21-10-2010		False
3333	test zadania	21-10-2010		False

**Szczegóły zadania**

Data utworzenia : 21-10-2010 Czyść LOG zadania

Data zamknięcia :  **Blokada** Zamówienie 2222

Nazwa:

OPIS:

TONAŻ:  RODZAJ ŁADUNKU:  ODLEGŁOŚĆ: 87

Stacja Początkowa:  ŁAWA GŁÓWNA (STACJA WĘZŁOWA)

Stacja Końcowa:  GUTKOWO (STACJA WĘZŁOWA)

Rys. 8.6. Zadanie przewozu towarów – okno wprowadzania

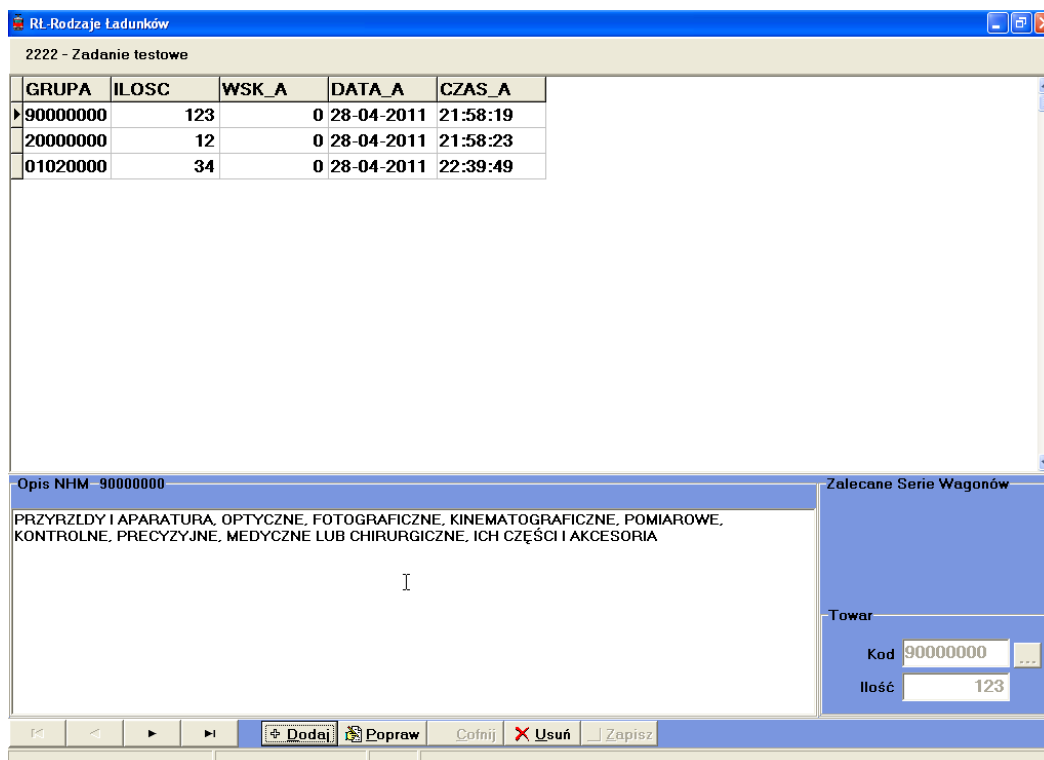
Źródło: opracowanie własne

Opis zadania towarowego składa się z:

- data utworzenia zadania,
- numer zamówienia,
- nazwa zadania,
- opis zadania,
- tonaż,
- stacja początkowa przewozu,
- stacja końcowa przewozu,
- rodzaj ładunku.

Należy podkreślić, że głównym parametrem wymagań jest wskazanie wielkości masy do przewozu oraz rodzaj masy towarowej – według katalogu NHM. W zależności od wprowadzonych wartości poszczególnych parametrów algorytm będzie w sposób automatyczny przydzielać środki transportu. Podczas edycji elementy dobrane w sposób automatyczny będą mogły być korygowane przez operatora.

Jak już wspomniano istotnym elementem jest wskazanie rodzaju ładunku z wykorzystaniem katalogu NHM oraz jego ilości wyrażonej w tonach. Okno parametryzowania ładunku przedstawiono na rys. 8.7.



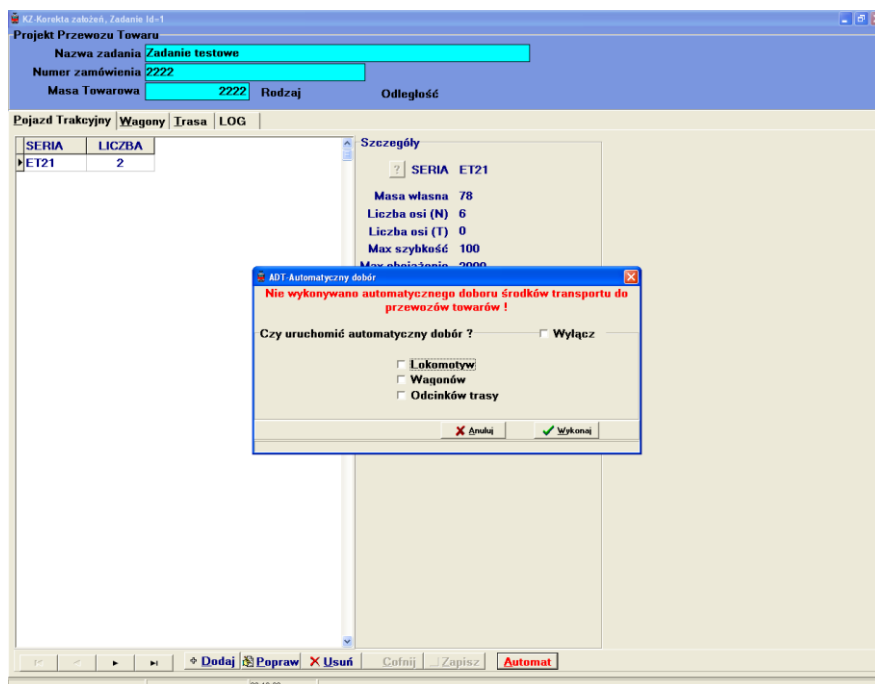
Rys. 8.7. Wybór grup towarowych

Źródło: opracowanie własne

Wybierając rodzaje i ilości masy towarowej do przewozu na podstawie sugerowanych serii wagonów algorytm będzie w stanie dobrać odpowiednie pojazdy.

Po wyborze uprzednio zdefiniowanego zadania do dalszych prac użytkownik może wyszukać rozwiązania na dwa sposoby. Pierwszym sposobem jest ręczny dobór lokomotywy, wagonów oraz odcinków trasy do realizacji zadania. Na tej podstawie wyznaczony zostanie koszt realizacji zadania przewozowego na podstawie taryfy towarowej oraz wysokość opłaty podstawowej za dostęp do infrastruktury. Pojawia się dodatkowy przycisk: „Automat”, który pozwala na skorzystanie z funkcjonalności programu z wykorzystaniem algorytmów optymalizacyjnych. Użycie tego przycisku umożliwi wywołanie dodatkowego okna do wyboru procedur automatycznych doborów. Dobory dotyczą lokomotywy, wagonów oraz odcinków trasy na podstawie zdefiniowanych warunków zadania. Okno uruchomienia algorytmów optymalizacyjnych przedstawiono na rys. 8.8.

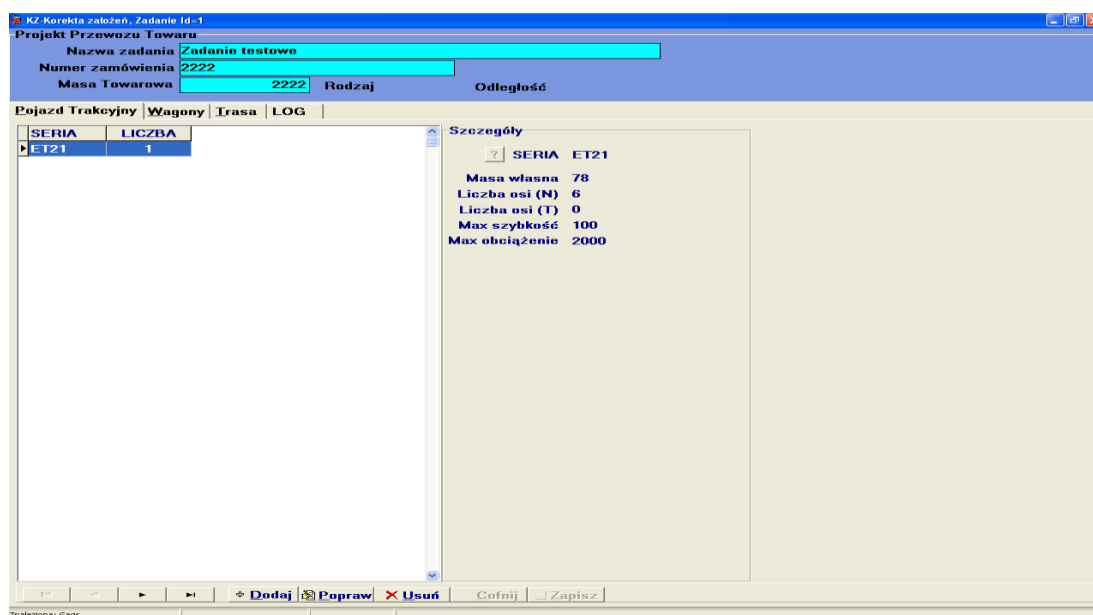




Rys. 8.8. Okno uruchomienia algorytmów optymalizacyjnych  
 Źródło: opracowanie własne

## 8.5. Efekty pracy aplikacji DST

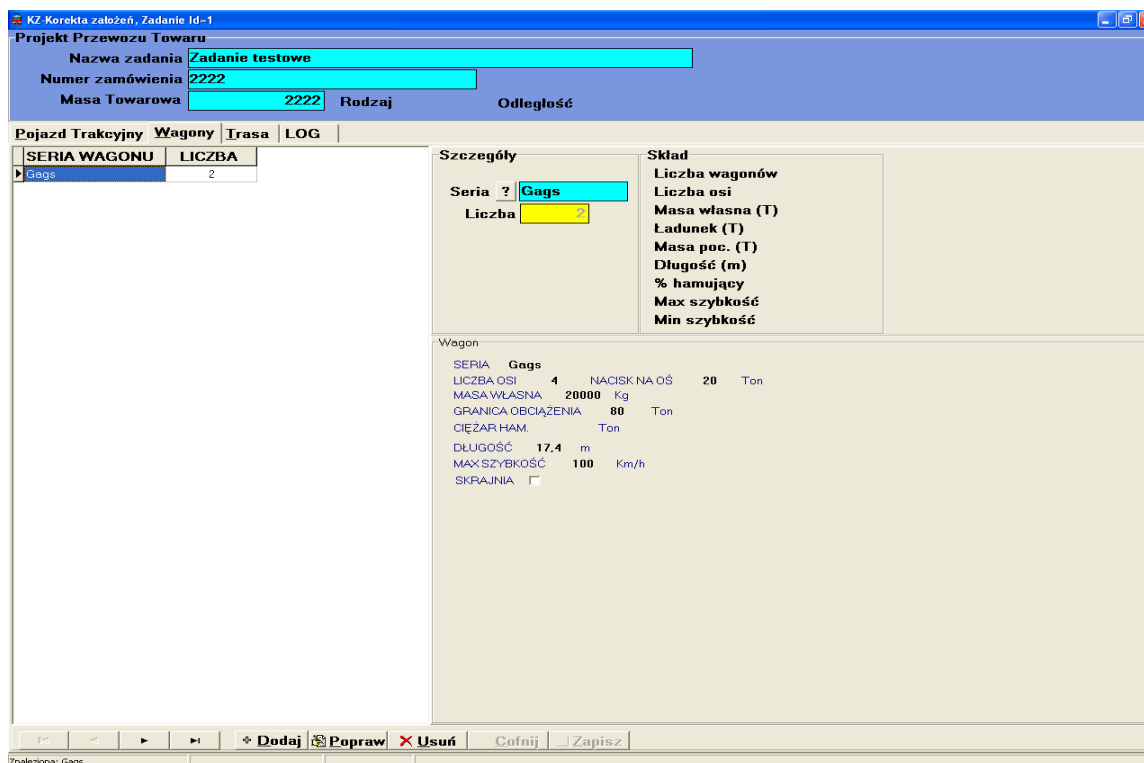
Efekty pracy algorytmu optymalizacyjnego przedstawiono na następujących rysunkach. Przydzielony do realizacji przewozu pojazd trakcyjny został przedstawiony na rys. 8.9.



Rys. 8.9. Przydzielone pojazdy trakcyjne do realizacji przewozu  
 Źródło: opracowanie własne

W zakresie pojazdu trakcyjnego jako rozwiązanie otrzymujemy wskazanie konkretnej serii zadysponowanego pojazdu trakcyjnego wraz z liczbą sztuk niezbędnych do realizacji zadania. Dodatkowo prezentowane są szczegóły dotyczące przydzielonej lokomotywy. Uzyskany wynik można poprawić lub usunąć.

Przydzielone do realizacji przewozu wagony towarowe zostały przedstawione na rys. 8.10.



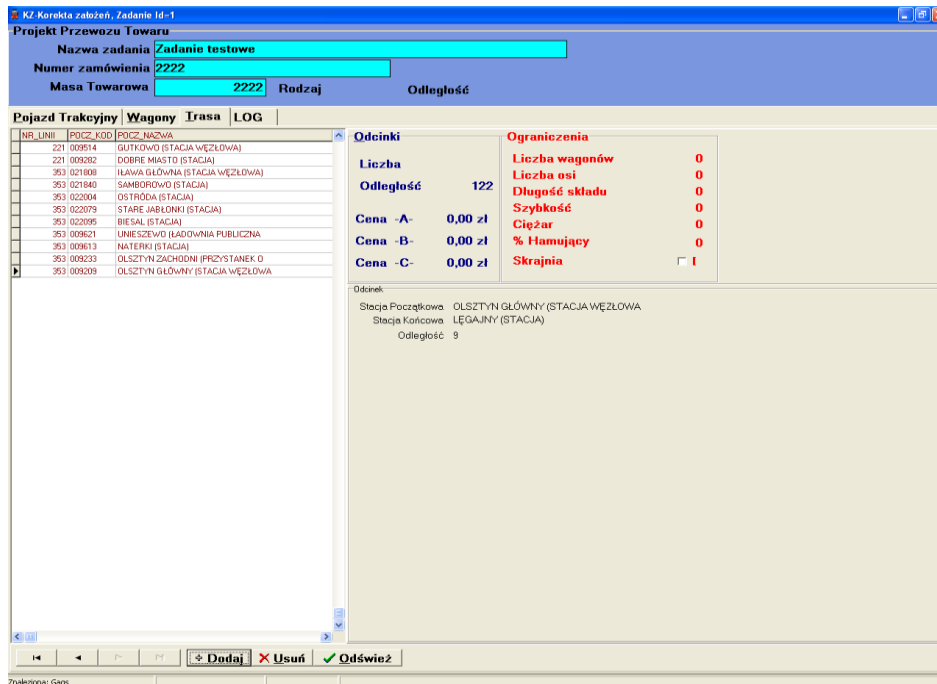
Rys. 8.10. Przydzielone wagony towarowe do realizacji przewozu

Źródło: opracowanie własne

W zakresie wagonów towarowych jako rozwiązanie otrzymujemy wskazanie konkretnej zadysponowanej serii wraz z liczbą sztuk niezbędnych do realizacji zadania. Dodatkowo prezentowane są szczegóły dotyczące przydzielonych wagonów i parametry składu pociągu. Uzyskany wynik można poprawić lub usunąć.

Przydzielone do realizacji przewozu odcinki linii kolejowej (trasa) zostały przedstawione na rys. 8.11.

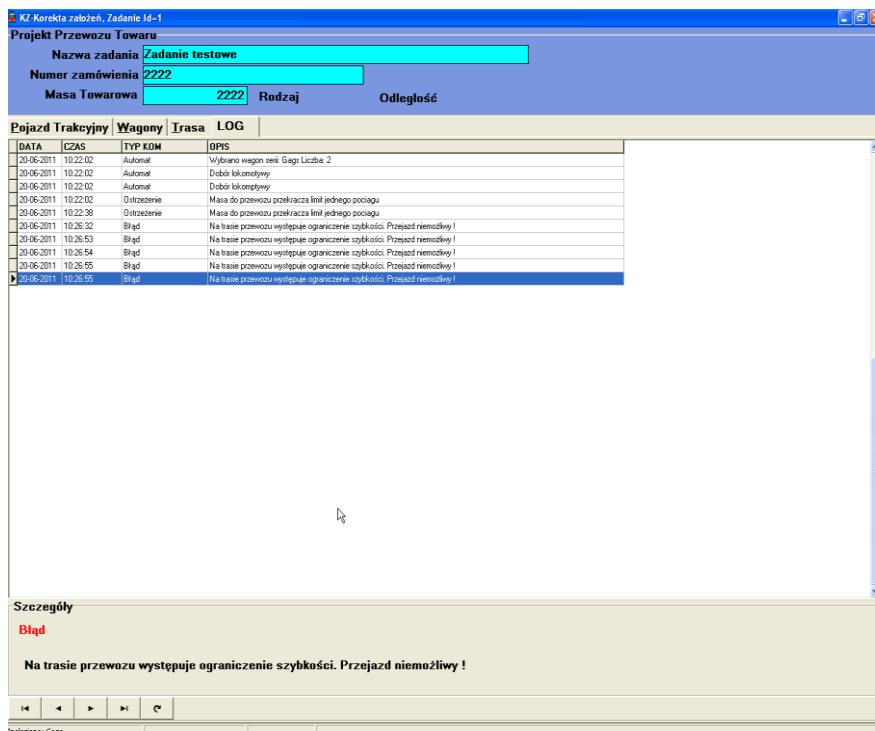
W zakresie odcinków linii kolejowych (trasy) jako rozwiązanie otrzymujemy ich wykaz, liczbę, odległość i koszt dostępu do infrastruktury. Ponadto otrzymujemy wykaz ograniczeń dotyczących trasy przejazdu. Użytkownik może dokonywać zmian w trasie przewozu, jednak wtedy nie będzie już mógł skorzystać z narzędzi optymalizacyjnych poszukujących minimalnej odległości. W czasie edycji danych następuje automatyczna analiza warunków i ograniczeń. W przypadku gdy na którymś z odcinków linii kolejowej obowiązuje maksymalna szybkość równa 0 km/h, oznacza to, że odcinek jest nieprzejezdny.



Rys. 8.11. Przydzielona trasa do realizacji przewozu

Źródło: opracowanie własne

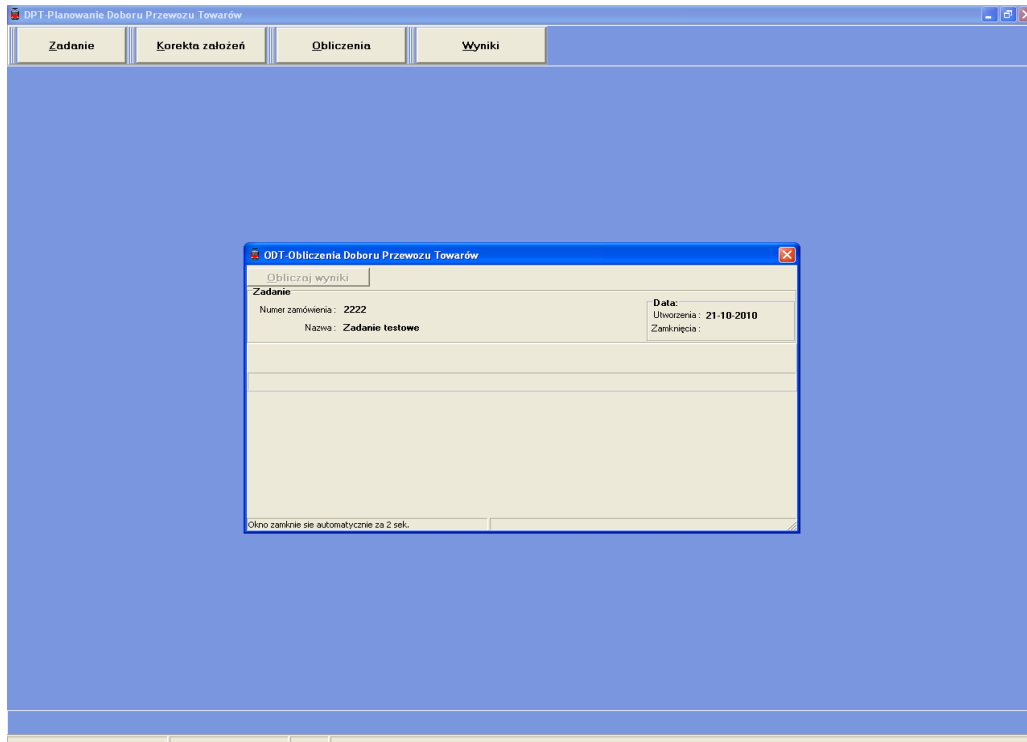
Aplikacja DST prowadzi rejestr wykonywanych operacji w postaci loga. Log przebiegu zmian jest prowadzony w sposób automatyczny przez wywoływane procedury i funkcje. Ich zadaniem jest dokumentowanie wykonanych operacji oraz związanych z tym problemów. Przedstawiono go na rys. 8.12.



Rys. 8.12. Log operacji dla realizacji przewozu

Źródło: opracowanie własne

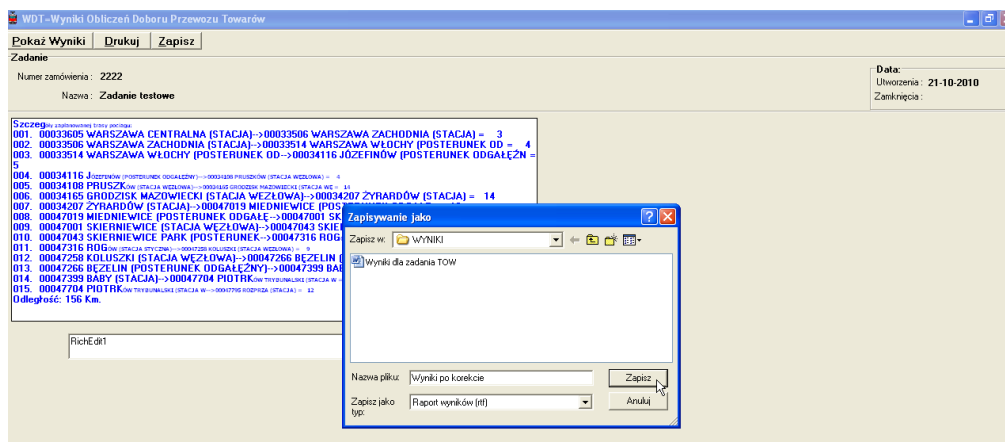
Po zakończonej edycji i korektach związanych ze składem pociągowym konieczne jest wykonanie obliczeń, które zweryfikują poprawność wprowadzonych danych oraz uwzględnią ograniczenia związane z przejazdem pociągu. Zależnie od wielkości składu pociągowego oraz odcinków kolejowych trasy pociągu obliczenia mogą trwać dłuższą chwilę. Moduł obliczania wyników przedstawiono na rys. 8.13.



Rys. 8.13. Obliczanie wyników

Źródło: opracowanie własne

Ostatnim elementem jest prezentacja i zapis wyników. Zaprezentowane na ekranie wyniki obliczenia mogą być wydrukowane lub zapisane do pliku tekstowego. Okno wyników przedstawiono na rys. 8.14.



Rys. 8.14. Zapis wyników obliczeń

Źródło: opracowanie własne

## **9. WERYFIKACJA METODY DOBORU TABORU DO ZADAŃ NA DANYCH RZECZYWISTYCH Z ZASTOSOWANIEM APLIKACJI DST**

### **9.1. Uwagi ogólne**

Weryfikację poprawności metody doboru taboru do zadań przy ograniczonych zasobach dla wybranego obszaru sieci kolejowej przeprowadzono dla jednego z podmiotów kolejowych, który realizuje na niej swoją działalność. Przedmiotem analizy było porównanie istniejącego podejścia do doboru taboru do zadań z możliwościami programu DST.

W kolejnych punktach opisane zostały rzeczywiste dane wejściowe do programu tj.:

- parametry linii kolejowych,
- parametry odcinków kolejowych,
- parametry stacji kolejowych,
- parametry taboru (lokomotyw i wagonów),
- katalog NHM,
- macierz odległości między stacjami kolejowymi znajdującymi się na analizowanym obszarze sieci,
- parametry taryfy towarowej wybranego podmiotu kolejowego.

Efektom przeprowadzonych symulacji jest:

- dokonanie przydziału kolejowych pojazdów dedykowanych do ruchu towarowego: lokomotyw oraz wagonów do realizacji zdefiniowanego zadania przewozowego,
- trasowanie uruchomionego w związku z realizacją zdefiniowanego zadania przewozowego pociągu po sieci kolejowej,
- określenie warunków przewozu dla zdefiniowanego zadania przewozowego.

Analizę przeprowadzono dla dwóch różnych zadań przewozowych. Dane podawane w kolejnych punktach zostały zmienione po to, aby sprawdzić czy metoda jest skuteczna dla dowolnie sformułowanych zadań. Weryfikacja polegała na sprawdzeniu rzeczywistego stopnia zrealizowania zadań przewozowych w zakresie:

- doboru odpowiedniej serii i liczby pojazdów trakcyjnych, które będą pozwalać na zrealizowanie zdefiniowanego zadania przewozowego,
- doboru odpowiedniej serii i liczby wagonów towarowych, które będą pozwalać na zrealizowanie zdefiniowanego zadania przewozowego,

- wyznaczenia trasy, po której zrealizowane zostanie zdefiniowane zadanie przewozowe,
- określenie warunków przewozu, według których zrealizowane zostanie zdefiniowane zadanie przewozowe.

Program w obu przypadkach wskazał rozwiązania, które zostałyby wdrożone bez jego wykorzystania. Zatem należy wskazać, że metoda została zaimplementowana we właściwy sposób.

Wśród danych, które są niezbędne do ustalenia rozwiązania, wyróżnić należy:

- dane dotyczące sieci kolejowej i ich parametrów w zakresie linii kolejowych odcinków kolejowych oraz stacji kolejowych,
- dane dotyczące taboru, w tym ilościan lokomotyw i wagonów dostępny w momencie rozpoczęcia pracy programu,
- katalog ładunków,
- odległości pomiędzy stacjami,
- taryfę towarową.

Zdefiniowanie zadania przewozowego, które będzie przedmiotem przewozu polega na ustaleniu:

- przedmiotu przewozu,
- stacji początku przewozu,
- stacji końcowej przewozu,
- masy przedmiotu przewozu.

W kolejnych podrozdziałach szerzej zostaną opisane kluczowe dane wykorzystane do weryfikacji metody.

## **9.2. Opis danych wprowadzonych do aplikacji DST**

### **9.2.1. Ustalenie struktury sieci kolejowej**

Prace nad doбором taboru do zadań należy rozpocząć od scharakteryzowania danych. Pierwsza grupa danych dotyczy sieci kolejowej i jej parametrów (patrz podrozdział 6.3.1 i 6.3.2). Należy zatem zdefiniować:

- zbiór punktów eksploatacyjnych **PE**,

- zbiór odcinków linii kolejowych **OL**,
- zbiór numerów linii kolejowych **NRL**.

Każdy z punktów eksploatacyjnych  $pe$  ( $pe \in PE$ ) powinien zostać scharakteryzowany następującymi danymi:

- $ks(pe)$  – kod punktu eksploatacyjnego,
- $ows(pe)$  – maksymalna liczba wagonów,
- $oos(pe)$  – maksymalna liczba osi wagonów,
- $oops(pe)$  – maksymalna liczby osi pociągu,
- $odps(pe)$  – maksymalna długość pociągu.

Dane dla przykładowego punktu eksploatacyjnego są następujące:

- $pe = 33605$  – analizowanym punktem eksploatacyjnym jest stacja **Warszawa Centr.**,
- $ks(33605)$  – kod punktu eksploatacyjnego – **33605**,
- $ows(33605)$  – maksymalna liczba wagonów – **15 wagonów**,
- $oos(33605)$  – maksymalna liczba osi wagonów – **60 osi**,
- $oops(33605)$  – maksymalna liczby osi pociągu – **72 osie**,
- $odps(33605)$  – maksymalna długość pociągu – **500 m**.

Każdy z odcinków linii kolejowych  $nol$  ( $nol \in NOL$ ) powinien zostać scharakteryzowany następującymi danymi:

- $okm(nol)$  – długość odcinka,
- $ov(nol)$  – maksymalna dopuszczalna prędkość,
- $og(nol)$  – maksymalny dopuszczalny nacisk na oś,
- $op(nol)$  – możliwość poruszania się pociągów z przekroczoną skrajnią,
- $owo(nol)$  – maksymalna liczba wagonów,
- $ooo(nol)$  – maksymalna liczba osi,
- $odpo(nol)$  – maksymalna długość pociągu,
- $ot(nol)$  – rodzaj trakcji,
- $pmh(nol)$  – wymagany procent masy hamującej.

Dane dla przykładowego odcinka linii kolejowej są następujące:

- $nol = 5811$  – analizowanym odcinkiem linii kolejowej jest odcinek linii nr 1 **Warszawa Centralna – Warszawa Zachodnia**,
- $okm(5811)$  – długość odcinka – **3,082 km**,
- $ov(5811)$  – maksymalna dopuszczalna prędkość – **60 km/h**,
- $og(5811)$  – maksymalny dopuszczalny nacisk na oś – **221 kN**,

- $op(5811)$  – możliwość poruszania się pociągów z przekroczoną skrajnią – **NIE**,
- $owo(5811)$  – maksymalna liczba wagonów – **15 wagonów**,
- $ooo(5811)$  – maksymalna liczba osi – **72 osie**,
- $odpo(5811)$  – maksymalna długość pociągu – **500 m**,
- $ot(5811)$  – rodzaj trakcji – **ELEKTRYCZNA**,
- $pmh(5811)$  – wymagany procent masy hamującej – **35%**.

### 9.2.2. Dane dotyczące zadań przewozowych

Aby dokonać doboru taboru uprzednio należy zdefiniować zadania przewozowe do zrealizowania i odpowiednio sparametryzować (patrz podrozdział 6.3.3). Należy zatem zdefiniować:

- zbiór zadań przewozowych **ZPD**,
- zbiór będący katalogiem towarów **NHM**.

Każde zadanie przewozowe  $zpd$  ( $zpd \in \mathbf{ZPD}$ ) charakteryzowane jest poprzez następujące parametry:

- $tow(zpd, nhm)$  – przedmiot przewozu dla zadania przewozowego,
- $sp(zpd, pe)$  – zadanie przewozowe rozpoczyna się w punkcie eksploatacyjnym zwanym punktem nadania,
- $sk(zpd, pe)$  – zadanie przewozowe kończy się w punkcie eksploatacyjnym zwanym punktem odbioru,
- $zp(zpd)$  – wielkość potrzeby przewozowej,
- $ps(zpd)$  – potrzeba przewozowa jest przesyłką o przekroczonej skrajni.

W pierwszym przypadku do programu DST zostały wprowadzone następujące dane wej.:

- numer zadania przewozowego ( $zpd$ ): **0100**,
- przedmiot przewozu ( $tow(0100, 68022900)$ ): **kamienie na budowę linii kolejowej**,
- stacja początku przewozu ( $sp(0100, 022475)$ ): **Gralewo**,
- stacja końcowa przewozu ( $sk(0100, 058107)$ ): **Wrocław Brochów**,
- masa przedmiotu przewozu ( $zp(0100)$ ): **2000 ton**,
- przesyłka nie jest przesyłką o przekroczonej skrajni:  $ps(0100) = 0$ .

Okno programu DST z wprowadzonymi danymi wejściowymi do obliczeń przedstawiono na rys. 9.1.



ZAMOWIENIE	NAZWA	DATA_OD	DATA_DO	BLOKADA
0100	Przewóz kamienia	23-02-2012		False

**Szczegóły zadania**

Data utworzenia : 23-02-2012  **Blokada** Zamówienie: 0100

Nazwa: Przewóz kamienia

OPIS: Przewóz kamienia na budowę linii kolejowej.

TONAŻ: 2000 RODZAJ ŁADUNKU: ?

Stacja Początkowa: 22475 **GBALEWO (STACJA)**

Stacja Końcowa: 58107 **WROCLAW BROCHÓW (STACJA WĘZŁÓW)**

Rys. 9.1. Okno programu DST z wprowadzonymi danymi wejściowymi – przypadek 1

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST

W drugim przypadku do programu DST zostały wprowadzone następujące dane wejściowe:

- numer zadania przewozowego (*zpd*): **0110**,
- przedmiot przewozu (*tow*(0110,94010000)): **meble w paczkach**,
- stacja początku przewozu (*sp*(0110,009209)): **Olsztyn Główny**,
- stacja końcowa przewozu (*sk*(0110,069708)): **Gliwice**,
- masa przedmiotu przewozu (*zp*(0110)): **1000 ton**,
- przesyłka nie jest przesyłką o przekroczonej skrajni:  $ps(0110) = 0$ .

Okno programu DST z wprowadzonymi danymi wejściowymi do obliczeń przedstawiono na rys. 9.2.

### 9.2.3. Dane dotyczące taboru

Dokonanie doboru taboru do realizacji konkretnej potrzeby przewozowej wymaga zidentyfikowania taboru wraz z jego charakterystykami (patrz podrozdział 6.3.4). Należy zatem zdefiniować:

- zbiór lokomotyw **LOK**,
- zbiór wagonów **WAG**.

ZPT-Zadanie Przewozu Towarów

ZAMOWIENIE	NAZWA	DATA_OD	DATA_DO	BLOKADA
0010	Przewóz węgla	21-10-2010		False
0011	Przewóz kwasu siarkowego	21-10-2010		False
0100	Przewóz kamienia	23-02-2012		False
0110	Przewóz mebli	24-02-2012		False

---

Szczegóły zadania

Data utworzenia: 24-02-2012 Czyść LOG zadania

Data zamknięcia: Blokada Zamówienie: 0110

Nazwa: Przewóz mebli

OPIS: Przewóz mebli w paczkach

TONAŻ: 1000 RODZAJ ŁADUNKU: ?

Stacja Początkowa: ? 9209 OLSZTYN (STACJA WĘZŁOWA)

Stacja Końcowa: ? 69708 OLNICE (STACJA WĘZŁOWA)

Rys. 9.2. Okno programu DST z wprowadzonymi danymi wejściowymi – przypadek 2

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST

Każda lokomotywa  $lok$  ( $lok \in LOK$ ) charakteryzowana jest poprzez następujące parametry:

- $ls(lok)$  – seria lokomotywy konkretnego rodzaju trakcji,
- $lm(lok)$  – uciąż lokomotywy,
- $lo(lok)$  – liczba osi lokomotywy,
- $ld(lok)$  – długość lokomotywy,
- $lc(lok)$  – ciężar własny lokomotywy,
- $lv(lok)$  – prędkość maksymalna lokomotywy,
- $lt(lok)$  – rodzaj trakcji lokomotywy,
- $ll(lok)$  – liczebność danego rodzaju lokomotywy,
- $hl(lok)$  – procent ciężaru hamującego lokomotywy.

Dane dla przykładowej serii lokomotyw są następujące:

- $lok = 8$  – analizowaną serią lokomotyw jest pojazd **ET22**,
- $ls(8)$  – seria lokomotywy konkretnego rodzaju trakcji – **ET22**,
- $lm(8)$  – uciąż lokomotywy – **2000 ton**,
- $lo(8)$  – liczba osi lokomotywy – **6 osi**,
- $ld(8)$  – długość lokomotywy – **19 m**,

- $lc(8)$  – ciężar własny lokomotywy – **88 ton**,
- $lv(8)$  – prędkość maksymalna lokomotywy – **120 km/h**,
- $lt(8)$  – rodzaj trakcji lokomotywy – **ELEKTRYCZNA**,
- $ll(8)$  – liczebność danego rodzaju lokomotywy – **5 lokomotyw**,
- $hl(8)$  – procent ciężaru hamującego lokomotywy – **150 %**.

Każdy wagon  $wag$  ( $wag \in \mathbf{WAG}$ ) charakteryzowany jest poprzez następujące parametry:

- $ws(wag)$  – seria wagonu,
- $wo(wag)$  – liczba osi wagonu,
- $wd(wag)$  – długość wagonu,
- $wc(wag)$  – ciężar własny wagonu,
- $wl(wag)$  – ładowność wagonu,
- $wv(wag)$  – prędkość maksymalna wagonu,
- $hw(wag)$  – procent ciężaru hamującego wagonu,
- $wnhm(ws(wag),nhm)$  – przyporządkowanie wagonu konkretnej serii do poszczególnych rodzajów towarów.

Dane dla przykładowej serii wagonów są następujące:

- $wag = 1$  – analizowaną serią wagonów jest seria **Eamos** (wagon węglarka budowy normalnej),
- $ws(1)$  – seria wagonu – **Eamos**,
- $wo(1)$  – liczba osi wagonu – **4**,
- $wd(1)$  – długość wagonu – **12,24 m**,
- $wc(1)$  – ciężar własny wagonu – **21,5 t**,
- $wl(1)$  – ładowność wagonu – **60 t**,
- $wv(1)$  – prędkość maksymalna wagonu – **80 km/h**,
- $hw(1)$  – procent ciężaru hamującego wagonu – **150%**,
- $wnhm(ws(1),nhm)$  – przyporządkowanie wagonu konkretnej serii do poszczególnych rodzajów towarów – **wiele  $nhm$** .

#### 9.2.4. Dane dotyczące taryfy towarowej

Do ustalenia konkretnych warunków przewozu niezbędne jest określenie danych dotyczących taryfy towarowej (patrz podrozdział 6.3.5). Należy zatem zdefiniować:

- $op(zpd,nol)$  – wysokość opłaty podstawowej dla zadania przewozowego i dla odcinka,

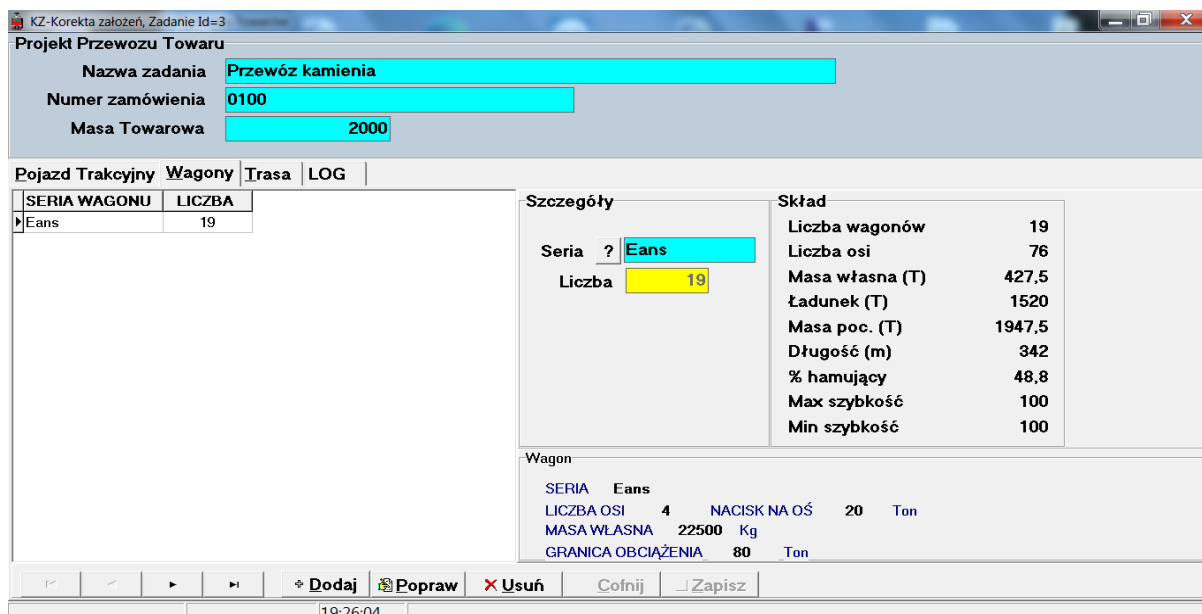
- $wsk(zpd)$  – wysokość współczynnika korygującego dla zadania przewozowego,
- $ops(zpd,nol)$  – wysokość opłaty podstawowej dla zadania przewozowego będącego pojazdem samochodowym i dla odcinka,
- $wskpsl(zpd)$  – wysokość współczynnika korygującego dla zadania przewozowego będącego pojazdem samochodowym,
- $wskpsp(zpd)$  – wysokość współczynnika korygującego dla zadania przewozowego będącego wagonem próżnym po przewozie pojazdu samochodowego,
- $opint(zpd,nol)$  – wysokość opłaty podstawowej dla zadania przewozowego będącego przesyłką intermodalną i dla odcinka,
- $wskintl \leq 22(zpd)$  – wysokość współczynnika korygującego dla zadania przewozowego będącego przesyłką intermodalną do 22 ton brutto,
- $wskintl > 22(zpd)$  – wysokość współczynnika korygującego dla zadania przewozowego będącego przesyłką intermodalną powyżej 22 ton brutto,
- $wskintp(zpd)$  – wysokości współczynnika korygującego dla zadania przewozowego będącego wagonem próżnym po przewozie przesyłki intermodalnej,
- $od(zpd)$  – wysokości opłaty dodatkowej dla zadania przewozowego.

Ze względu na to, że w/w parametry są powiązane ze sobą, ich ostateczne wartości należy ustalić na podstawie taryfy towarowej określonego przewoźnika kolejowego.

### **9.3. Wyniki – dobór taboru do realizacji zadań na danych rzeczywistych**

#### **9.3.1. Dobór lokomotywy i wagonów do realizacji zadania przewozowego**

Przedmiotem pierwszego przypadku jest dobór taboru do realizacji zadania przewozowego, którym jest przewóz kamienia ze stacji Gralewo do stacji Wrocław Brochów. Po uruchomieniu programu DST otrzymano następującą postać wyników dotyczących doboru taboru kolejowego do realizacji analizowanego zadania – patrz rys. 9.3. Wyniki zestawiono w tab. 9.1.



Rys. 9.3. Okno programu DST z wynikami doboru taboru do realizacji zadania **0100**

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST

Tab. 9.1. Wyniki doboru taboru do realizacji zadania **0100**

Pojazd	Parametr	Wartość parametru
LOKOMOTYWY	seria	<b>ET21</b>
	liczba	<b>1</b>
	razem osi	<b>6</b>
	razem długość	<b>17,5 m</b>
	max szybkość	<b>100 km/h</b>
	masa własna	<b>78 ton</b>
	ciężar hamujący	<b>50 ton</b>
	procent ciężaru hamującego	<b>64,1 %</b>
	max nacisk osi lokomotywy na szynę	<b>13 ton</b>
WAGONY	seria	<b>Eans</b>
	liczba	<b>19</b>
	liczba wagonów	<b>19</b>
	razem osi	<b>76</b>
	razem długość	<b>342 m</b>
	max szybkość	<b>100 km/h</b>
	masa własna	<b>427,5 ton</b>
	ciężar hamujący	<b>950 ton</b>
	procent ciężaru hamującego	<b>62,5 %</b>
	granica obciążenia	<b>1520 ton</b>
	max nacisk osi wagonu na szynę	<b>20 ton</b>

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST

Podsumowując, aplikacja DST wskazała, że realizacja przewozu kamienia ze stacji Gralewo do stacji Wrocław Brochów powinna zostać zrealizowana przy pomocy jednej

lokomotywy elektrycznej przystosowanej do ruchu towarowego serii **ET21** oraz **19 wagonów** towarowych węglarek budowy normalnej serii **Eans** ( $dtr(zpd,lok,wag) = 1$ ;  $dtr(0100,1\cdot ET21,19\cdot Eans) = 1$ ). Liczba osi obliczeniowych pociągu to **82**, natomiast jego długość to **359,5 m**. Ciężar hamujący pociągu to **1000 ton**, a procent ciężaru hamującego wynosi **62,6 %**.

Przedmiotem drugiego studium przypadku jest dobór taboru do realizacji zadania przewozowego, którym jest przewóz mebli ze stacji Olsztyn Główny do stacji Gliwice. Po uruchomieniu programu DST otrzymano następującą postać wyników dotyczących doboru taboru kolejowego do realizacji analizowanego zadania – patrz rys. 9.4. Wyniki zestawiono w tab. 9.2.

KZ-Korekta założeń, Zadanie Id=4

**Projekt Przewozu Towaru**

Nazwa zadania: **Przewóz mebli**

Numer zamówienia: **0110**

Masa Towarowa: **1000**

Pojazd Trakcyjny | **Wagony** | Trasa | LOG

SERIA WAGONU	LICZBA
Gags	13

**Szczegóły**

Seria ? **Gags**

Liczba **13**

**Skład**

Liczba wagonów	13
Liczba osi	52
Masa własna (T)	260
Ładunek (T)	1040
Masa poc. (T)	1300
Długość (m)	226
% hamujący	40
Max szybkość	100
Min szybkość	100

Wagon

SERIA **Gags**

LICZBA OSI **4** NACISK NA OŚ **20** Ton

MASA WŁASNA **20000** Kg

GRANICA OBCIĄŻENIA **80** Ton

CIĘŻAR HAM. **40** Ton

DŁUGOŚĆ **17,4** m

MAX SZYBKOŚĆ **100** Km/h

SKRAJNIA

◀ ▶ ⏪ ⏩ ➕ Dodaj 🗑 Popraw ✖ Usuń ⏮ Cofnij ⏭ Zapisz

Rys. 9.4. Okno programu DST z wynikami doboru taboru do realizacji zadania **0110**

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST

Tab. 9.2. Wyniki doboru taboru do realizacji zadania **0110**

Pojazd	Parametr	Wartość parametru
LOKOMOTYWY	seria	<b>ET21</b>
	liczba	<b>1</b>
	razem osi	<b>6</b>
	razem długość	<b>17,5 m</b>
	max szybkość	<b>100 km/h</b>
	masa własna	<b>78 ton</b>
	ciężar hamujący	<b>50 ton</b>
	procent ciężaru hamującego	<b>64,1 %</b>
	max nacisk osi lokomotywy na szynę	<b>13 ton</b>
WAGONY	seria	<b>Gags</b>
	liczba	<b>13</b>
	liczba wagonów	<b>13</b>
	razem osi	<b>52</b>
	razem długość	<b>226,2 m</b>
	max szybkość	<b>100 km/h</b>
	masa własna	<b>260 ton</b>
	ciężar hamujący	<b>520 ton</b>
	procent ciężaru hamującego	<b>50 %</b>
	granica obciążenia	<b>1040 ton</b>
	max nacisk osi wagonu na szynę	<b>20 ton</b>

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST

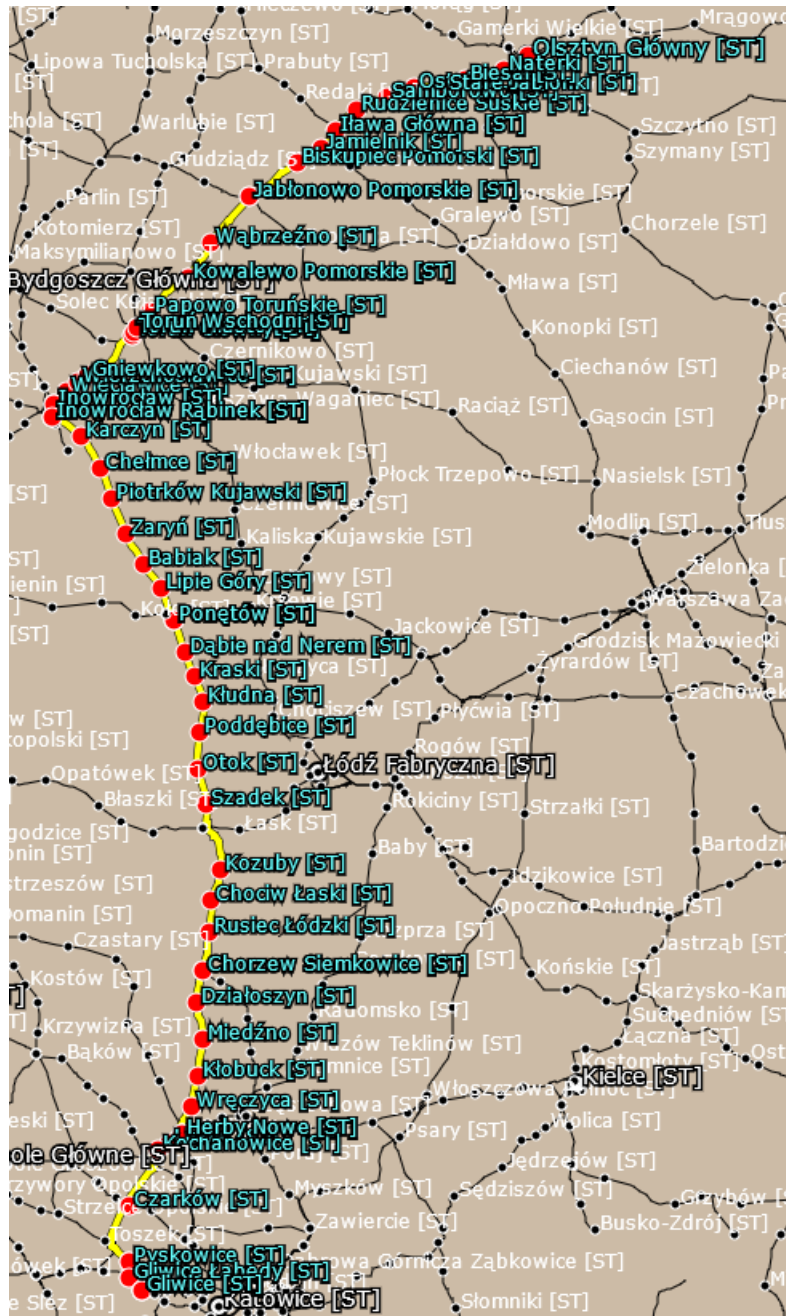
Podsumowując, aplikacja DST wskazała, że realizacja przewozu mebli ze stacji Olsztyn Główny do stacji Gliwice powinna zostać zrealizowana przy pomocy jednej lokomotywy elektrycznej przystosowanej do ruchu towarowego serii **ET21** oraz **13 wagonów** towarowych krytych budowy normalnej serii **Gags** ( $dtr(zpd, lok, wag) = 1$ ;  $dtr(0110, 1 \cdot ET21, 13 \cdot Gags) = 1$ ). Liczba osi obliczeniowych pociągu to **58**, natomiast jego długość to **243,7 m**. Ciężar hamujący pociągu to **570 ton**, a procent ciężaru hamującego wynosi **51 %**.

### 9.3.2. Wyznaczenie trasy przewozu ładunków

Drugim elementem w problemie doboru taboru do realizacji zadań jest wyznaczenie proponowanej trasy do przejazdu pociągiem. W wyniku działania aplikacji w pierwszym przypadku otrzymano proponowaną trasę, która została zobrazowana na rys. 9.5. Wyniki działania aplikacji DST przedstawiono w załączniku 2.







Rys. 9.6. Przebieg trasy dla wybranego zadania przewozowego

Źródło: zobrazowanie wyników pracy aplikacji komputerowej DST z wykorzystaniem serwisu <https://skrz.plk-sa.pl/kalkulacja/>

Uzyskano następujące wartości zmiennych decyzyjnych (numery odcinków zastąpiono parami numerów punktów ekspedycyjnych stanowiących początek i koniec odcinka linii kolejowej):

$$\mathbf{D}(0110) = \langle (009209, 009233), \dots, (069740, 069708) \rangle \quad (9.2)$$

przy czym: 009209 – stacja Olsztyn Główny, 009233 – stacja Olsztyn Zachodni, 069740 – stacja Gliwice Łabędy, 069708 – stacja Wrocław Brochów.

Dla każdego odcinka sieci kolejowej, po którym realizowany będzie przewóz zadania przewozowego zmienne decyzyjne  $x(nol, zpd)$  przyjmowały wartość równą 1 ( $x(nol, zpd) = 1$ ).

### 9.3.3. Określenie warunków przewozu dla poszczególnych zadań

Dla pierwszego zadania przewozowego ( $zpd = 0100$ ) określona została trasa przewozu przebiegająca przez Iławę, Toruń, Inowrocław, Gniezno, Wrześnię, Jarocin, Krotoszyn i Oleśnicę. Jej długość to  $dl(0100) = 428,076$  km. Wyznaczenie trasy pozwoliło określić maksymalną prędkość dla pociągu na poziomie  $VMAX(0100) = 80$  km/h. Mając te dane możliwe było określenie przybliżonego czasu realizacji zlecenia na poziomie  $t(0100) = 317,25$  min. Do wyznaczenia tej wartości założono, że czas przyjęcia lokomotywy elektrycznej wynosi **15 min.**, a czas zdania **15 min.** Program dodatkowo określił, że po tak wyznaczonej trasie możliwy jest przejazd pociągu z przekroczoną skrajnią.

Program DST pozwolił na określenie kosztu przewozu ładunku na poziomie  $k(0100) = 213\,894,40$  zł. Na koszt ten składa się cena taryfowa na poziomie **3 518,00 zł.** pomnożona przez współczynnik korekty na poziomie **60,8.** Wyniki pracy programu w tym obszarze przedstawiono w załączniku 2.

Dla drugiego zadania przewozowego ( $zpd = 0110$ ) określona została trasa przewozu przebiegająca przez Iławę, Toruń, Inowrocław, magistralę węglową, Herby Nowe, Krupski Młyn, Pyskowice, Gliwice Łabędy. Jej długość to  $dl(0110) = 516,169$  km. Wyznaczenie trasy pozwoliło określić maksymalną prędkość dla pociągu na poziomie  $VMAX(0110) = 80$  km/h. Mając te dane możliwe było określenie przybliżonego czasu realizacji zlecenia na poziomie  $t(0110) = 385,5$  min. Do wyznaczenia tej wartości założono, że czas przyjęcia lokomotywy elektrycznej wynosi **15 min.**, a czas zdania **15 min.** Program dodatkowo określił, że po tak wyznaczonej trasie możliwy jest przejazd pociągu z przekroczoną skrajnią.

Program DST pozwolił na określenie kosztu przewozu ładunku na poziomie  $k(0100) = 168\,064,00$  zł. Na koszt ten składa się cena taryfowa na poziomie **4 040,00 zł.** pomnożona przez współczynnik korekty na poziomie **41,6.** Wyniki pracy programu w tym obszarze przedstawiono w załączniku 3.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Celem rozprawy było opracowanie metody doboru taboru do realizacji zadań kolejowych przewozów towarowych przy uwzględnieniu ograniczonych zasobów, na podstawie złożonych zamówień przez klientów i zgodnie z ich oczekiwaniami. W ramach prac przygotowano model decyzyjny doboru taboru do realizacji zadań przewozowych przy ograniczonych zasobach, procedurę metody oraz jej implementację w postaci autorskiej aplikacji komputerowej DST.

Jak wykazano w badaniach przeprowadzonych na danych rzeczywistych (rozdział 9) z zastosowaniem przygotowanej aplikacji DST, opracowana metoda pozwala na dokonanie przydziału kolejowych pojazdów dedykowanych do ruchu towarowego: lokomotyw oraz wagonów do realizacji zdefiniowanego zadania przewozowego, trasowanie uruchomionego w związku z realizacją zdefiniowanego zadania przewozowego pociągu po sieci kolejowej i ustalenie warunków przewozu dla zdefiniowanego zadania przewozowego.

Całość badań przeprowadzonych w rozprawie pozwala na wysunięcie wniosków dotyczących aspektów teoretycznych jak i użytkowych w zakresie problematyki metody doboru taboru do realizacji zadań w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach. W części teoretyczno-badawczej rozprawy dokonano:

- krytycznej analizy literatury w obszarach badawczych problematyki analizowanej w rozprawie, w tym dotyczącej: organizacji ruchu kolejowego, doboru taboru do realizowanych zadań, przydziału drużyn trakcyjnych oraz metod i narzędzi stosowanych do rozwiązania problemu doboru taboru do realizacji zadań w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach,
- analizy i oceny zasad i procedur stosowanych przy gospodarowaniu wagonami oraz analizy i zasad gospodarowania pojazdami trakcyjnymi,
- opracowania autorskiego modelu decyzyjnego metody doboru taboru do realizacji zadań w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach.
- W części użytkowej rozprawy dokonano:
  - opracowania autorskiej procedury metody doboru taboru do realizacji zadań w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach wraz z algorytmem obliczeniowym rozwiązania,
  - zaimplementowania metody doboru taboru do realizacji zadań przy ograniczonych zasobach w postaci autorskiej aplikacji DST, która pozwala na

- dokonanie przydziału lokomotyw i wagonów do realizacji zadania, wybór najkrótszej trasy przewozu oraz określenie warunków przewozu,
- weryfikacji opracowanej metody doboru taboru do realizacji towarowych zadań przewozowych w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach na danych rzeczywistych z wykorzystaniem aplikacji komputerowej.
- Efekty dysertacji skierowane są do przedstawicieli przewoźników kolejowych. Dzięki opracowanej metodzie i jej implementacji w postaci aplikacji komputerowej instytucje te będą mogły racjonalnie gospodarować posiadanym taborom. Aplikacja umożliwia manualną korektę rozwiązań zaproponowanych w sposób automatyczny, co pozwala na lepsze dostosowanie uzyskanego rozwiązania do potrzeb klienta ze względu na rodzaj przewożonego ładunku i jego oczekiwania.
  - Efekty rozprawy mają charakter rozszerzający dotychczasowy stan wiedzy. Na podstawie opracowanej metody oraz jej implementacji możliwe będzie także badanie zachodzących zjawisk oraz występujących zależności w organizacji ruchu kolejowego.
  - Metoda ma charakter uniwersalny. O jej uniwersalności świadczy fakt, iż można zastosować ją, przy małych modyfikacjach algorytmów obliczeniowych oraz zakresów wprowadzanych danych, do doboru taboru do zadań dla innych gałęzi transportu, np. transportu samochodowego – zarówno segmentu miejskiego jak i podmiejskiego, czy transportu lotniczego.
  - Czas przejazdu między poszczególnymi punktami eksploatacyjnymi obliczany jest z wykorzystaniem metody obliczeń uproszczonych. Metoda ta została wybrana ze względu na mały zasób danych wejściowych niezbędny do wyznaczenia czasu przejazdu pociągu między dwoma punktami.
  - Weryfikacja metody na przykładach przedstawionych w rozdziale 9 z wykorzystaniem autorskiej aplikacji DST pozwala stwierdzić, że teza rozprawy *„zastosowanie odpowiednich algorytmów heurystycznych do rozwiązania problemu doboru taboru do zadań przy ograniczonych zasobach w towarowym transporcie kolejowym pozwalają na racjonalny dobór środków do realizacji zadań”* została udowodniona.

Wkład autora poprzez niniejszą rozprawę w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria lądowa i transport jest następujący:

- opracowanie autorskiego modelu decyzyjnego metody doboru taboru do realizacji zadań w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach, obejmującego dobór

odpowiedniej liczby lokomotyw odpowiednich serii oraz odpowiedniej liczby wagonów odpowiednich serii do realizacji określonego zadania przewozowego, wytrasowanie pociągu po sieci kolejowej oraz określenie warunków handlowych realizacji przewozu,

- opracowanie autorskiej procedury metody doboru taboru do realizacji zadań w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach wraz z algorytmem obliczeniowym rozwiązania,
- opracowanie implementacji komputerowej metody doboru taboru do realizacji zadań w transporcie kolejowym przy ograniczonych zasobach, która umożliwi prowadzenie dalszych badań naukowych w tym kierunku.

W zakresie kierunków dalszych badań należy dostosowywać aplikację do aktualnych potrzeb uwzględniając najnowsze dostępne algorytmy i ich modyfikacje, to oznacza, że zarówno model matematyczny, procedura metody jak i aplikacja komputerowa powinny być rozwijane. Wśród dalszych kierunków badań należy wymienić następujące obszary badawcze:

- planowanie ruchu pociągów na sieci kolejowej w innym wariantcie niż najkrótszy,
- planowanie ruchu pociągów na sieci kolejowej w postaci wykresów ruchu,
- planowanie pracy drużyn trakcyjnych w aspekcie przydzielania do obsługi pociągów drużyny trakcyjnej,
- planowanie pracy manewrowej oraz pracy zaplecza obsługującego w aspekcie przydzielania na poszczególne stacje zespołów manewrowych wraz z lokomotywami manewrowymi, a także sporządzania planu obsługi pojazdów trakcyjnych i wagonów przez zaplecze techniczne (przełłady).

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Abbink, E. (2008). Solving large scale crew scheduling problems by using iterative paartitioning (No. EI 2008-03). Report / Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam (pp. 1–15).
- [2] Abbink, E. J., Albino, L., Dollevoet, T., Huisman, D., Roussado, J., & Saldanha, R. L. (2011). Solving large scale crew scheduling problems in practice. *Public Transport*, 3(2), 149-164.
- [3] Abbink, E., Van den Berg, B., Kroon, L., Salomon, M. (2004). Allocation of railway rolling stock for passenger trains. *Transportation Science*, 38(1), 33–41.
- [4] Ackoff, R.W. (1968). *Decyzje optymalne w badaniach stosowanych*. Warszawa, PWN.
- [5] Adewumi, A. O., Sawyerr, B. A., Ali, M. M. (2009). A heuristic solution to the university timetabling problem. *Engineering Computations*, vol. 26, no. 8, pp. 972-984.
- [6] Akbulut, M., Yilmaz, A. (2009). A modified genetic algorithm for the generalized assignment problems. *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, vol. 9, no.2, pp. 951-958.
- [7] Akgul, M. (1993). A genuinely polynomial primal simplex algorithm for the assignment problem. *Discrete Applied Mathematics*, vol. 45, iss. 2, pp. 93-115.
- [8] Albrecht, T. (2009). Automated timetable design for demand – oriented service on suburban railways. *Public Transport*, vol. 1, iss. 1, pp. 5-20.
- [9] Alfieri, A., Groot, R., Kroon, L., Schrijver, A. (2006). Efficient circulation of railway rolling stock. *Transportation Science*, vol. 40, iss. 3, pp. 378–391.
- [10] Ambroziak, T., Piętka, R. (2008). Metoda komputerowego wspomagania wyznaczania harmonogramów pracy pojazdów trakcyjnych. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, z. 64, str. 13-18.
- [11] Ambroziak, T., Żak, J. (2004). Metoda wyznaczania optymalnej liczby środków transportowych dla realizacji określonego zadania transportowego. *Zeszyty Naukowe. Transport / Politechnika Śląska*, z. 52, str. 77-84.
- [12] Assad, A. A. (1980): Models for rail transportation. *Transportation Research Part A: General*, vol. 14, iss. 3, pp. 205-220.

- [13] Bach, L., Dollevoet, T., Huisman, D. (2016). Integrating timetabling and crew scheduling at a freight railway operator. *Transportation Science*, vol. 50, iss. 3, pp. 878–891.
- [14] Bałuch, H., Starczewska, M. (2011). *Leksykon terminów kolejowych*. Warszawa, Kolejowa Oficyna Wydawnicza.
- [15] Baron, K., Rotko, J. (1999). System konstrukcji i analiz wykresu ruchu dla ograniczeń ruchowych „Skar”. *Zeszyty Naukowo –Techniczne Oddziału Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Materiały Konferencyjne nr 12, z. 68, str. 51-71.*
- [16] Bektas, T. (2006). The multiple traveling salesman problems and overview of formulations and solution procedures Omega. *European Journal of Operational Research*, vol. 34, iss. 3, pp. 209-219.
- [17] Bengtsson, L., Galia, R., Gustafsson, T., Hjorring, C., Kohl, N. (2007). Railway crew pairing optimization. In: Geraets F., Kroon L., Schoebel A., Wagner D., Zaroliagis C.D. (eds) *Algorithmic Methods for Railway Optimization. Lecture Notes in Computer Science*, vol 4359. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-74247-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74247-0_6)
- [18] Berkeley E.C. (1960). *Symbolic Logic and Intelligent Machines*. New York, Reinhold Publishing.
- [19] Bester L., Toruń A. (2014) Modeling of Reliability and Safety at Level Crossing Including in Polish Railway Conditions. In: Mikulski J. (eds) *Telematics - Support for Transport. TST 2014. Communications in Computer and Information Science*, vol. 471. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-45317-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45317-9_5)
- [20] Biała księga: Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu - dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu (KOM(2011) 144 końcowy z dnia 28 marca 2011 r.)
- [21] Białoń, A., Gradowski, P., Gryglas, M. (2010). Wpływ systemu sterowania ruchem kolejowym ERTMS/ETCS na zwiększenie przepustowości linii kolejowych. *TTS – Technika Transportu Szynowego*, nr. 16, str. 11-17.
- [22] Billionnet, A. (2003). Using integer Programming to Solve the Train –Platforming Problem. *Transportation Science*, vol. 37, iss. 2, pp. 213-222.
- [23] Boole, J. (1975). A method for solving crew scheduling problems. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 26, iss. 1, str. 55-62.

- [24] Borndörfer, R., Schulz, C., Seidl, S., Weider, S. (2017). Integration of duty scheduling and rostering to increase driver satisfaction. *Public Transport*, vol. 9, iss. 1, pp. 177–191.
- [25] Bronsztejn, I. N., Siemiendajew, K.A., Musiol, G., Muehlig, H. (2017). *Nowoczesne kompendium matematyki*. Warszawa, PWN.
- [26] Brucker, J., Hurink, J.L., Rolfes, T. (2003). Routing of railway carriages: A case study. *Journal of Global Optimization* vol. 27, pp. 313–332.
- [27] Brucker, P., Qu, R., Burke, E. (2011). Personnel scheduling: Models and complexity. *European Journal of Operational Research*, vol. 210, iss. 3, pp. 467-473.
- [28] Budai, G., Maro'ti G., Dekker R., Huisman D., Kroon L. (2009). Rescheduling in passenger railways: The rolling stock rebalancing problem. *Journal of Scheduling*, vol. 13, iss. 3, pp. 281–297.
- [29] Cacchiani, V., Caprara, A., & Fischetti, M. (2012). A Lagrangian heuristic for robustness, with an application to train timetabling. *Transportation Science*, vol. 46, iss. 1, pp. 124–133.
- [30] Cacchiani, V., Galli, L., Toth, P. (2015). A tutorial on non-periodic train timetabling and platforming problems. *Euro Journal on Transportation and Logistics*, vol. 4, iss. 3, pp. 285-320.
- [31] Cacchiani, V., Huisman, D., Kidd, M., Kroon, L., Toth, P., Veelenturf, L., Wagenaar, J. (2014). An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 63, pp. 15–37. doi: 10.1016/j.trb.2014.01.009.
- [32] Cacchiani, V., Toth, P. (2012). Nominal and robust train timetabling problems. *European Journal of Operational Research*, vol. 219, iss. 3, pp. 727–737.
- [33] Cadarso, L., Marín, Á. (2014). Improving robustness of rolling stock circulations in rapid transit networks. *Computers & Operations Research*, vol. 51, pp. 146–159.
- [34] Caffrey, J., Hitchings, G. (1995). Makespan distributions in flow shop scheduling. *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 15, iss. 3, pp. 50-58.
- [35] Cai, Z., Yan, J. (2018). Analysis of residents' travel characteristics along Beijing rail transit line based on binary choice model. *Archives of Transport*, vol. 47, iss. 3, pp. 19-27.
- [36] Canca, D., Sabido, M., Barrena, E. (2014). A rolling stock circulation model for railway rapid transit systems. *Transportation Research Procedia*, vol. 3, pp. 680-689.



- [37] Caprara, A., Fischetti, M., Guida, P. L., Toth, P., Vigo, D. (1999). Solution of large-scale railway crew planning problems: The Italian experience. In: Wilson N.H.M. (eds) *Computer-Aided Transit Scheduling. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol 471. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-85970-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-85970-0_1)
- [38] Caprara, A., Kroon, L., Monaci, M., Peeters M., Toth P. (2007). Passenger railway optimization. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, vol. 14, pp. 129-187.
- [39] Caprara, A., Monaci, M., Toth, P. (2001). A global method for crew planning in railway applications. In: Voß S., Daduna J.R. (eds) *Computer-Aided Scheduling of Public Transport. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol 505. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-56423-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-56423-9_2).
- [40] Carey, M., Lockwood, D. (1995). A model, algorithms and strategy for train pathing. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 46, pp. 988–1005.
- [41] Chrwan – jyh H. (1990), Distribution Requirements Planning: A Generalised System for Delivery Scheduling in a Multi-Sourcing Logistics System, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 20 iss. 2, pp. 3-8. <https://doi.org/10.1108/09600039010144869>.
- [42] Chrzan M. (2008). Nowoczesne technologie satelitarne w transporcie kolejowym. *Drogi: lądowe, powietrzne, wodne*, nr 3-4, str. 82-87.
- [43] Chrzan M. (2018). Bezpieczeństwo kolejowych systemów telekomunikacyjnych. Radom, Kazimierz Pułaski Technical University of Radom.
- [44] Chrzan M. (2019): Współczesne systemy telekomunikacyjne w transporcie kolejowym. Radom, Instytut Naukowo - Wydawniczy Spatium.
- [45] Chwen – Tzeng S. (1999). Dynamic vehicle control and scheduling of a multi – depot physical distribution system, *Integrated Manufacturing Systems*, vol. 10, no.1, pp. 56-65.
- [46] Cordeau, J.-F., Soumis, F., Desrosiers, J. (2001). Simultaneous assignment of locomotives and cars to passenger trains. *Operations Research*, vol. 49, pp. 531–548.
- [47] Corman, F. i in. (2011). Optimal multi-class rescheduling of railway traffic. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, vol. 1, iss. 1, pp. 14-24.
- [48] Corman, F., D’Ariano, A., Pacciarelli, D., Pranzo, M. (2010). A tabu search algorithm for rerouting trains during rail operations. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 44, iss. 1, pp. 175-192.

- [49] Costa, D. (1994). A tabu search algorithm for computing an operational timetable. *European Journal of Operational Research*, vol.76, iss. 1, pp. 98-110.
- [50] Crevier, B., Cordeau, J. F., Savard, G. (2012). Integrated operations planning and revenue management for rail freight transportation. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 46, iss. 1, pp. 100-119.
- [51] Derigs, U., Malcherek, D., Schäfer, S. (2010). Supporting strategic crew management at passenger railways –model, method and system. *Public Transport*, vol. 2, iss. 4, str. 307–334.
- [52] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/57/WE z dnia 17 czerwca 2008 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei we Wspólnocie
- [53] Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Sier, D. (2004). Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European Journal of Operational Research*, vol. 153, iss. 1, str. 3-27.
- [54] Faryna, P. (2010). Kolejowa biała księga. Rynek kolejowy, nr 2.
- [55] Fernie, J., McKinnon, A. (1991). The Impact of Changes in Retail Distribution on a Peripheral Region: The Case of Scotland. *International Journal of Retail & Distribution Management*, vol. 19, no. 7.
- [56] Filipowicz, B. (1999). *Badania operacyjne: Wybrane metody obliczeniowe i algorytmy, Część 1*. Kraków, Poldex.
- [57] Fioole, P.-J., Kroon, L., Maroti, G., Schrijver, A. (2006). A rolling stock circulation model for combining and splitting of passenger trains. *European Journal of Operational Research*, vol. 174, iss. 2, pp. 1281–1297.
- [58] Freling, R., Huisman, D., Wagelmans, A. P. M. (2003). Models and algorithms for integration of vehicle and crew scheduling. *Journal of Scheduling*, vol. 6, iss. 1, pp. 63–85.
- [59] Glover, F. (1995). *Tabu search fundamentals and uses*. Boulder: Graduate School of Business, University of Colorado.
- [60] Godlewski, J., Perec, J. (red.) (2004). *Międzynarodowe przewozy towarowe*. Warszawa, PWT.
- [61] Goldberg, D.E. (1998). *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*. Warszawa, WNT.
- [62] Gołębiowski P. (2015). Założenia do aplikacji komputerowej BEERJ wspomagającej konstrukcję rozkładu jazdy pociągów. *Logistyka*, nr 4, str.281-292.
- [63] Gołębiowski, P. (2015). Konstruowanie rozkładu jazdy pociągów w warunkach ograniczeń czasowych. *Logistyka*, nr 2, str.189-199.

- [64] Gołębiowski, P., Jacyna, M. (2012). Wspomaganie komputerowe konstrukcji rozkładu jazdy pociągów. *Logistyka*, nr 4, str. 189-196.
- [65] Gołębiowski, P., Jacyna, M. (2013). Wybrane problemy planowania ruchu kolejowego. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, z. 97, str. 123-133.
- [66] Gołębiowski, P., Jacyna, M. (2017). The concept of computer application supporting the work of the organizers of railway transport and railway undertakings in the construction of trains timetable. W: CLC 2016: Carpathian Logistics Congress- Congress Proceedings [CD-ROM]. Edit. 1 st. Ostrava: Tanger Ltd, str.534-539. ISBN 978-80-87294-76-5.
- [67] Goossens, J., Van Hoesel, S., Kroon, L. (2006). On solving multi-type railway line planning problems. *European Journal of Operational Research*, vol. 168, iss. 2, pp. 403-424.
- [68] Goverde, R. M. P. (2007). Railway timetable stability analysis using max-plus system theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 41, iss. 2, pp. 179-201.
- [69] Grobelny, M., Malinowski, Ł. (2007). Struktura przewozów towarowych w Polsce. *Rynek Kolejowy*, nr 11.
- [70] Gruszczyński, J. (1975). *Eksplatacja pojazdów trakcyjnych*, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- [71] Guillermo, C., José, M. (2009). Hybrid algorithm of tabu search and integer programming for the railway crew scheduling problem. In: 2009 Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications (PACIIA), pp. 413-416, doi: 10.1109/PACIIA.2009.5406571.
- [72] Halley, A., Beaulieu, M. (2009). Mastery of operational competencies in the context of supply chain management. *Supply Chain Management*, vol. 41, iss. 1, pp. 49-63.
- [73] Hanafi, R., Kozan, E. (2014). A hybrid constructive heuristic and simulated annealing for railway crew scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 70, pp. 11-19.
- [74] Hanczar, P. (2015). Modele decyzyjne w planowaniu cyrkulacji lokomotywy w kolejowym transporcie towarowym. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, z. 382, str. 183-194.
- [75] Hansen, I. A., Pachl, J. (2008). *Railway timetable & traffic. Analysis. Modelling. Simulation*. Hamburg, Eurailpress.

- [76] Heil, J., Hoffmann, K., Buscher, U. (2020). Railway crew scheduling: models, methods and applications. *European Journal of Operational Research*, vol. 283, iss. 2, pp. 405-425.
- [77] Hoffmann, K., Buscher, U., Neufeld, J. S., Tamke, F. (2017). Solving practical railway crew scheduling problems with attendance rates. *Business & Information Systems Engineering*, vol. 59, iss. 3, pp. a147-159.
- [78] <http://encyklopedia.pwn.pl/szukaj/algorytm.html> [dostęp 05.05.2021].
- [79] [http://logistykakolejowa.pl/html/gospodarka\\_wagonami.html](http://logistykakolejowa.pl/html/gospodarka_wagonami.html)
- [80] Hvattum, L. M., Lokketangen, A., Laporte, G. (2006). Solving a Dynamic and Stochastic Vehicle Routing Problem with a Sample Scenario. *Transportation Science*, vol. 40, iss. 1, pp 393-546.
- [81] Izdebski, M. (2018). Modelowanie i analiza problemów decyzyjnych przydziału pojazdów do zadań w zagadnieniach transportowych. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [82] Jacyna M. (2009). Modelowanie i ocena systemów transportowych. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [83] Jacyna M., Krześniak M. (2018) Computer Support of Decision-Making for the Planning Movement of Freight Wagons on the Rail Network, In: *Recent Advances In Traffic Engineering for Transport Networks and Systems / Macioszek Elżbieta, Sierpiński Grzegorz (red.)*, vol. 21, , ISBN 978-3-319-64083-9, ss. 225-236,
- [84] Jacyna M., Szkopiński J. (2014). Wdrożenie wymagań interoperacyjności na sieci kolejowej - zmiana systemu transportu kolejowego. *Logistyka*, nr 4, str. 1917-1926.
- [85] Jacyna, M, Stańczak, A. (2008). Zastosowanie nowoczesnych rozwiązań logistycznych w PKP CARGO S.A. Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej (red. L. Bukowski). *Materiały konferencyjne Konferencji Naukowo Technicznej „Total Logistics Management”*, Zakopane, 3-6 grudnia 2008 r., str. 289-295.
- [86] Jacyna, M., Gołębiowski, P. (2014). Konstrukcja wykresu ruchu pociągów z zastosowaniem wieloetapowej optymalizacji. *Pojazdy Szynowe*, nr 2, str. 1-14.
- [87] Jacyna, M., Gołębiowski, P. (2015). An approach to optimizing the train timetable on a railway network. *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 146, pp. 699-710.
- [88] Jacyna, M., Gołębiowski, P. (2015). Traffic organization on the railway network and problem of graphic train timetable. *Journal of KONES*, vol. 22, iss, 2, pp. 79-87.

- [89] Jacyna, M., Gołębiowski, P., Krześniak, M. (2017). Some aspects of heuristic algorithms and their application in decision support tools for freight railway traffic organization. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport* vol. 96, pp. 59-69.
- [90] Jacyna, M., Gołębiowski, P., Krześniak, M., Szkopiński, J. (2019). *Organizacja ruchu kolejowego*. Warszawa, PWN.
- [91] Jacyna, M., Krześniak, M. (2015). Organizacja przemieszczania wagonów na sieci kolejowej – wybrane zagadnienia, *TTS Technika Transportu Szynowego*, nr 12, str. 656-663.
- [92] Jacyna-Gołda I. (2019). *Inżynieria oceny efektywności sieci dostaw*. Warszawa, PWN.
- [93] Jacyna-Gołda, I, Żak, J, Gołębiowski, P. (2014). Models of traffic flow distribution for various scenarios of the development of proecological transport system. *Archives of Transport*, vol. 32, iss. 4, pp. 17-28.
- [94] Jütte, S., Thonemann, U. (2012). Divide-and-price: A decomposition algorithm for solving large railway crew scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, vol. 219, iss. 2, pp. 214-223.
- [95] Khmeleva, E., Hopgood, A. A., Tipi, L., Shahidan, M. (2018). Fuzzy-logic controlled genetic algorithm for the rail-freight crew-scheduling problem. *KIKünstliche Intelligenz*, vol. 32, pp. 61–75. Doi: 10.1007/s13218- 017- 0516- 6.
- [96] Kliewer, N., Amberg, B., Amberg, B. (2012). Multiple depot vehicle and crew scheduling with time windows for scheduled trips. *Public Transport*, vol. 3, iss. 3, str. 213–244.
- [97] Klimek, M. (2016). Symulowane wyżarzanie dla problemu harmonogramowania projektu z ograniczonymi zasobami. *Zeszyty Naukowe Warszawskiej Wyższej Szkoły Informatyki*, vol. 15, pp. 53-65.
- [98] Kokubo, T., Fukuyama, Y. (2017). Generation methods of neighborhood schedules for practical train crew scheduling problems using tabu search. In: *Proceedings of the 10th international workshop on computational intelligence and applications* (pp. 39–44). IEEE. doi: 10.1109/IWCIA.2017.8203558 .
- [99] Kroon, L., Dekker, M., Vromans, M. (2007). Cyclic Railway Timetabling: A Stochastic Optimization Approach. In: Geraets F., Kroon L., Schoebel A., Wagner D., Zaroliagis C.D. (eds) *Algorithmic Methods for Railway Optimization*. Lecture

Notes in Computer Science, vol 4359. Springer, Berlin, Heidelberg.  
<https://doi.org/10.1007>

- [100] Kroon, L., M., Dearóti, G., Helmrich, M.: Dekker, M. (2008). Stochastic improvement of cyclic railway timetables. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 42, iss. 6, pp. 553-570.
- [101] Krześniak, M., Poznański, J., Żebrak, D. (2015). Wykorzystanie rozłożenia potoku ruchu do wybranych elementów organizacji kolejowych przewozów towarowych, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, z. 107, str. 55-68.
- [102] Kuo, A., Miller-Hooks, E., Mahmassani, H.: Freight train scheduling with elastic demand. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 46, iss. 6, pp. 1057-1070.
- [103] Land, A. H., Doig, A. G. (1960). An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, vol. 28, no. 3, pp. 497-520.
- [104] Lewiński A., Perzyński T., Toruń A. (2012) The Analysis of Open Transmission Standards in Railway Control and Management. In: Mikulski J. (eds) *Telematics in the Transport Environment. TST 2012. Communications in Computer and Information Science*, vol 329. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-34050-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-34050-5_2)
- [105] Lin, D., Tsai, M. (2019). Integrated crew scheduling and roster problem for trainmasters of passenger railway transportation. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 27362–27375.
- [106] Lingaya, N., Cordeau, J.-F., Desaulniers, G., Desrosiers, J., Soumis, F. (2002). Operational car assignment at VIA rail Canada. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 36, iss. 9, pp. 755–778.
- [107] Lixing, Y., Ziyou, G., Keping, L. (2011). Railway freight transportation planning with mixed uncertainty of randomness and fuzziness. *Applied Soft Computing*, vol. 11, iss. 1, pp. 778-792.
- [108] Lusby, R. M., Larsen, J., Bull, S. (2018). A survey on robustness in railway planning. *European Journal of Operational Research*, vol. 266, iss. 1, pp. 1-15.
- [109] Marinov, M., Sahin, I., Ricci, S., Vasic-Franklin, G. (2013), Railway operations, time – tabling and control. *Research in Transportation Economics*, vol. 41, iss. 1, pp. 59-75.

- [110] Marinov, M., Viegas, J. (2011). A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 19, iss. 1, pp. 516- 539.
- [111] Maroti, G. (2006). Operations research models for railway rolling stock planning. PhD thesis, Technische Universiteit, Eindhoven, Amsterdam.
- [112] Martello, S., Toth, P. (1990). Knapsack problems. Algorithms and Computer Implementations. John Wiley & Sons.
- [113] Meloni, I., Spissu, E., Massimiliano, B. (2007). A Model of the Dynamic Process of Time Allocation to Discretionary Activities. *Transportation Science*, vol. 41, no. 1, pp. 1-134.
- [114] Mena, C., Humphries, A., Wilding, R. (2009). A comparison of inter – and intra – organizational relationships. Two case studies from UK food and drink industry. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 39, no. 9, pp. 762-784.
- [115] Meng, L., Corman, F., Zhou, X., Tang, T. (2018). Special issue on integrated optimization models and algorithms in rail planning and control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 88, pp. 87–90.
- [116] Meng, X.; Jia, L.; Qin, Y. (2010). Train timetable optimizing and rescheduling based on improved particle swarm algorithm. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2197, pp. 71-79.
- [117] Middelkoop, D., Bouwman, M. (2000). Train network simulator for support of network wide planning of infrastructure and timetables. *Computer in Railways VII*, vol. 50, pp. 267-276.
- [118] Morgado, E. M., Martins, J. P. (1993). An AI-based approach to crew scheduling. *Proceedings of 9th IEEE Conference on Artificial Intelligence for Applications*, pp. 71-77, doi: 10.1109/CAIA.1993.366659.
- [119] Mussone, L., Wolfler-Calvo, R. (2013). An analytical approach to calculate the capacity of a system. *European Journal of Operational Research*, vol. 228, iss. 1, pp. 11-23, ISSN 0377-2217.
- [120] Narayanaswami, S., Rangaraj, N. (2011). Scheduling and rescheduling of railway operations: A review and expository analysis. *Technology Operation Management*, vol. 2, iss. 2, pp. 102-122.

- [121] Ng, B., Ferrin, B. G., Pearson, J. N. (1997). The role of purchasing / transportation in cycle time reduction. *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 17, no. 6, pp. 574-591.
- [122] Odijk, M.A. (1996). A constraint generation algorithm for construction of periodic railway timetables. *Transportation Research Part B: Methodological.*, vol. 30, iss. 6, pp. 455-464.
- [123] Ojha, D., Gokhale, R. A. (2009). Logistical business continuity planning – scale development and validation. *The International Journal of Logistics Management*, vol. 20, no. 3, pp. 342-359.
- [124] Oliveira, E., Smith, B.M. (2000). A job – shop scheduling model for the single – track railway scheduling problem. Research report series- University of Leeds School of Computer Studies LU SCS RR, vol. 21.
- [125] Peeters, M., Kroon, L. (2008). Circulation of railway rolling stock: a branch-and-price approach. *Computers & Operations Research*, vol. 35, iss. 2, pp. 538–556.
- [126] PKP Cargo S.A. (2019). Katalog wagonów. Warszawa.
- [127] PKP Cargo S.A. (2019). Zharmonizowany spis towarów (NHM). Warszawa.
- [128] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (2004). Instrukcja o przewozie przesyłek nadzwyczajnych Ir-10 (R-57). Warszawa.
- [129] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (2009). Wykaz linii Id-12 (D29).Warszawa.
- [130] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (2015). Instrukcja dla dyspozytora zarządcy infrastruktury kolejowej Ir-13 (R-23). Warszawa.
- [131] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (2015). Instrukcja o rozkładzie jazdy pociągów Ir-11. Warszawa.
- [132] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (2017). Instrukcja o postępowaniu przy przewozie koleją towarów niebezpiecznych Ir-16. Warszawa.
- [133] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (2018). Zasady organizacji i udzielania zamknięć torowych. Ir-19. Warszawa.
- [134] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (2019). Instrukcja o kontroli biegu pociągów pasażerskich i towarowych Ir-14.Warszawa.
- [135] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (2019). Regulamin sieci 2019/2020. Warszawa.
- [136] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (2021). Instrukcja o prowadzeniu ruchu pociągów Ir-1.Warszawa.



- [137] Poznański, J., Żebrak, D. (2012) Zastosowanie metody obliczeń uproszczonych do wyznaczania czasów jazdy pociągów na szlaku. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, z. 87, str. 69-83.
- [138] Prabir, K., Barin N. (1991). Dynamic Vehicle Scheduling: An Expert Systems Approach, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 21, no. 2, pp. 10-18.
- [139] Raport roczny PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. za 2018 rok.
- [140] Rezolucja Parlamentu Europejskiego z 4 września 2008 r. w sprawie transportu towarowego w Europie (2008/2008 (INI)).
- [141] Richey, R. G. Jr., Chen, H., Upreti, R., Fawcett, S. E., Adams, F. G. (2009). The moderating role of barriers on the relationship between drivers to supply chain integration and firm performance. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 39, no. 10, pp. 826-840.
- [142] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 321/2013 z dnia 13 marca 2013 r dotyczące technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – wagony towarowe” systemu kolei w Unii Europejskiej i uchylające decyzję 2006/861/WE
- [143] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 3 stycznia 2013 r. w sprawie sposobu prowadzenia rejestru oraz sposobu oznakowania pojazdów kolejowych. *Dz.U.* 2013 poz. 211.
- [144] Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2019/773 z dnia 16 maja 2019 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności w zakresie podsystemu "Ruch kolejowy" systemu kolei w Unii Europejskiej i uchylające decyzję 2012/757/UE
- [145] Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2019/774 z dnia 16 maja 2019 r. zmieniające rozporządzenie (UE) nr 1304/2014 w zakresie stosowania technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Tabor kolejowy – hałas”
- [146] Schipper, D., Gerrits, L. (2018). Differences and similarities in european railway disruption management practices. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, vol. 8, iss. 1, pp. 42–55.
- [147] Shi, M., Dessouky M. (2011). Scheduling freight trains traveling on complex networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 45, iss. 7, pp. 1103-1123.
- [148] Snijders, H., Saldanha, R. L. (2017). Decision support for scheduling security crews at Netherlands railways. *Public Transport*, vol. 9, iss. 1–2, pp. 193–215.

- [149] Stańczak A. (2009). Systemy śledzenia taboru szynowego i ładunków jako konieczne elementy nowoczesnej logistyki. *Logistyka*, t. 4, str. CD -- CD.
- [150] Stańczak, A. (2008). Wybrane aspekty organizacji pracy pojazdów trakcyjnych w realizacji planowanych przewozów. *Logistyka*, t. 4, str. CD -- CD.
- [151] Stank, T. P., Goldsby, T. J. (2000). A framework for transportation decision making in an integrated supply chain. *Supply Chain Management*, vol. 5, no. 2, pp. 71-78.
- [152] Strąk Ł., Wieczorek W., Nowakowski A. (2017). Simulated Annealing for Finding TSP Lower Bound. In: Nguyen N., Papadopoulos G., Jędrzejowicz P., Trawiński B., Vossen G. (eds) *Computational Collective Intelligence. ICCCI 2017. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10449. Springer, Cham
- [153] Strona internetowa Urzędu Transportu Kolejowego: <http://www.utk.gov.pl>
- [154] Szkopiński, J., Jacyna, M. (2013). Wybrane aspekty zmian w systemie transportu kolejowego w zakresie uzyskania interoperacyjności. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, z. 97, str. 205-216.
- [155] Szkopiński, J., Jacyna, M. (2014). Interoperacyjność transportu kolejowego w krajach Unii Europejskiej – wybrane aspekty. *Logistyka*, nr 6, ss. 10352 – 10360.
- [156] Szkopiński, J., Jacyna, M. (2015). Dostosowania linii kolejowych do wymagań interoperacyjności – proponowany model oceny „MODIK”. *Logistyka*, nr 4, str. 1015-1024
- [157] Taheri, J., Zomaya, A. Y. (2009). A simulation tool for mobility management experiments. *International Journal of Pervasive Computing and Communications*, vol. 5, no. 3, pp. 360-379.
- [158] Terczyński P. (2011). *Atlas wagonów towarowych*. Poznań, Kolpress.
- [159] Toroslu, I. H, Arslanoglu. Y. (2007). Genetic algorithm for the personnel assignment problem with multiple objectives. *Information Sciences*, vol. 177, iss. 3, pp.787-803.
- [160] Toruń A., Bester L. (2015). Mathematical modelling of Control Command and Signalling Systems, *Proceedings 19th International Conference Transport Means 2015*, pp. 410-413.
- [161] Ustawa z dnia 15 listopada 1984 r. Prawo przewozowe. Dz.U. 1984 nr 53 poz. 272
- [162] Ustawa z dnia 28 marca 2003r. o transporcie kolejowym, Dz.U.2003 nr 86 poz.789 z późn. zm.
- [163] Vaidyanathan, B., Ahuja, R. K. (2015). Crew scheduling problem. *International Series in Operations Research & Management Science*, in: Bruce W. Patty (ed.), *Handbook*

- of Operations Research Applications at Railroads, edition 127, chapter 0, pages 163-175, Springer.
- [164] Valentina C., Caprara A., Toth P. (2010). Scheduling extra freight trains on railway networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 44, iss. 2, pp. 215-231.
- [165] Vansteenwegen, P., Van Oudheusden, D. (2006). Developing railway timetables which guarantee a better service. *European Journal of Operational Research*, vol. 173, iss. 1, pp. 337-350.
- [166] Voss, Ch., Clutterbuck, D. (1989). *Just in time: A Global Status Report*. Berlin Springer – Verlag.
- [167] Waller, A. G. (1983). Computer systems for distribution planning. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 13, no. 4, pp. 48-59.
- [168] Wang, Y., D'Ariano, A., Yin, J., Meng, L., Tang, T., Ning, B. (2018). 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.
- [169] Wnuk, M. (2016). Wyznaczanie optymalnych parametrów pojazdu trakcyjnego w warunkach zakłócenia ruchu pociągów. *Napędy i Sterowanie*, t.18, nr 4, str. 100-109.
- [170] Wolfenburg, A. (2011). *Optymalne kierowanie ruchem pociągów w obszarze sieci kolejowej*. Gorzów Wielkopolski, Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej.
- [171] Wolfenburg, A. (2015). Optymalizacja rozwiązywania konfliktów między pociągami podczas projektowania wykresów ruchu przy wykorzystaniu metody BBS. *Problemy Kolejnictwa*, z. 168, str. 57-62.
- [172] Yuan, J., Hansen, I.A. (2007). Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays. *Transportation Research Part B:Methodological*, vol. 41, iss. 2, pp. 202-217.

## ZAŁĄCZNIK 1 – OPIS SŁOWNIKÓW PROGRAMU DST

### – 1. Linie kolejowe

Pierwszym słownikiem programu są dane dotyczące linii kolejowych. Każda linia kolejowa składa się ze zgrupowanych odcinków kolejowych wraz z opisem niezbędnych parametrów. Dla każdego odcinka można przypisać stacje pośrednie na których pociąg może być zatrzymany.

### – 2. Odcinki kolejowe

Drugim słownikiem programu są dane dotyczące poszczególnych odcinków kolejowych zlokalizowanych na sieci. Dla każdego odcinka zdefiniowano parametry charakterystyczne, niezbędne do prawidłowego prowadzenia ruchu kolejowego. Parametry określają także możliwość przejazdu pociągów. Dla pełnego ujęcia konieczne było uwzględnienie:

- stacja początkowa odcinka i jej kod,
- stacja końcowa odcinka i jej kod,
- długość odcinka [km],
- maksymalne obciążenie [t],
- maksymalny nacisk na oś [t/oś],
- maksymalna szybkość [km/h],
- maksymalna długość pociągu [m],
- maksymalna liczba wagonów [szt.],
- maksymalna liczba osi [szt.],
- ciężar hamujący [%],
- możliwość przekroczenia skrajni,
- istnienie trakcji elektrycznej,
- cena za dostęp do infrastruktury.

Zawartość słownika przedstawiono na rys. z.1.

IdL	NR_LINII	NAZWA	POCZ_KOD	POCZ_NAZWA	POCZ_KM	KONIEC_KOD	KONIEC_NAZWA	KONIEC_KM
1247	1	WARSZAWA CENTRALNA - KATOWICE		WARSZAWA CENTRALNA			KATOWICE	
1248	2	WARSZAWA CENTRALNA - TERESPOL		WARSZAWA CENTRALNA			TERESPOL	
1249	3	WARSZAWA ZACHODNIA - KUNOWICE		WARSZAWA ZACHODNIA			KUNOWICE	

IdO	IdL	NR_ODCINKA	NR_LINII	POCZ_KOD	POCZ_NAZWA	KON_KOD	KON_NAZWA	POCZ_KM	KON_KM	ODLEGLOS
5811	1247		1	033605	WARSZAWA CENTRALNA (STACJA)	033506	WARSZAWA ZACHODNIA (STACJA)	0	3,082	
5812	1247		1	033506	WARSZAWA ZACHODNIA (STACJA)	033514	WARSZAWA WŁOCHY (POSTERUN	3,082	6,804	
5813	1247		1	033514	WARSZAWA WŁOCHY (POSTERUN	034116	JÓZEFINÓW (POSTERUNEK ODGAŁ	6,804	11,638	
5814	1247		1	034116	JÓZEFINÓW (POSTERUNEK ODGAŁ	034108	PRUSZKÓW (STACJA WĘZŁOWA)	11,638	15,891	
5815	1247		1	034108	PRUSZKÓW (STACJA WĘZŁOWA)	034165	GRODZISK MAZOWIECKI (STACJA V	15,891	29,548	1
5816	1247		1	034165	GRODZISK MAZOWIECKI (STACJA V	034207	ZYRARDÓW (STACJA)	29,548	43,141	1
5817	1247		1	034207	ZYRARDÓW (STACJA)	047019	MIEDNIEWICE (POSTERUNEK ODG	43,141	61,497	1
5818	1247		1	047019	MIEDNIEWICE (POSTERUNEK ODG	047001	SKIERNIEWICE (STACJA WĘZŁOWA	61,497	65,929	
5819	1247		1	047001	SKIERNIEWICE (STACJA WĘZŁOWA	047043	SKIERNIEWICE PARK (POSTERUNE	65,929	67,69	
5820	1247		1	047043	SKIERNIEWICE PARK (POSTERUNE	047316	ROGÓW (STACJA STYCZNA)	67,69	95,723	2
5821	1247		1	047316	ROGÓW (STACJA STYCZNA)	047258	KOLUSZKI (STACJA WĘZŁOWA)	95,723	105,194	
5822	1247		1	047258	KOLUSZKI (STACJA WĘZŁOWA)	047266	BĘZELIN (POSTERUNEK ODGAŁĘŻI	105,194	107,362	
5823	1247		1	047266	BĘZELIN (POSTERUNEK ODGAŁĘŻI	047399	BABY (STACJA)	107,362	129,944	2
5824	1247		1	047399	BABY (STACJA)	047704	PIOTRKÓW TRYBUNALSKI (STACJA	129,944	144,242	1
5825	1247		1	047704	PIOTRKÓW TRYBUNALSKI (STACJA	047795	ROZPRZA (STACJA)	144,242	156,544	1
5826	1247		1	047795	ROZPRZA (STACJA)	047829	GORZKÓWICE (STACJA)	156,544	166,718	1
5827	1247		1	047829	GORZKÓWICE (STACJA)	047852	GOMUNICE (STACJA)	166,718	177,694	1

Dane Odcinka i Ograniczenia dla pociągów		MAX OBCIĄŻENIE [Ton]		CIĘŻAR HAMUJĄCY [%]	
POCZĄTEK	033605 WARSZAWA CENTRALNA (STACJA)	MAX NACISK NA OŚ	[Ton/Dś]	PRZEKROCZENIE SKRAJNI	<input checked="" type="checkbox"/>
KONIEC	033506 WARSZAWA ZACHODNIA (STACJA)	MAX SZYBKOŚĆ	[Km/h]	TRAKCJA ELEKTRYCZNA	<input checked="" type="checkbox"/>
ODLEGŁOŚĆ	3 Km	MAX DŁUGOŚĆ	[m]	CENA -A-	[ ]
		MAX WAGONÓW	[szt]	CENA -B-	[ ]
		MAX OSI	[szt]	CENA -C-	[ ]

Rys. z.1. Słownik odcinków kolejowych

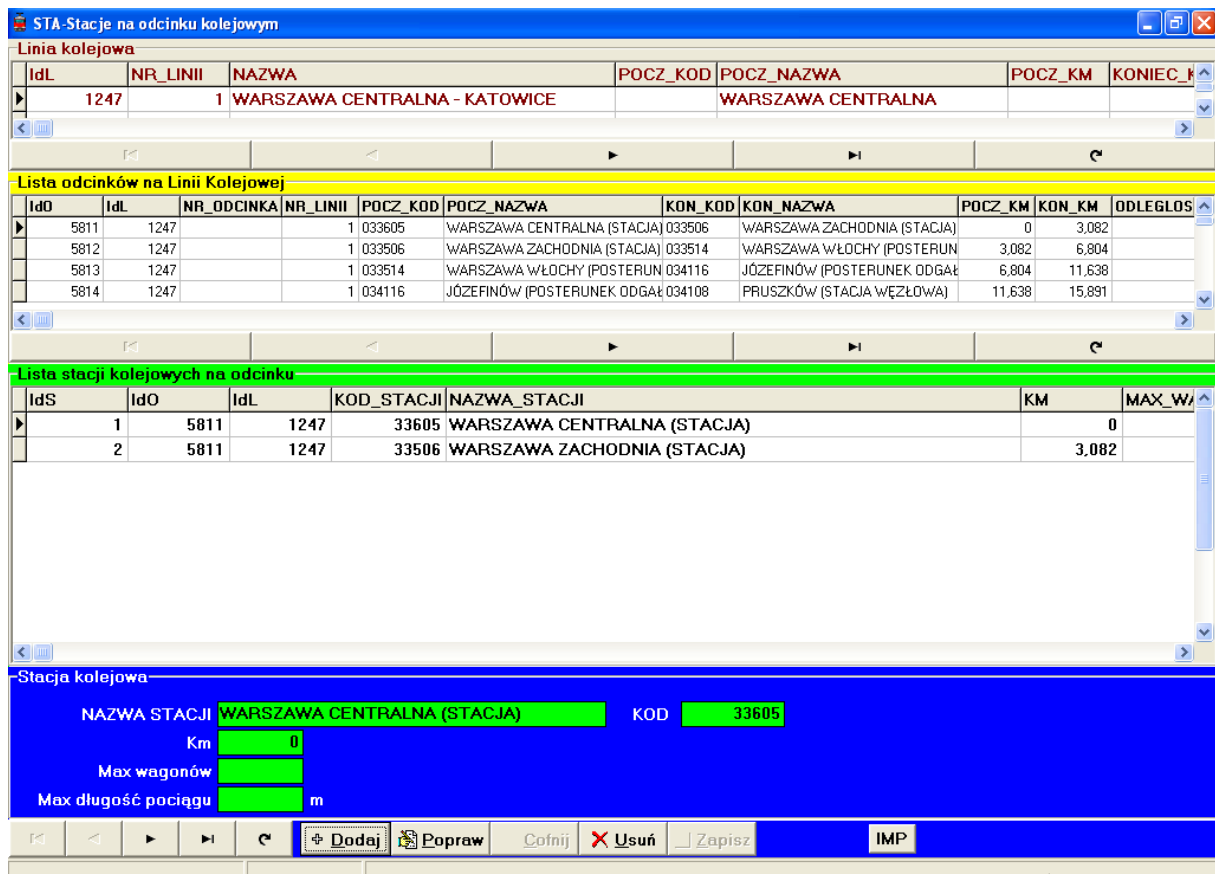
Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST

### – 3. Stacje kolejowe

Trzeci słownik zawiera dane dotyczące stacji kolejowych leżących na odcinku kolejowym. Służy on do zdefiniowania ograniczeń dla pociągów, które miałyby się zatrzymać w celu wyładunku towarów lub operacji techniczno-ruchowych. Dla każdej stacji zdefiniowane zostały takie elementy jak:

- nazwa stacji i jej kod,
- hektometr na linii kolejowej,
- maksymalna liczba wagonów [szt.],
- maksymalna długość pociągu [m].

Zawartość słownika przedstawiono na rys. z.2.



Rys. z.2. Słownik stacji kolejowych

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST

#### – 4. Tabor

Czwarty słownik zawiera dane dotyczące taboru – pojazdów trakcyjnych oraz wagonów towarowych. Słownik pojazdów trakcyjnych obejmuje podstawowe dane dotyczące lokomotyw czyli pojazdów z własnym napędem do prowadzenia pociągów towarowych:

- rodzaj trakcji,
- seria lokomotywy,
- masa własna [t],
- liczba osi tocznych [oś],
- liczba osi napędnych [oś],
- ciężar hamujący [t],
- długość [m],
- moc [W],
- maksymalna szybkość [km/h],
- maksymalne obciążenie [t],

- przeznaczenie.

Zawartość słownika przedstawiono na rys. z.3.

TRAKCJA	SERIA	OZN. SERII	OSIE T.	OSIE N.	MOC	MASA WŁASNA	MAX SZYBK	MAX OBCIĄŻ	CIĘŻAR HAM	
E	1	EM10	0	0						
E	2	EP03	0	0						
E	3	EP05	0	5			125			
E	4	EP07	0	0						
E	5	EP08	0	4						P
E	6	EP09	0	4		80				P
E	7	ET21	0	6		78	100	2000	50	T
E	8	ET22	0	6		88	120	2000		T
E	9	ET40	0	0						
E	10	ET41	0	0						
E	11	ET42	0	0						
E	12	EU06	0	0						U
E	13	EU07	0	0						U

**Dane Techniczne**

SERIA: 8 ET22  
MOC:   
MASA WŁASNA: 88 Ton  
MAX SZYBKOŚĆ: 120 Km/h  
LICZBA OSI TOCZNYCH: 0  
MAX OBCIĄŻENIE: 2000 Ton  
LICZBA OSI NAPĘDNYCH: 6  
PRZEZNACZENIE: TOWAROWA CIĘŻKA  
CIĘŻAR HAM.:  Ton  
DŁUGOŚĆ:  m

Buttons: Dodaj, Edycja, Cofnij, Usuń, Zapisz

Rys. z.3. Lista pojazdów trakcyjnych

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST

Słownik wagonów towarowych obejmuje parametry niezbędne do ich wyboru do realizacji zadania i do zdefiniowania ograniczeń przewozowych. Parametry charakterystyczne dla wagonu towarowego mają związek z możliwością wykonania przewozu towarów po określonej trasie przejazdu. Parametry wagonów towarowych są następujące:

- seria wagonu,
- liczba osi [oś],
- maksymalny nacisk na oś [t],
- masa własna [kg],
- granica obciążenia [t],
- długość wagonu [m],
- maksymalna prędkość [km/h],

- możliwość przekroczenia skrajni,
- ciężar hamujący [t].

Zawartość słownika przedstawiono na rys. z.4.

IdTWAG	IdRWAG	SERIA	LICZBA_OSI	MAX_NA_OS	MASA_WLASNA	GRANICA_OBCIAZ	DLUGOSC	MAX_SZYB	PRZEKR_SKRAJNIA	CIEZ
1	1	Eamos	4	15	21500	60	12,24	80	False	
2	1	Eams	4	15		60		100		
3	1	Eaaos	4	15		60		100		
4	1	Eaos	4	15	20100	60	17	100		
5	1	Eans	4	20		80		100		
6	1	Eas	4	20		80		100		
7	1	Eaos-w	4	17,5		70		100		
8	1	Eanos	4					100		
9	1	Es	4					100		

Dane Techniczne Wagonu Towarowego	
SERIA	Eamos WĘGLARKA
Liczba Osi	4
Max nacisk na Oś	15 Ton
Masa własna	21500 Kg
Granica obciążenia	60 Ton
Ciężar hamujący	Ton
Długość	12,24 m
Max szybkość	80 Km/h
Przekroczenie skrajni	<input type="checkbox"/>

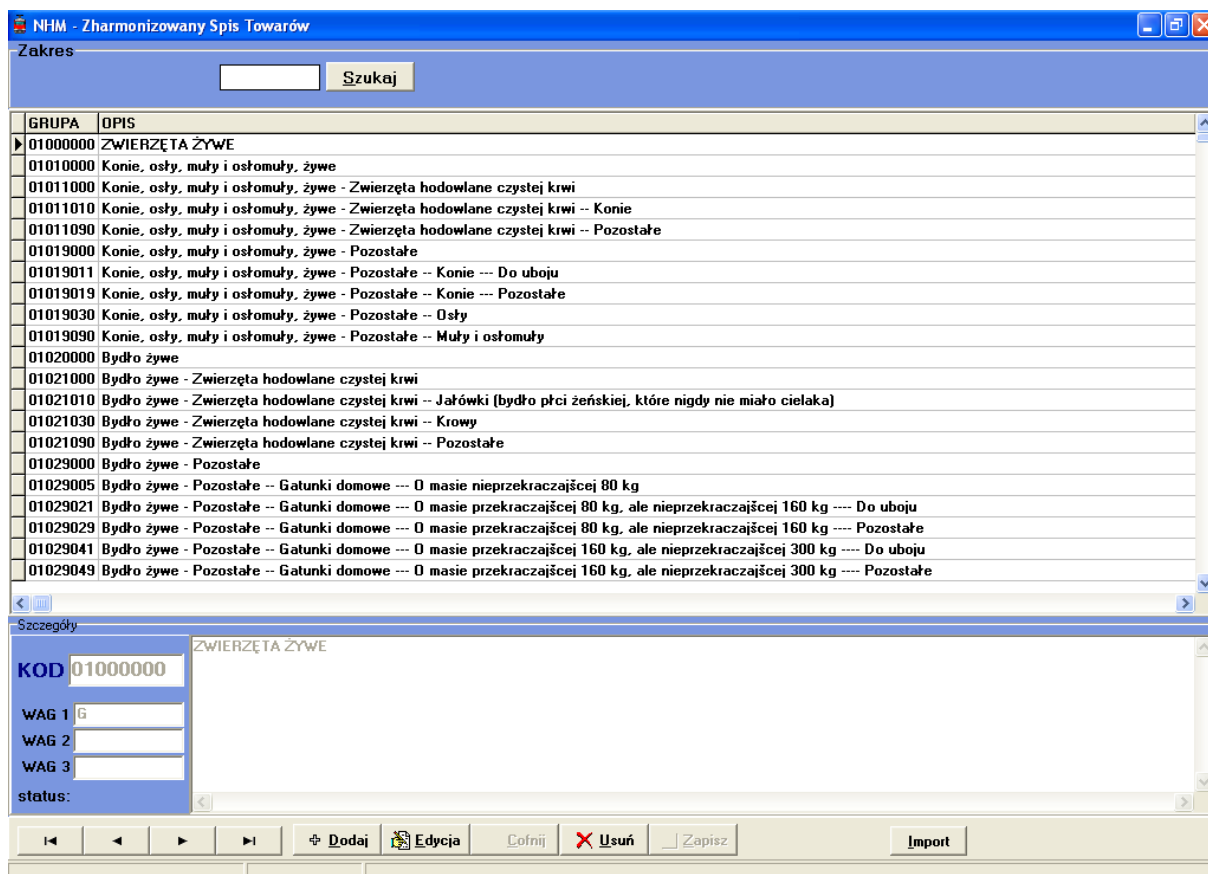
Rys. z.4. Lista wagonów towarowych

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST

### - 5. Rodzaje wagonów + 7. Katalog NHM

Wybór do realizacji przewozu odpowiedniej serii wagonu jest zależny od rodzaju towarów (klasyfikacja NHM) i przypisanych do nich serii wagonowych. Zatem słownik dotyczący rodzaju wagonów połączony jest ze słownikiem Katalog NHM czyli międzynarodową listą towarów możliwych do przewozu koleją. Dla każdego towaru przewidziano trzy serie wagonów, którymi może być przewieziony dany towar. Przy doborze wagonów do składu pociągu algorytm wykorzystuje propozycje przy uwzględnieniu dostępnych wagonów w słowniku. Zawartość słownika przedstawiono na rys. z.5.





Rys. z.5. Słownik Katalog NHM - zharmonizowany spis towarów

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem aplikacji komputerowej DST

## – 6. Odległości

Kolejny słownik zawiera macierz odległości między poszczególnymi punktami na sieci kolejowej. Słownik ten tworzony jest automatycznie na podstawie słownika pierwszego, drugiego i trzeciego.

## – 8. Taryfa towarowa

Ostatni słownik pozwala na obliczenie należności za realizację określonego zadania przewozowego. Zawiera on wartości opłaty podstawowej za przewóz wraz z wartościami współczynników korygujących. Kombinacja tych współczynników pomnożona przez wartość opłaty podstawowej pozwala na uzyskanie przewoźnego.

## **ZAŁĄCZNIK 2 – WYNIKI PRACY PROGRAMU DST DLA PRZEWOZU KAMIENIA**

### **RAPORT WYNIKÓW OBLICZEŃ DLA ZADANIA TOWAROWEGO**

**Numer zamówienia: 0100**

Nazwa zamówienia: Przewóz kamienia

Data utworzenia : 23-02-2021

Opis zadania:

Stacja początkowa: GRALEWO (STACJA)

Stacja końcowa : WROCŁAW BROCHÓW (STACJA WĘZŁOW

#### **LOKOMOTYWY:**

SERIA => ET21 liczba: 1

RAZEM OSI: 6

RAZEM DŁUGOŚĆ: 17,5 m

MAX SZYBKOŚĆ: 100 km/h

MASA WŁASNA: 78 Ton

CIĘŻAR HAMUJĄCY: 50 Ton, 64,1 %

MAX NACISK OSI LOKOMOTYWY NA SZYNE: 13 Ton

#### **WAGONY:**

SERIA: Eans liczba: 19

LICZBA WAGONÓW: 19

RAZEM OSI: 76

RAZEM DŁUGOŚĆ: 342 m

MAX SZYBKOŚĆ: 100 km/h

MASA WŁASNA: 427,5 Ton

CIĘŻAR HAMUJĄCY: 950 Ton, 62,5 %

GRANICA OBCIĄŻENIA: 1520 Ton

MAX NACISK OSI WAGONU NA SZYNE: 20 Ton

#### **SZCZEGÓŁY TRASY:**

001. 022475 GRALEWO (STACJA)-->021873 ZAJĄCZKOWO LUBAWSKIE (STACJA  
W = 27 Km

==> Czas jazdy: 20,25 min., V max = 80 km/h

--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h

002. 021873 ZAJĄCZKOWO LUBAWSKIE (STACJA W-->021808 IŁAWA GŁÓWNA  
(STACJA WĘZŁOWA) = 19 Km

==> Czas jazdy: 14,25 min., V max = 80 km/h

--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h

003. 021808 BISKUPIEC POMORSKI (STACJA)-->021071 IŁAWA GŁÓWNA (STACJA WĘZŁOWA) = 17 Km  
==> Czas jazdy: 12,75 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
004. 021071 JABŁONOWO POMORSKIE (STACJA WĘZŁOWA)-->020909 BISKUPIEC POMORSKI (STACJA) = 19 Km  
==> Czas jazdy: 14,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
005. 020909 WĄBRZEŻNO (STACJA WĘZŁOWA)-->020743 JABŁONOWO POMORSKIE (STACJA WĘZŁOWA) = 19 Km  
==> Czas jazdy: 14,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
006. 020743 KOWALEWO POMORSKIE (STACJA WĘZŁOWA)-->020719 WĄBRZEŻNO (STACJA WĘZŁOWA) = 14 Km  
==> Czas jazdy: 10,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
007. 020719 PAPOWO TORUŃSKIE (STACJA)-->020065 KOWALEWO POMORSKIE (STACJA WĘZŁOWA) = 16 Km  
==> Czas jazdy: 12 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
008. 020065 TORUŃ WSCHODNI (STACJA WĘZŁOWA)-->019901 PAPOWO TORUŃSKIE (STACJA) = 6 Km  
==> Czas jazdy: 4,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
009. 019901 TORUŃ GŁÓWNY (STACJA WĘZŁOWA)-->019703 TORUŃ WSCHODNI (STACJA WĘZŁOWA) = 4 Km  
==> Czas jazdy: 3 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
010. 019703 NIESZAWKA (POSTERUNEK ODGAŁĘŻNIA)-->019711 TORUŃ GŁÓWNY (STACJA WĘZŁOWA) = 4 Km  
==> Czas jazdy: 3 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
011. 019711 GNIEWKOWO (STACJA)-->018796 NIESZAWKA (POSTERUNEK ODGAŁĘŻNIA) = 15 Km  
==> Czas jazdy: 11,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
012. 018796 WIERZCHOSŁAWICE (STACJA)-->018788 GNIEWKOWO (STACJA) = 4 Km  
==> Czas jazdy: 3 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
013. 018788 WIĘCŁAWICE (STACJA)-->018770 WIERZCHOSŁAWICE (STACJA) = 5 Km  
==> Czas jazdy: 3,75 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h

014. 018770 INOWROCŁAW (STACJA WĘZŁOWA)-->018705 WIĘCŁAWICE (STACJA) = 6 Km  
 ==> Czas jazdy: 4,5 min., V max = 80 km/h  
 --> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
015. 018705 DZIARNOWO (POSTERUNEK ODGAŁĘŻN-->018747 INOWROCŁAW (STACJA WĘZŁOWA) = 5 Km  
 ==> Czas jazdy: 3,75 min., V max = 80 km/h  
 --> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
016. 018747 JANIKOWO (STACJA)-->019091 DZIARNOWO (POSTERUNEK ODGAŁĘŻN = 6 Km  
 ==> Czas jazdy: 4,5 min., V max = 80 km/h  
 --> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
017. 019091 KOŁODZIEJEWO (STACJA)-->019125 JANIKOWO (STACJA) = 7 Km  
 ==> Czas jazdy: 5,25 min., V max = 80 km/h  
 --> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
018. 019125 MOGILNO (STACJA WĘZŁOWA)-->032003 KOŁODZIEJEWO (STACJA) = 9 Km  
 ==> Czas jazdy: 6,75 min., V max = 80 km/h  
 --> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
019. 032003 TRZEMESZNO (STACJA)-->032078 MOGILNO (STACJA WĘZŁOWA) = 14 Km  
 ==> Czas jazdy: 10,5 min., V max = 80 km/h  
 --> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
020. 032078 GNIEZNO (STACJA WĘZŁOWA I STYC-->030809 TRZEMESZNO (STACJA) = 16 Km  
 ==> Czas jazdy: 12 min., V max = 80 km/h  
 --> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
021. 030809 GĘBARZEWO (STACJA)-->030874 GNIEZNO (STACJA WĘZŁOWA I STYC = 7 Km  
 ==> Czas jazdy: 5,25 min., V max = 80 km/h  
 --> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
022. 030874 CZERNIEJEWO (STACJA)-->030890 GĘBARZEWO (STACJA) = 6 Km  
 ==> Czas jazdy: 4,5 min., V max = 80 km/h  
 --> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
023. 030890 WRZEŚNIA (STACJA WĘZŁOWA)-->030007 CZERNIEJEWO (STACJA) = 11 Km  
 ==> Czas jazdy: 8,25 min., V max = 80 km/h  
 --> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
024. 030007 ORZECHOWO (STACJA)-->044768 WRZEŚNIA (STACJA WĘZŁOWA) = 24 Km  
 ==> Czas jazdy: 18 min., V max = 80 km/h  
 --> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
025. 044768 ŻERKÓW (STACJA)-->044750 ORZECHOWO (STACJA) = 7 Km  
 ==> Czas jazdy: 5,25 min., V max = 80 km/h

- > Max szybkość na odcinku: 80 Km/h  
026. 044750 JAROCIN (STACJA WĘZŁOWA)-->044701 ŻERKÓW (STACJA) = 11 Km  
==> Czas jazdy: 8,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
027. 044701 KOŹMIN WIELKOPOLSKI (STACJA WĘ-->046201 JAROCIN (STACJA WĘZŁOWA) = 16 Km  
==> Czas jazdy: 12 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
028. 046201 KROTOSZYN (STACJA WĘZŁOWA)-->044008 KOŹMIN WIELKOPOLSKI (STACJA WĘ = 15 Km  
==> Czas jazdy: 11,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
029. 044008 ZDUNY (STACJA)-->044180 KROTOSZYN (STACJA WĘZŁOWA) = 7 Km  
==> Czas jazdy: 5,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
030. 044180 MILICZ (STACJA)-->059675 ZDUNY (STACJA) = 15 Km  
==> Czas jazdy: 11,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
031. 059675 KROŚNICE (STACJA)-->059642 MILICZ (STACJA) = 9 Km  
==> Czas jazdy: 6,75 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
032. 059642 GRABOWNO WIELKIE (STACJA WĘZŁO-->059543 KROŚNICE (STACJA) = 15 Km  
==> Czas jazdy: 11,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
033. 059543 DOBROSZYCE (STACJA)-->059550 GRABOWNO WIELKIE (STACJA WĘZŁO = 9 Km  
==> Czas jazdy: 6,75 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
034. 059550 DĄBROWA OLEŚNICKA (POSTERUNEK-->085621 DOBROSZYCE (STACJA) = 4 Km  
==> Czas jazdy: 3 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
035. 085621 ŁUKANÓW (POSTERUNEK ODGAŁĘŻNY)-->059535 DĄBROWA OLEŚNICKA (POSTERUNEK = 4 Km  
==> Czas jazdy: 3 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
036. 059535 ŁUKANÓW (POSTERUNEK ODGAŁĘŻNY)-->059337 DŁUGOŁĘKA (STACJA) = 11 Km  
==> Czas jazdy: 8,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
037. 059337 DŁUGOŁĘKA (STACJA)-->059246 WROCŁAW PSIE POLE (STACJA WĘZŁ = 6 Km

- ==> Czas jazdy: 4,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
038. 059246 WROCŁAW PSIE POLE (STACJA WĘZŁ-->059204 WROCŁAW SOŁTYSOWICE (STACJA WĘ = 3 Km  
==> Czas jazdy: 2,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
039. 059204 WROCŁAW SOŁTYSOWICE (STACJA WĘ-->059105 WROCŁAW NADODRZE (STACJA) = 4 Km  
==> Czas jazdy: 3 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
040. 059105 WROCŁAW NADODRZE (STACJA)-->058685 WROCŁAW POPOWICE WP3 (POSTERUN = 2 Km  
==> Czas jazdy: 1,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
041. 058685 WROCŁAW POPOWICE WP3 (POSTERUN-->058651 WROCŁAW MIKOŁAJÓW WP2 (POSTERU = 1 Km  
==> Czas jazdy: 0,75 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
042. 058651 GRABISZYN (POSTERUNEK ODGAŁĘŻN-->060095 WROCŁAW MIKOŁAJÓW WP2 (POSTERU = 2 Km  
==> Czas jazdy: 1,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
043. 060095 WROCŁAW GŁÓWNY (STACJA WĘZŁOWA-->060103 GRABISZYN (POSTERUNEK ODGAŁĘŻN = 2 Km  
==> Czas jazdy: 1,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h

#### PODSUMOWANIE:

Odległość: 423 km

Liczba osi: 82

Długość poc.: 359,5 m

Przybliżony czas jazdy: 317,25 min.

Czas przyjęcia lokomotywy Elektrycznej 15 min., czas zdania 15 min.

Ciążar hamujący pociągu: 1000 Ton, 62,6 %.

Możliwy przejazd pociągu z przekrozoną skrajnią

Przekroczono dopuszczalną odległość obsługi trakcyjnej dla lokomotywy. Max: 100 Km

KOSZT PRZEWOZU ŁADUNKU: 213 894,40 zł

CENA TARYFOWA: 3 518,00 zł

WSPÓŁCZYNNIK KOREKTY: 60,8

KOSZTY DOSTĘPU DO INFRASTRUKTURY KOLEJOWEJ:

Cena przejazdu A: 0,00 zł

Cena przejazdu B: 0,00 zł

Cena przejazdu C: 0,00 zł

## **ZAŁĄCZNIK 3 – WYNIKI PRACY PROGRAMU DST DLA PRZEWOZU MEBLI**

### **RAPORT WYNIKÓW OBLICZEŃ DLA ZADANIA TOWAROWEGO**

**Numer zamówienia: 0110**

Nazwa zamówienia: Przewóz mebli

Data utworzenia : 24-02-2012

Opis zadania:

Stacja początkowa: OLSZTYN GŁÓWNY (STACJA WĘZŁOWA

Stacja końcowa : GLIWICE (STACJA WĘZŁOWA)

#### **LOKOMOTYWY:**

SERIA => ET21 liczba: 1

RAZEM OSI: 6

RAZEM DŁUGOŚĆ: 17,5 m

MAX SZYBKOŚĆ: 100 km/h

MASA WŁASNA: 78 Ton

CIĘŻAR HAMUJĄCY: 50 Ton, 64,1 %

MAX NACISK OSI LOKOMOTYWY NA SZYNE: 13 Ton

#### **WAGONY:**

SERIA: Gags liczba: 13

LICZBA WAGONÓW: 13

RAZEM OSI: 52

RAZEM DŁUGOŚĆ: 226,2 m

MAX SZYBKOŚĆ: 100 km/h

MASA WŁASNA: 260 Ton

CIĘŻAR HAMUJĄCY: 520 Ton, 50 %

GRANICA OBCIĄŻENIA: 1040 Ton

MAX NACISK OSI WAGONU NA SZYNE: 20 Ton

#### **SZCZEGÓŁY TRASY:**

001. 009209 OLSZTYN ZACHODNI (PRZYSTANEK O-->009233 OLSZTYN GŁÓWNY  
(STACJA WĘZŁOWA = 2 Km

==> Czas jazdy: 1,5 min., V max = 80 km/h

--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h

002. 009233 NATERKI (STACJA)-->009613 OLSZTYN ZACHODNI (PRZYSTANEK O  
= 7 Km

==> Czas jazdy: 5,25 min., V max = 80 km/h

--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h

003. 009613 UNIESZEWO (ŁADOWNIA PUBLICZNA-->009621 NATERKI (STACJA) = 5 Km  
==> Czas jazdy: 3,75 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
004. 009621 BIESAL (STACJA)-->022095 UNIESZEWO (ŁADOWNIA PUBLICZNA = 7 Km  
==> Czas jazdy: 5,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
005. 022095 STARE JABŁONKI (STACJA)-->022079 BIESAL (STACJA) = 8 Km  
==> Czas jazdy: 6 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
006. 022079 OSTRÓDA (STACJA)-->022004 STARE JABŁONKI (STACJA) = 10 Km  
==> Czas jazdy: 7,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
007. 022004 SAMBOROWO (STACJA)-->021840 OSTRÓDA (STACJA) = 9 Km  
==> Czas jazdy: 6,75 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
008. 021840 IŁAWA GŁÓWNA (STACJA WĘZŁOWA)-->021808 SAMBOROWO (STACJA) = 20 Km  
==> Czas jazdy: 15 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
009. 021808 BISKUPIEC POMORSKI (STACJA)-->021071 IŁAWA GŁÓWNA (STACJA WĘZŁOWA) = 17 Km  
==> Czas jazdy: 12,75 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
010. 021071 JABŁONOWO POMORSKIE (STACJA WĘ-->020909 BISKUPIEC POMORSKI (STACJA) = 19 Km  
==> Czas jazdy: 14,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
011. 020909 WĄBRZEŻNO (STACJA WĘZŁOWA)-->020743 JABŁONOWO POMORSKIE (STACJA WĘ = 19 Km  
==> Czas jazdy: 14,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
012. 020743 KOWALEWO POMORSKIE (STACJA WĘZ-->020719 WĄBRZEŻNO (STACJA WĘZŁOWA) = 14 Km  
==> Czas jazdy: 10,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
013. 020719 PAPOWO TORUŃSKIE (STACJA)-->020065 KOWALEWO POMORSKIE (STACJA WĘZ = 16 Km  
==> Czas jazdy: 12 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
014. 020065 TORUŃ WSCHODNI (STACJA WĘZŁOWA-->019901 PAPOWO TORUŃSKIE (STACJA) = 6 Km  
==> Czas jazdy: 4,5 min., V max = 80 km/h



- > Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
015. 019901 TORUŃ GŁÓWNY (STACJA WĘZŁOWA)-->019703 TORUŃ WSCHODNI (STACJA WĘZŁOWA) = 4 Km  
==> Czas jazdy: 3 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
016. 019703 NIESZAWKA (POSTERUNEK ODGAŁĘŻN-->019711 TORUŃ GŁÓWNY (STACJA WĘZŁOWA) = 4 Km  
==> Czas jazdy: 3 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
017. 019711 GNIEWKOWO (STACJA)-->018796 NIESZAWKA (POSTERUNEK ODGAŁĘŻN = 15 Km  
==> Czas jazdy: 11,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
018. 018796 WIERZCHOSŁAWICE (STACJA)-->018788 GNIEWKOWO (STACJA) = 4 Km  
==> Czas jazdy: 3 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
019. 018788 WIĘCŁAWICE (STACJA)-->018770 WIERZCHOSŁAWICE (STACJA) = 5 Km  
==> Czas jazdy: 3,75 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
020. 018770 INOWROCLAW (STACJA WĘZŁOWA)-->018705 WIĘCŁAWICE (STACJA) = 6 Km  
==> Czas jazdy: 4,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
021. 018705 INOWROCLAW (STACJA WĘZŁOWA)-->018838 INOWROCLAW RĄBINEK (STACJA WĘZ = 7 Km  
==> Czas jazdy: 5,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
022. 018838 CHEŁMCE (STACJA)-->019216 INOWROCLAW RĄBINEK (STACJA WĘZ = 22 Km  
==> Czas jazdy: 16,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
023. 019216 PIOTRKÓW KUJAWSKI (STACJA)-->019190 CHEŁMCE (STACJA) = 11 Km  
==> Czas jazdy: 8,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
024. 019190 ZARYŃ (STACJA)-->019182 PIOTRKÓW KUJAWSKI (STACJA) = 12 Km  
==> Czas jazdy: 9 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
025. 019182 BABIAK (STACJA)-->019174 ZARYŃ (STACJA) = 11 Km  
==> Czas jazdy: 8,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h

026. 019174 BORYSŁAWICE (POSTERUNEK ODGAŁĘ-->019141 BABIAK (STACJA)  
= 17 Km  
==> Czas jazdy: 12,75 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
027. 019141 PONĘTÓW (STACJA WĘZŁOWA)-->019133 BORYSŁAWICE  
(POSTERUNEK ODGAŁĘ = 4 Km  
==> Czas jazdy: 3 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
028. 019133 DĄBIE NAD NEREM (STACJA)-->019158 PONĘTÓW (STACJA  
WĘZŁOWA) = 11 Km  
==> Czas jazdy: 8,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
029. 019158 PODDĘBICE (STACJA)-->019307 DĄBIE NAD NEREM (STACJA) = 26  
Km  
==> Czas jazdy: 19,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
030. 019307 SZADEK (STACJA)-->019364 PODDĘBICE (STACJA) = 24 Km  
==> Czas jazdy: 18 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
031. 019364 DIONIZÓW (POSTERUNEK ODGAŁĘŻNY-->019422 SZADEK (STACJA)  
= 6 Km  
==> Czas jazdy: 4,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
032. 019422 ZDUŃSKA WOLA KARSZNICE (STACJA-->019406 DIONIZÓW  
(POSTERUNEK ODGAŁĘŻNY = 5 Km  
==> Czas jazdy: 3,75 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
033. 019406 CHOCIW ŁASKI (STACJA)-->019562 ZDUŃSKA WOLA KARSZNICE  
(STACJA = 22 Km  
==> Czas jazdy: 16,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
034. 019562 CHORZEW SIEMKOWICE (STACJA WĘZ-->072058 CHOCIW ŁASKI  
(STACJA) = 22 Km  
==> Czas jazdy: 16,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
035. 072058 DZIAŁOSZYN (STACJA)-->072025 CHORZEW SIEMKOWICE (STACJA  
WĘZ = 11 Km  
==> Czas jazdy: 8,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
036. 072025 MIEDŹNO (STACJA)-->071985 DZIAŁOSZYN (STACJA) = 12 Km  
==> Czas jazdy: 9 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
037. 071985 KŁOBUCK (STACJA)-->071944 MIEDŹNO (STACJA) = 12 Km  
==> Czas jazdy: 9 min., V max = 80 km/h

- > Max szybkość na odcinku: 80 Km/h  
038. 071944 HERBY NOWE (STACJA WĘZŁOWA)-->071803 KŁOBUCK (STACJA) = 20 Km  
==> Czas jazdy: 15 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
039. 071803 HERBY NOWE (STACJA WĘZŁOWA)-->063347 LISWARTA (POSTERUNEK ODGAŁĘŻNY = 2 Km  
==> Czas jazdy: 1,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
040. 063347 LISWARTA (POSTERUNEK ODGAŁĘŻNY-->071589 LISÓW (STACJA) = 3 Km  
==> Czas jazdy: 2,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
041. 071589 LISÓW (STACJA)-->071571 KOCHANOWICE (STACJA) = 4 Km  
==> Czas jazdy: 3 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
042. 071571 KOCHANOWICE (STACJA)-->071449 JAWORNICA (POSTERUNEK ODGAŁĘŻN = 4 Km  
==> Czas jazdy: 3 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
043. 071449 DRONIOWICZKI (POSTERUNEK ODGAŁ-->071423 JAWORNICA (POSTERUNEK ODGAŁĘŻN = 3 Km  
==> Czas jazdy: 2,25 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
044. 071423 KRUPSKI MŁYN (POSTERUNEK ODGAŁ-->071118 DRONIOWICZKI (POSTERUNEK ODGAŁ = 12 Km  
==> Czas jazdy: 9 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
045. 071118 TOSZEK PÓLNOC (STACJA WĘZŁOWA)-->070284 KRUPSKI MŁYN (POSTERUNEK ODGAŁ = 14 Km  
==> Czas jazdy: 10,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
046. 070284 PACZYNA (STACJA WĘZŁOWA)-->070243 TOSZEK PÓLNOC (STACJA WĘZŁOWA) = 6 Km  
==> Czas jazdy: 4,5 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
047. 070243 PYSKOWICE (STACJA WĘZŁOWA)-->070201 PACZYNA (STACJA WĘZŁOWA) = 5 Km  
==> Czas jazdy: 3,75 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h
048. 070201 GLIWICE ŁABĘDY (STACJA WĘZŁOWA-->070102 PYSKOWICE (STACJA WĘZŁOWA) = 5 Km  
==> Czas jazdy: 3,75 min., V max = 80 km/h  
--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h

049. 070102 SZOBISZOWICE (POSTERUNEK ODGAŁ-->069740 GLIWICE ŁABĘDY  
(STACJA WĘZŁOWA = 4 Km

==> Czas jazdy: 3 min., V max = 80 km/h

--> Max szybkość na odcinku: 80 Km/h

**PODSUMOWANIE:**

Odległość: 514 km

Liczba osi: 58

Długość poc.: 243,7 m

Przybliżony czas jazdy: 385,5 min.

Czas przyjęcia lokomotywy Elektrycznej 15 min., czas zdania 15 min.

Ciężar hamujący pociągu: 570 Ton, 51 %.

Możliwy przejazd pociągu z przekrozoną skrajnią

Przekroczono dopuszczalną odległość obsługi trakcyjnej dla lokomotywy. Max: 100 Km

KOSZT PRZEWOZU ŁADUNKU: 168 064,00 zł

CENA TARYFOWA: 4 040,00 zł

WSPÓŁCZYNNIK KOREKTY: 41,6

**KOSZTY DOSTĘPU DO INFRASTRUKTURY KOLEJOWEJ:**

Cena przejazdu A: 100,00 zł

Cena przejazdu B: 120,00 zł

Cena przejazdu C: 140,00 zł