

UNIwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu  
Wydział Zarządzania

Izabela Rudek

**Modele decyzyjne w planowaniu wykorzystania  
taboru kolejowego z uwzględnieniem  
przebiegów i napraw okresowych**

(rozprawa doktorska)

PROMOTORZY:

Dr hab. Paweł Hanczar, prof. UE

Dr inż. Daniel Paluszczyński

(*De Montfort University, Leicester, UK*)

Wrocław, 2023

*Dziękuję mojemu Promotorowi,  
dr. hab. Pawłowi Hanczarowi, prof. UE,  
za opiekę naukową, poświęcony czas,  
i cenne rady związane z niniejszą pracą.*

*Składam serdeczne podziękowania  
mojemu drugiemu Promotorowi,  
dr. inż. Danielowi Paluszczyżynowi,  
za owocne dyskusje naukowe  
i wszechstronną pomoc.*

*Szczególne podziękowania składam  
mojemu mężowi Radosławowi,  
moim Rodzicom oraz siostrze Aleksandrze.  
Bez waszego wsparcia ta praca by nie powstała.*

# Spis treści

<b>Wykaz podstawowych definicji i skrótów</b> . . . . .	2
<b>Wstęp</b> . . . . .	3
<b>Rozdział 1. Funkcjonowanie przedsiębiorstw transportu kolejowego</b> . . . . .	15
1.1. Stan taboru kolejowego w Polsce i Unii Europejskiej . . . . .	15
1.2. Uwarunkowania prawne przeglądów i napraw okresowych taboru kolejowego . . . . .	18
1.3. Proces planowania eksploatacji i przeglądów taboru w przedsiębiorstwie transportu kolejowego . . . . .	21
<b>Rozdział 2. Stan wiedzy w obszarze planowania eksploatacji i przeglądów okresowych taboru kolejowego</b> . . . . .	25
2.1. Planowanie eksploatacji i przeglądów okresowych taboru na tle procesów planowania transportu kolejowego w świetle literatury . . . . .	26
2.2. Podsumowanie dotychczas stosowanych metod i modeli dla rozpatrywanych problemów planowania taboru kolejowego . . . . .	33
2.3. Metody badań operacyjnych w rozwiązywaniu zagadnień planowania eksploatacji i przeglądów okresowych taboru . . . . .	45
<b>Rozdział 3. Modele decyzyjne dla problemów planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem przeglądów okresowych</b> . . . . .	49
3.1. Architektura opracowanych modeli decyzyjnych . . . . .	50
3.2. Sformułowanie problemu i model matematyczny . . . . .	53
3.3. Własności i złożoność obliczeniowa problemu . . . . .	59
3.4. Metody dokładne w rozwiązywaniu zadania planowania eksploatacji taboru kolejowego . . . . .	64
3.4.1. Przegląd zupełny . . . . .	65
3.4.2. Metoda podziału i ograniczeń . . . . .	66
3.5. Metody przybliżone w rozwiązywaniu zadania planowania eksploatacji taboru kolejowego . . . . .	70
3.5.1. Algorytmy heurystyczne . . . . .	71
3.5.2. Algorytmy metaheurystyczne . . . . .	76
<b>Rozdział 4. Eksperymenty obliczeniowe dla modeli decyzyjnych</b> . . . . .	81
4.1. Opis eksperymentów . . . . .	82
4.2. Badanie metod dokładnych . . . . .	85
4.3. Badanie metod przybliżonych . . . . .	94
4.4. Wnioski końcowe z eksperymentów . . . . .	124
<b>Podsumowanie pracy</b> . . . . .	127
<b>Bibliografia</b> . . . . .	129

# Wykaz podstawowych definicji i skrótów

## Definicje:

- problem – zbiór danych wejściowych i ich definicje oraz pytanie lub polecenie do wykonania
- algorytm – procedura działająca w skończonym czasie rozwiązująca dany problem, określająca ciąg czynności elementarnych, które należy w tym celu wykonać
- iteracja – wielokrotne użycie tej samej procedury z góry określoną liczbę razy lub aż do spełnienia określonego warunku
- instancja problemu – konkretny problem z ustalonymi wartościami danych wejściowych
- model matematyczny – obejmuje istotne cechy i zjawiska w formie struktury matematycznej determinując sytuację decyzyjną
- model decyzyjny – połączenie teoretycznego odwzorowania problemu rzeczywistego w formie modelu matematycznego wraz z metodą rozwiązania tegoż problemu w postaci algorytmu optymalizacji

## Skróty:

- DSU – dokumentacja systemu utrzymania
- ECM – ang. *Entity in Charge of Maintenance*, podmiot odpowiedzialny za utrzymanie pojazdu kolejowego
- TBM – ang. *time-based maintenance*, polityka utrzymania pojazdu kolejowego oparta na czasie, poziom przeglądów i napraw okresowych ma zdefiniowany resurs czasowy
- DBM – ang. *distance-based maintenance*, polityka utrzymania pojazdu kolejowego oparta na przebiegu kilometrowym, poziom przeglądów i napraw okresowych ma zdefiniowany resurs kilometrowy

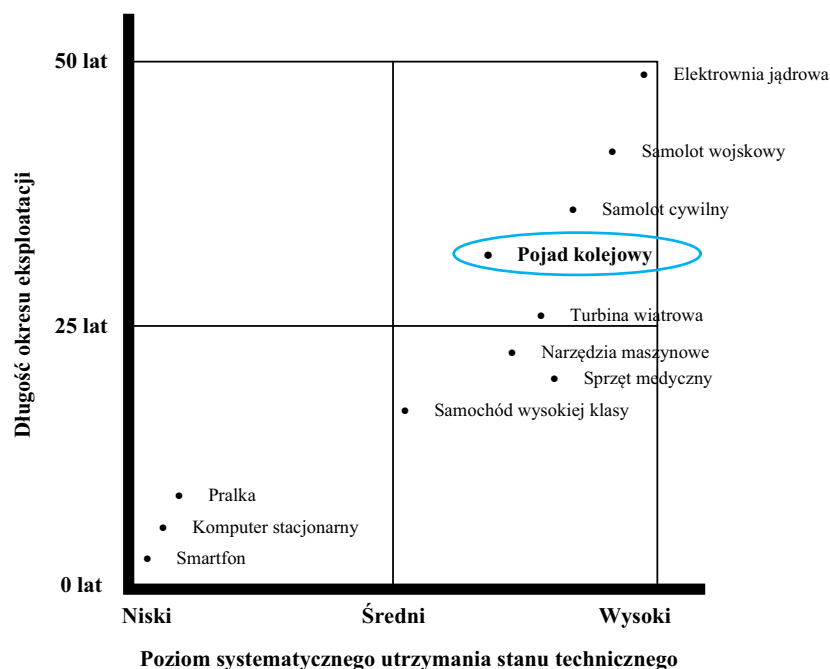
# Wstęp

Transport to jeden z podstawowych obszarów gospodarki narodowej. Stanowi instrument wymiany handlowej odpowiadając za konkurencyjność przemysłu i sektora usług. Realizuje cele zarówno o znaczeniu społecznym (np. zaspokojenie potrzeb komunikacyjnych), jak i państwowym (np. element obronności kraju). Transport kolejowy jest powszechnie używany do przewozu pasażerów oraz dowolnego rodzaju towarów (m.in. produktów rolnych, paliw konwencjonalnych, materiałów niebezpiecznych). Znajduje zastosowanie szczególnie w przypadku dużego wolumenu ładunku do przewiezienia (np. transport węgla z kopalni, paliwo w cysternach z rafinerii, zboże do młyna) oraz gdy występuje duża odległość do miejsca dostawy. W porównaniu ze zmotoryzowanymi środkami transportu, kolej jest bezpieczniejsza oraz bardziej energooszczędna, będąc jednocześnie źródłem stosunkowo mniejszej ilości zanieczyszczeń [123, 154]. Szczególnie aspekt ekologiczny kolei cieszy się powszechnym uznaniem, ponieważ uważana jest „(...) za »zielony« środek transportu, przynajmniej »bardziej zielony« niż samochody i samoloty, jeśli chodzi o jej względny wpływ na zmiany klimatu” [51]. Dlatego też, gdy celem jest zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska naturalnego związanego z działalnością transportową, tabor kolejowy to niekwestionowana alternatywa w zaspakajaniu popytu na transport.

W Białej Księdze Transportu (ang. *White Paper on Transport*), która jest zwyczajowo przyjętą i ugruntowaną formą zapisu europejskich dokumentów strategicznych związanych z transportem, wskazano, że „transport kolejowy jest dosłownie sektorem strategicznym, od którego zależeć będzie powodzenie wysiłków zmierzających do zmiany równowagi (między rodzajami transportu)” [122]. Jednym ze sztandarowych założeń kolejnej odsłony Białej Księgi z roku 2011 jest to, aby odciążyć ruch drogowy transportu towarów na odległości większe niż 300 km. W związku z tym, do 2030 roku 30% tego typu transportu musi zostać przeniesiona na inne środki transportu, przede wszystkim kolej, zaś do 2050 roku powinno to być 50% [136]. Obecna transformacja rynków przewozów kolejowych nie przebiega we wszystkich państwach członkowskich w ten sam sposób. Jednakże pierwsze efekty rozwoju i liberalizacji jednolitego europejskiego obszaru kolejowego, które sprzyjają wejściu nowym podmiotom na krajowe rynki kolejowe są już widoczne. Średni udział konkurentów zarówno przewozów pasażerskich i towarowych w sektorze kolejowym państw Unii Europejskiej rośnie corocznie [123, 130]. Przykładowo wspomniany udział dla trans-

portu towarowego wzrósł o 8 punktów procentowych w latach 2015 – 2018. Zarówno rynek przewozów pasażerskich i towarowych ma trend wzrostowy w ostatnich latach [123] i będzie się nasilać w wyniku odciążenia ruchu drogowego przez transport kolejowy [136]. W następstwie tego osiągnięcie i utrzymanie przewagi konkurencyjnej przez podmioty, nowe oraz funkcjonujące od lat na rynku, stanie się bardziej wymagające niż dotychczas.

W literaturze przedmiotu *konkurencyjność przedsiębiorstwa* jest definiowana w rozmaity sposób [32]. Część badaczy wskazuje, że podmioty osiągają przewagę na rynku dzięki poprawie jakości dóbr oraz usług i/lub redukcji ich względnych kosztów, jednocześnie umożliwiając zwiększenie zysków i/lub udziału w rynku [31]. Strategia przywództwa kosztowego to jedna z trzech zasadniczych strategii konkurencji zaproponowanych przez Portera [100]. Wiąże się z podejmowaniem przez przedsiębiorstwo działań ukierunkowanych na redukcję kosztów, czyli osiągnięciu tych samych korzyści przy niższych kosztach [6, 100]. Zarządzanie taborem kolejowym jest głównym czynnikiem kosztowym przedsiębiorstw kolejowych [49]. Jest to uwarunkowane ceną zakupu oraz kosztami operacyjnymi, które wynikają z eksploatacji i utrzymania usług transportowych [47]. Produkty o długim okresie użytkowania, zaawansowaniu technologicznym i dużej wartości, wymagają przez cały cykl życia systematycznego utrzymania stanu technicznego na wysokim poziomie, który ma krytyczne znaczenie dla ich niezawodności [103]. Pojazdy kolejowe należą do tego grona, patrz Rysunek 1.



Rysunek 1: Przykładowe zestawienie długości okresu użytkowania oraz poziomów systematycznego utrzymania stanu technicznego obiektów w różnych obszarach [103]

Utrzymanie tak złożonych obiektów, w tym floty kolejowej, lotniczej czy obiektów produkcyjnych, może często przekroczyć koszty ich rozwoju i produkcji [176]. Biorąc pod uwagę, że pojazdy kolejowe mogą być eksploatowane od 30 do 50 lat, to średni roczny

koszt przeglądów i napraw okresowych sięga 4% ich wartości i wynosi co najmniej 50% całkowitych kosztów [3, 34]. Z biegiem lat wydatki na utrzymanie cały czas rosną, co jest spowodowane podwyżką cen komponentów, części wagonów kolejowych [93] oraz kosztów pracy [1]. Dodatkowo niniejszym kosztom towarzyszą nakłady finansowe związane z brakiem dostępności taboru, który podlegając czynnościom konserwacyjnym nie może realizować zadań transportowych, tzw. koszty przestoju. Natomiast przeglądy i naprawy okresowe, w literaturze określane jako (ang. *preventive maintenance*), mają na celu zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia nagłych i ukrytych awarii w systemie poprzez zaplanowane wcześniej działania takie jak inspekcje, remonty, czy też modernizacje [69]. O rosnącym zapotrzebowaniu na rozwiązania w zakresie przeglądów i napraw okresowych świadczy fakt, że wielkość rynku segmentu nowych urządzeń została zdominowana przez sektor utrzymania i obsługi posprzedażowej w światowym przemyśle pojazdów szynowych [165]. Międzynarodowy rynek przeglądów technicznych i napraw w branży kolejowej szacowany jest od 45 do 50 milionów euro rocznie [35] i wciąż rośnie. Jest to szczególnie widoczne w Stanach Zjednoczonych, analizując dla tego obszaru gospodarki na przykład wskaźnik zatrudnienia [127] oraz liczbę przedsiębiorstw [63], które zwiększają się nawet w czasie pandemii koronawirusa (COVID-19). Ponadto badania w tej tematyce pokazują, że kilkuprocentowa poprawa planów przeglądów i napraw okresowych floty kolejowej może przełożyć się na duże oszczędności finansowe [5, 45, 192]. Zatem dźwignią konkurencyjności przedsiębiorstw transportu kolejowego może być optymalizacja działań związanych z utrzymaniem floty, która jednocześnie zapewnia wymagany poziom bezpieczeństwa i wolumen przewozów przy jak najniższych kosztach.

Polska należy do grupy państw o największej wydajności towarowego transportu kolejowego w Unii Europejskiej oraz jest druga pod względem wielkości przewożonych ładunków [39, 130]. Pomimo planów inwestycyjnych w pojazdy kolejowe (trakcyjne i doczepiane) dedykowane zarówno przewozom pasażerskim i towarowym na dużą skalę do 2030 roku [167, 168], stan techniczny taboru w Polsce jest niezadowalający, ponieważ w większości jest to przestarzały park. Średni wiek pojazdów u przewoźników pasażerskich i towarowych przekracza 25 lat [139]. Ponadto wyniki kontroli Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego (UTK) na zlecenie NIK wykazały nieprawidłowości u ponad 40% jednostek kontrolowanych w zakresie nierzetelnego prowadzenia czynności utrzymaniowych i nierzetelnego prowadzenia dokumentacji dotyczące eksploatacji pojazdów kolejowych [139]. Obecny stan eksploatowanego taboru kolejowego w Polsce obniża poziom bezpieczeństwa ruchu kolejowego, który wynika z wysokiej liczby usterek.

Awaria w systemie kolejowym nie tylko powoduje duże straty ekonomiczne, ale również negatywnie wpływa na bezpieczeństwo i środowisko, a także może generować koszty społeczne. Skrajnym przykładem są katastrofy kolejowe, które w dużej mierze są spowodowane brakiem lub zaniedbaniami w zakresie przeglądów i napraw. Przykładem takich wydarzeń jest katastrofa pociągu Curinga we Włoszech, gdzie podczas kursu odłączyło się

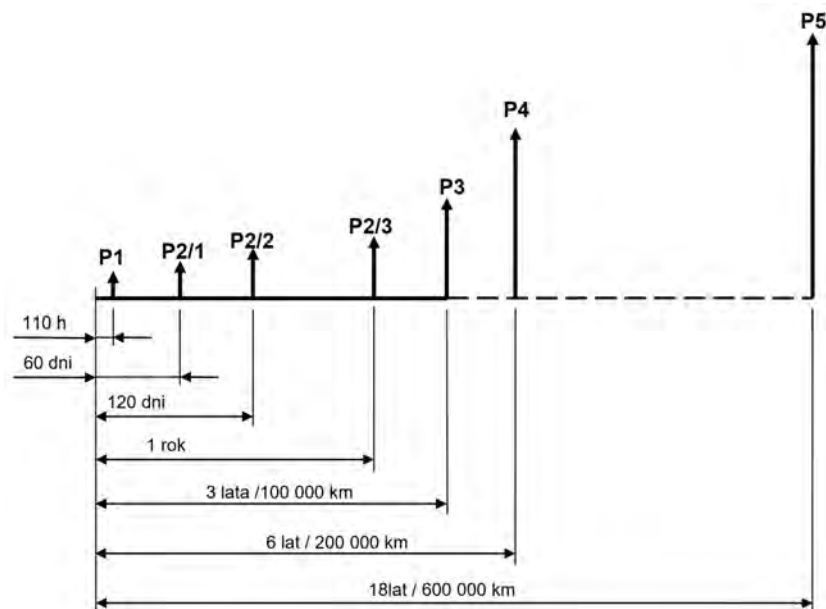
28 wagonów przez pęknięty zacisk łączący wagony [109, 169]. Jedną z ostatnich głośnych katastrof, z czerwca 2021 roku, dotyczyła wykolejenia się dwóch pociągów pakistańskich kolei państwowych [156, 157]. Był to efekt zaniedbań na poziomie przeglądów i napraw starzejącej się sieci, przez co zginęło również wiele osób. Inny przykład katastrofy spowodowanej nieprawidłowym utrzymaniem, to wykolejenie się pociągu towarowego w pobliżu amsterdamskiego dworca głównego w listopadzie 2008 roku [14]. W wyniku tego zdarzenia poniesiono wysokie koszty naprawy infrastruktury, ponieważ uszkodzeniu uległy szyny i zwrotnice na długości 500 metrów. Ponadto zamknięto jeden z najbardziej intensywnie użytkowanych torów kolejowych w Holandii, co oznaczało ogromne zakłócenia w ruchu kolejowym w pobliżu Amsterdamu. Wypadki kolejowe spowodowane różnymi awariami mają ogromny wpływ społeczny [191] i ekonomiczny [41, 78]. Jest on na tyle istotny, że naukowcy badają różne modele dotyczące ryzyka związanego z eksploatacją kolei [109]. Usterki techniczne nie można całkowicie wyeliminować, szczególnie w tak złożonym systemie jak transport kolejowy. Natomiast poprzez prewencyjne przeglądy, w tym monitorowanie stanu, inspekcje, drobne naprawy, można zapobiegać awariom lub ograniczać ich skutki.

Przeglądy i naprawy okresowe, dbając o systematyczne utrzymanie taboru kolejowego, są obligatoryjne i uregulowane przepisami prawa [141, 142, 148]. Brak regularnych przeglądów lub zaniedbania w tym zakresie mogą skutkować wysoką karą, a w przypadku dużej skali zdarzenia będące wynikiem tychże czynności, również zarzut spowodowania katastrofy w ruchu lądowym, który podlega karze pozbawienia wolności (art. 173 Kodeksu Karnego) [117]. Podmiot odpowiedzialny za utrzymanie (ang. *Entity in Charge of Maintenance – ECM*) jest zobowiązany do realizacji procesu utrzymania sprawności operacyjnej pojazdów kolejowych zgodnie z dokumentacją systemu utrzymania (DSU) [141]. Stanowi ona zbiór wymagań określających sposób i zakres wykonywania przeglądów i napraw okresowych, który jest formułowany na podstawie typu i serii pojazdu przez producenta. Jednym z kluczowych aspektów w dokumentacji jest struktura *cyklu przeglądowo-naprawczego* będąca „*kolejnością występowania po sobie poszczególnych rodzajów przeglądów i napraw*” [142]. W pełnym cyklu naprawczym liczba poziomów utrzymania w zależności od pojazdu może się różnić. Załącznik nr 3 do Rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych [142], a także Międzynarodowy Standard Branży Kolejowej (ang. *International Railway Industry Standard*) – IRIS [131] zasadniczo określają pięć poziomów utrzymania. Wyróżniamy następujące poziomy wraz z terminologią stosowaną w praktyce gospodarczej [76, 131]:

- Poziom 1 (P1) - przegląd kontrolny;
- Poziom 2 (P2) - przegląd okresowy mały;
- Poziom 3 (P3) - przegląd okresowy duży;
- Poziom 4 (P4) - naprawa rewizyjna;
- Poziom 5 (P5) - naprawa główna.



Jednakże zdarzają się pojazdy, dla których pełny cykl przeglądowo-naprawczy ma trzy lub cztery poziomy utrzymania ([71], bądź jeden z nich jest podzielony na kolejne podpoziomy (Rysunek 2). Ważne jest to, by wszystkie działania przewidziane dla przeglądów i napraw okresowych danego pojazdu kolejowego były wykonane, niezależnie od przypisanego poziomu. Każdy poziom utrzymania ma zdefiniowany resurs czasowy (ang. *time-based maintenance* – TBM) i resurs kilometrowy (ang. *distance-based maintenance* – DBM). Resurs to ustalony okres pracy sprzętu, wyrażony w jednostce czasu (resurs czasowy) oraz odległości (resurs kilometrowy), który jest gwarantem bezpieczeństwa i sprawności operacyjnej taboru podczas eksploatacji. Wykonanie przeglądu danego poziomu w określonym pojeździe jest obowiązkowe, kiedy przebieg przekroczy jedną z miar resursu dla wspomnianego poziomu.



Rysunek 2: Przykład cyklu przeglądowo-naprawczego dla czasu pracy lokomotywy [26]

Różnica między poziomami utrzymania nie tylko dotyczy stopnia zaawansowania wymaganych prac [142]. Koszty oraz czas trwania przeglądów i napraw zwiększa się wraz ze wzrostem poziomu konserwacji danego pojazdu kolejowego. Rozpiętość cenowa oraz czasowa jest bardzo duża i w głównej mierze zależy od typu i serii pojazdu. Dla przykładu, czas trwania przeglądu dla poziomu P1 może wynosić 7 godzin i kosztować około 1000 zł, jednakże poziom P5 wymaga poświęcenia co najmniej półtora miesiąca prac związanych z naprawą, a jego cena jest rzędu miliona zł [162]. Dla struktury przeglądów w sektorze kolejowym znamienne jest to, że przegląd wyższego poziomu zawiera przeglądy niższego poziomu. Przykładowo, wykonanie poziomu P4 jest równoważne z realizacją wykonania przeglądów poziomu P3, P2 i P1, zatem również związane z nimi przebiegi pojazdu kolejowego są zerowane. Ponadto poziom utrzymania transportu kolejowego można kolejno ze sobą łączyć, a termin wykonania przyspieszać. Ten aspekt zarządzania taborem kolejowym

wym ujawnia różnorodność podproblemów planowania przeglądów i napraw okresowych, z którymi mierzą się przedsiębiorstwa transportu kolejowego.

Niniejsza rozprawa dotyczy problematyki wspomaganie decyzji w przedsiębiorstwie transportu kolejowego w zakresie procesu planowania eksploatacji przy uwzględnieniu wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych pojazdów kolejowych w celu zwiększenia ich technicznej dostępności. Można to osiągnąć poprzez odpowiedni przydział taboru do zadań przewozowych w taki sposób, aby obniżyć liczbę oraz częstotliwość przeglądów i napraw ustalanych w planach utrzymania floty dla zadanego horyzontu czasowego [58, 104]. Dostępność (*ang. availability*) jest rozpatrywana jako całkowity czas, dla którego pojazd kolejowy będzie gotowy do natychmiastowej realizacji zadań przewozowych we wskazanym terminie, przy założeniu, że okoliczności zewnętrzne to umożliwiają. Przeszkodą w tych działaniach są przeglądy i naprawy okresowe (obligatoryjne w świetle nie tylko polskiego prawodawstwa), których wykonanie wymaga wyłączenia pojazdu z eksploatacji. Dlatego też uzasadnione jest by przedsiębiorstwa transportu kolejowego dążyły do zmniejszenia czasu poświęcanego na utrzymanie taboru i kosztów, które się z tym wiążą (koszty przeglądów i napraw okresowych, koszty przestoju pojazdu, koszty zlecenia zadań na zewnątrz). Zatem kluczowe i ekonomicznie uzasadnione jest, aby przeglądy wykonywane były w możliwie najpóźniejszym terminie, tj. wynikały z rezerwy czasowej. Takie podejście pozwala na możliwości zminimalizowania czasu na przeglądach okresowych i jednocześnie maksymalną eksploatację posiadanych zasobów realizujących zadania przewozowe. W praktyce, biorąc pod uwagę specyfikę branży kolejowej, to zwiększenie wykorzystania taboru nawet o kilka procent może przełożyć się na wzrost przychodów o setki tysięcy złotych rocznie dla przedsiębiorstwa [58].

Przedstawione badania rozpatrują pełny cykl przeglądowo-naprawczy całego składu taboru kolejowego (*ang. train based maintenance*), a nie oddzielnych cykli każdej jednostki w składzie np. wagonu (*ang. car based maintenance*) [113]. Takie założenie pozwala na skoncentrowanie się na głównym problemie badawczym. Stąd też w rozważanych scenariuszach będziemy analizować DSU lokomotyw, jako przykładu pojazdów szynowych z własnym napędem, będących kluczowym i jednym z najdroższych zasobów przedsiębiorstw transportu kolejowego. Jednakże proponowane modele i rozwiązania mogą być również dedykowane innym samobieżnym pojazdom, które skonstruowano do przewozu pasażerów lub towarów koleją, jak np. pociągi (w których skład wchodzi również lokomotywy) [143] czy wagony silnikowe. W związku z tym, w rozprawie prócz terminu lokomotywy, będą stosowane zamiennie następujące określenia jak: pociągi, pojazdy kolejowe, pojazdy szynowe, tabor kolejowy, flota kolejowa.

W literaturze przedmiotu istnieje luka, która dotyczy badania wpływu zmiany przydziału taboru kolejowego do zadań przewozowych (*rolling stock scheduling*) na plan przeglądów i napraw okresowych tegoż taboru (*preventive maintenance schedule*). Badania

nad utrzymaniem w branży kolejowej dotyczą w głównej mierze infrastruktury kolejowej i koncentruje się na jej aspektach technicznych, np. [13, 59, 73, 92, 185, 188]. Przeglądy i naprawy okresowe w problemach floty kolejowej są często pomijana w literaturze [36, 80, 85]. Niewiele jest badań dotyczących podejmowania decyzji ukierunkowanych na planowanie utrzymania związanego z obciążeniem każdego pociągu zadaniami przewozowymi, przykładem takich prac są [45, 71, 76]. W publikacjach dotyczących eksploatacji taboru kolejowego, gdzie są uwzględnione czynności związane z utrzymaniem floty, celem jest optymalizacja innych procesów decyzyjnych np. tras pociągów [82–84], liczby zaangażowanego taboru [17, 49, 50, 189], obciążeń warsztatów [94]. Jednakże w dotychczasowych badaniach, przeglądy i naprawy okresowe rozpatrywane są jako ograniczenie bądź stanowią jedną z wielu zmiennych w modelach. Proponowane rozwiązania nie uwzględniają pełnego cyklu przeglądowo-naprawczego rozpatrywanej floty. Ponadto większość prac rozważa tylko jeden wybrany resurs [20, 49, 113, 192], czasowy bądź kilometrowy oraz uwzględnia jeden typ pojazdów, koncentrując się na krótkich horyzontach czasowych planów eksploatacji taboru kolejowego. Z perspektywy analizowanego problemu nie jest to pragmatyczne podejście.

Należy zauważyć, że badania dotyczące poprawy wykorzystania taboru kolejowego opierają się głównie na programowaniu matematycznym, czyli metodach dokładnych (ang. *exact methods*) np. [43–45, 94]. Jest to zaskakujące, ponieważ to metody przybliżone (ang. *approximate methods*), a w szczególności algorytmy genetyczne, stanowią najczęściej opisywaną metodą optymalizacji przeglądów okresowych w gospodarce [5]. Ponadto znakomita większość problemów dotycząca taboru kolejowego może być rozwiązywalna wielomianowo dla pojedynczych przypadków (np. dla jednego składu pociągu, kilkudniowy horyzont czasowy), ale wersja optymalizacyjna dla rzeczywistego rozmiaru problemu jest najprawdopodobniej NP-trudna (ang. *NP-hard problems*) np. [20, 61, 89]. Według najlepszej wiedzy autora niniejszej dysertacji istnieje zaledwie kilka prac, gdzie zastosowano nowoczesne metody optymalizacji dedykowane problem trudnym obliczeniowo jak symulowane wyżarzanie czy algorytm genetyczny (m.in. [58, 75, 76, 113]). W związku z tym przegląd literatury światowej wskazuje, że problem planowania eksploatacji przy uwzględnieniu przeglądów i napraw okresowych dla taboru kolejowego był rozpatrywany w niewystarczającym zakresie.

Prezentowane zagadnienie badawcze stanowi problem rzeczywisty i wynika z zapotrzebowania biznesu, ale również jest wyzwaniem naukowym. Ponieważ w poszukiwaniu odpowiedzi niezbędna jest analiza dużej liczby konfiguracji planów przypisania zadań przewozowych do lokomotyw i wybranie najlepszego rozwiązania w czasie akceptowalnym przez decydenta. Opracowanie reprezentacji rozwiązań, w postaci planów eksploatacji taboru kolejowego, ukierunkowane na optymalizację przyjętych kryteriów czasowych przy zadanych ograniczeniach, z reguły jest trudnym problemem obliczeniowym (co też zostanie udowodnione w niniejszej rozprawie). Natura tychże problemów jest taka, że wraz ze wzro-

stem rozmiaru instancji problemu, czas potrzebny na znalezienie rozwiązania optymalnego (z perspektywy ustalonego kryterium, np. maksymalizacja dostępności taboru) rośnie wykładniczo [7, 11]. Zatem dla większych, rzeczywistych instancji problemu (tj. od kilkunastu lokomotyw, ponad roczny horyzont planowania), obliczenia mające na celu znalezienie rozwiązania optymalnego przy zastosowaniu algorytmów opartych o metody dokładne trwałyby latami. Dlatego też zasadne jest nie tylko zastosowanie podejść dokładnych, które mają sens praktyczny dla mniejszych rozmiarów instancji (tj. do kilku lokomotyw, do rocznego horyzontu planowania) analizowanych problemów, ale przede wszystkim opracowanie algorytmów opartych o metody przybliżone tj. heurystyczne i metaheurystyczne. Z reguły pozwalają one na przeszukiwanie zbioru rozwiązań optymalizujące ustalone kryteria w ramach istniejących ograniczeń w czasie wielomianowym. W znakomitej większości są uznawane za efektywne, ponieważ jakość i czas dostarczanych rozwiązań często są akceptowalne przez decydenta.

W niniejszej rozprawie model decyzyjny jest rozpatrywany jako połączenie teoretycznego odwzorowania problemu rzeczywistego w formie modelu matematycznego wraz z metodą rozwiązania tegoż problemu w postaci algorytmu optymalizacji. Na podstawie przeglądu literatury oraz przesłanek praktyki gospodarczej sformułowano cel oraz hipotezy badawcze rozprawy:

***Celem** pracy jest opracowanie modeli decyzyjnych bazujących na metodach badań operacyjnych wspomagających planowanie eksploatacji taboru kolejowego przy uwzględnieniu przeglądów i napraw okresowych.*

**Hipoteza główna:** Przy zastosowaniu metod badań operacyjnych można zwiększyć techniczną dostępność pojazdów w przedsiębiorstwie kolejowym poprzez opracowanie modeli decyzyjnych planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych.

**Hipotezy szczegółowe:**

**H1:** Problem planowania eksploatacji taboru kolejowego przy uwzględnieniu wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych należy do klasy problemów NP-trudnych.

**H2:** Możliwe jest skonstruowanie algorytmów dokładnych dla modeli decyzyjnych planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych, które dostarczają rozwiązania optymalne dla małych instancji problemu.

**H3:** Możliwe jest skonstruowanie algorytmów heurystycznych i metaheurystycznych dla modeli decyzyjnych planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych, które pozwalają na uzyskanie rozwiązań dążących do optimum dla dużych instancji problemu w czasie wielomianowym.

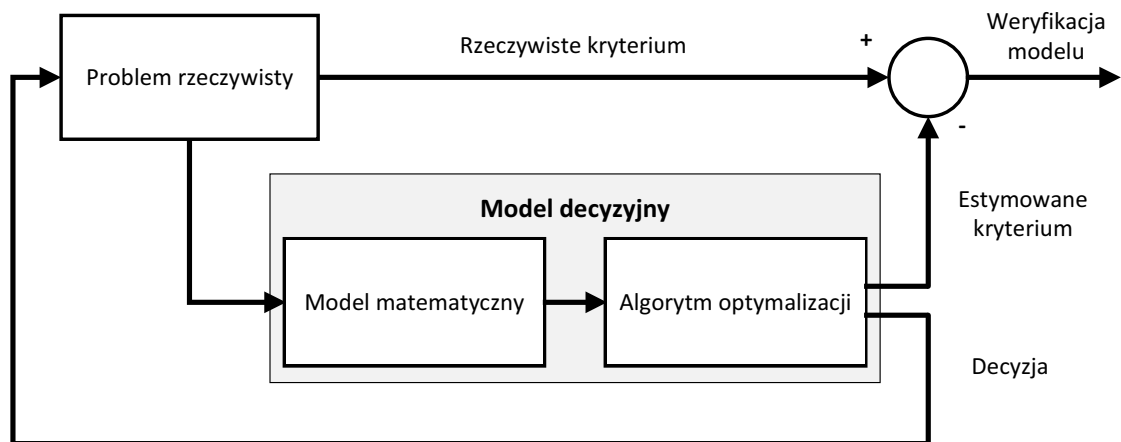
Planowanym rezultatem przeprowadzonych badań będą nowe *modele decyzyjne* zawierające model matematyczny problemu wraz z algorytmami jego rozwiązania, które poprawią w rozsądnym czasie (akceptowalnym przez decydenta) jakość dostarczanych rozwiązań dla planów eksploatacji taboru kolejowego przy uwzględnieniu wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych. Efekty badań będą wspomagały proces planowania i podejmowania decyzji w przedsiębiorstwach świadczących usługi transportu kolejowego w zakresie zarządzania i utrzymania taboru kolejowego.

Dla rozpatrywanego procesu decyzyjnego dotyczącego planowania eksploatacji taboru kolejowego, zgodnie z klasycznym podejściem, można wyróżnić następujące fazy: identyfikacja sytuacji decyzyjnej, sformułowanie problemu decyzyjnego, zbudowanie modelu decyzyjnego, wyznaczenie decyzji dopuszczalnych i decyzji wystarczających lub decyzji optymalnych oraz podjęcie ostatecznej decyzji [91]. Reprezentacja rozwiązań, w postaci planów eksploatacji taboru kolejowego przy uwzględnieniu wielopoziomowych przeglądów, będzie bazowała na sformułowanych w pracy modelach decyzyjnych. Modelowanie sytuacji decyzyjnej opartej na badaniach operacyjnych sprowadza się do następujących etapów [24, 112]:

1. Formułowanie problemu decyzyjnego.
2. Budowa modelu matematycznego lub jego odpowiednika w wersji symulacyjnej.
3. Pozyskanie i przetwarzanie informacji niezbędnej do ustalenia parametrów modelu.
4. Procedura obliczeniowa za pomocą wybranego algorytmu (eksperymenty obliczeniowe).
5. Analiza jakości rozwiązań modelu oraz weryfikacja modelu.
6. Weryfikacja modelu, sprawdzenie jego adekwatności.
7. Wdrożenie rozwiązania.

Model decyzyjny jest fundamentalny dla rozpatrywanego procesu decyzyjnego dotyczącego planowania eksploatacji taboru kolejowego (Rysunek 3). Zaplanowanie harmonogramu przydziału taboru do zadań przewozowych z uwzględnieniem przeglądów i napraw okresowych w przedsiębiorstwie kolejowym to problem rzeczywisty, który jest sprowadzony (zamodelowany) do postaci modelu matematycznego. Zbudowany model (zgodnie z zasadą *Brzytwy Ockhama*, mówiącej o dążeniu do prostoty) zawiera istotne cechy i zjawiska w postaci struktury matematycznej determinując sytuację decyzyjną. Bazuje na kluczowych elementach rzeczywistości, ważnych z punktu widzenia analizowanego problemu. Problem decyzyjny, a dokładniej instancja problemu decyzyjnego, jest rozwiązywana przy użyciu wybranego algorytmu (opartego o metody dokładne lub przybliżone). Rezultatem eksperymentu obliczeniowego jest rozwiązanie w postaci gotowej i najlepszej propozycji planu eksploatacji taboru kolejowego (spełniający wszystkie założenia modelu). Rozwiązanie jest wybierane na podstawie wartości kryterium, to jest maksymalnej dostępności taboru, obliczone na bazie planu przeglądów wygenerowanego z jednej z propozycji planów

eksploatacji. Otrzymany plan stanowi wariant rozwiązania problemu rzeczywistego, który jest rozwiązaniem możliwie najlepszym z perspektywy badanego kryterium (tj. maksymalnej dostępności taboru). Opracowane modele decyzyjne zostaną zweryfikowane w oparciu o analizę teoretyczną dla wybranych scenariuszy. Polegać ona będzie na porównaniu, w ramach każdego scenariusza, wartości kryterium uzyskanej przez model decyzyjny w odniesieniu do wyników eksperymentów obliczeniowych uwzględniających przeglądy okresowe taboru uzyskane dla stałego przypisania lokomotyw do zadań. Natomiast realna weryfikacja opracowanych modeli decyzyjnych może być przeprowadzona jedynie w warunkach rzeczywistych. Na podstawie otrzymanych rozwiązań, decydent może podjąć realne decyzje dotyczące planu eksploatacji taboru z uwzględnieniem wielopoziomowych przeglądów, które zostaną sprawdzone w praktyce gospodarczej. W takim przypadku weryfikacja zaproponowanych modeli (etapy 6, 7), polegałaby na wyliczeniu różnicy między wartością estymowanego kryterium (obliczonym w wyniku eksperymentów numerycznych), a wartością rzeczywistego kryterium (będącym efektem wdrożonego planu w przedsiębiorstwie, obliczonym po jego realizacji). Im mniejsza wartość błędu, tym model lepiej odwzorowuje rzeczywistość i jest bardziej użyteczny. Rysunek 3 prezentuje umiejscowienie modelu decyzyjnego w procesie podejmowania decyzji dotyczącej planowania taboru kolejowego.



Rysunek 3: Proces decyzyjny planowania eksploatacji taboru kolejowego

Niniejsza rozprawa posiada następującą strukturę. Wprowadzenie w tematykę funkcjonowania przedsiębiorstw transportu kolejowego opisano w Rozdziale 1. Przedstawiono dotychczasowy stan taboru w Polsce i planowane w tym zakresie inwestycje przewoźników w najbliższym czasie. Zaprezentowano również najważniejsze cele i działania europejskiej polityki transportowej w ujęciu transportu kolejowego (Rozdział 1.1). Następnie przybliżono uwarunkowania prawne dotyczące przeglądów i napraw okresowych taboru kolejowego (Rozdział 1.2). W Rozdziale 1.3 przybliżono proces planowania eksploatacji taboru w przedsiębiorstwie transportu kolejowego.

W Rozdziale 2 zaprezentowano dotychczasowy stan wiedzy dla rozpatrywanego problemu. W pierwszej kolejności dokonano kompleksowego przeglądu literatury dla procesu planowania w transporcie kolejowym i przeprowadzono analizę wizualizacji mapowania bibliometrycznego (Rozdział 2.1). Dalej na podstawie systematycznego przeglądu literatury (ang. *systematic literature review*, SLR) zidentyfikowano lukę badawczą oraz podsumowano stosowane dotychczas metody i modele rozwiązań dla badanego problemu (Rozdział 2.2). Następnie przeprowadzono zgrubną ocenę stosowanych metod badań operacyjnych w literaturze przedmiotu i określono metody optymalizacji dedykowane modelom decyzyjnym proponowanym w niniejszej rozprawie (Rozdział 2.3).

Meritum rozprawy stanowią dwa kolejne rozdziały, w których autor przedstawia oryginalne rezultaty własne uzyskane dla problemu planowania eksploatacji taboru kolejowego przy uwzględnieniu wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych.

Podstawowym rezultatem Rozdziału 3 jest wprowadzenie nowych modeli decyzyjnych, które są odpowiedzią na lukę badawczą rozpatrywanego problemu. Na początku zaprezentowano w architekturę modeli decyzyjnych, w tym działania modelu matematycznego wraz z metodami rozwiązań (Rozdział 3.1). Następnie formalnie sformułowano problem planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem wielopoziomowych przeglądów w formie modelu matematycznego (Rozdział 3.1). W Rozdziale 3.3 określono własności problemu i jego złożoność obliczeniową, by ocenić które metody rozwiązania zaprojektować, aby były efektywne obliczeniowo. Dalej opisano zaproponowane przez autora metody dokładne (Rozdział 3.4), w tym algorytm przeglądu zupełnego (Rozdział 3.4.1) oraz podziału i ograniczeń (Rozdział 3.4.2). Natomiast w ramach metod przybliżonych (Rozdział 3.5) zaprojektowano algorytmy heurystyczne (Rozdział 3.5.1) tj. *Balance Heuristic* (BH), *Balance Mileage to Maintenance Heuristic* (BM2MH), *Nawaz-Enscore-Ham* (NEH) oraz metaheurystyczne (Rozdział 3.5.2) tj. algorytm symulowanego wyżarzania (*simulated annealing*, SA), algorytm genetyczny (*genetic algorithm*, GA).

W Rozdziale 4 dokonano analizy efektywności algorytmów dokładnych i przybliżonych, stanowiące metody rozwiązań dedykowane rozpatrywanemu problemowi, jednocześnie będące istotną częścią opracowanych nowych modeli decyzyjnych. Jakość dostarczanych wyników oraz efektywność obliczeniowa niniejszych metod została zbadana na podstawie wybranych studiów przypadku (ang. *case study*). Na początku określono wersję ogólną danych wejściowych rozważanych instancji problemu, ustawień dla algorytmów oraz sposobu oceny modeli decyzyjnych (Rozdziale 4.1). Następnie przedstawiono rezultaty analizy eksperymentalnej przeprowadzonej dla metod dokładnych (Rozdział 4.2). Prócz weryfikacji generowania rozwiązań optymalnych dla małych rozmiarów instancji, zbadano czas dostarczanych wyników przez algorytmy dokładne w odniesieniu do rozmiaru danych wejściowych problemu. W Rozdziale 4.3 przeprowadzono ocenę rozwiązań dla małych instancji dostarczanych przez metody przybliżone na podstawie błędu względnego. Następnie dla tych samych algorytmów przeprowadzono eksperymenty numeryczne dla

dużych rozmiarów instancji problemu, odzwierciedlających rzeczywiste warunki procesów decyzyjnych w przedsiębiorstwie transportowym. W Rozdziale 4.4 zawarto ranking najlepszych algorytmów przybliżonych dla dotychczas badanych grup instancji. Tę część pracy zamyka podsumowanie uzyskanych wyników oraz związane z nimi rekomendacje, dotyczące sposobu postępowania w procesie rozwiązania problemu planowania eksploracji taboru kolejowego przy uwzględnieniu wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych tegoż taboru.

Ostatecznie pracę zamyka podsumowanie uzyskanych rezultatów dla przeprowadzonych badań oraz spis cytowanej literatury.

Wyniki zawarte w niniejszej rozprawie zostały częściowo sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach realizacji projektu Preludium pt. „*Nowe modele decyzyjne wspomagające planowanie wykorzystania taboru kolejowego uwzględniające przeglądy i naprawy okresowe*” (nr 2019/33/N/HS4/02605) kierowanego przez autora niniejszej rozprawy. Ponadto wybrane fragmenty przedstawionych badań zostały opublikowane przez autora w następujących pracach [58, 104, 105].



## Rozdział 1

# Funkcjonowanie przedsiębiorstw transportu kolejowego

W niniejszym rozdziale celem było wprowadzenie w tematykę funkcjonowania przedsiębiorstw transportu kolejowego, które jednocześnie pełnią rolę podmiotów odpowiedzialnych za utrzymanie pojazdów kolejowych (ECM). Przedstawiono dotychczasowy stan taboru w Polsce i planowane w tym zakresie inwestycje przewoźników w najbliższym czasie. Zaprezentowano również najważniejsze cele i działania europejskiej polityki transportowej w ujęciu transportu kolejowego (Rozdział 1.1). Następnie przybliżono uwarunkowania prawne dotyczące przeglądów i napraw okresowych taboru kolejowego (Rozdział 1.2). W Rozdziale 1.3 opisano proces planowania eksploatacji taboru kolejowego w przedsiębiorstwie transportu kolejowego.

### 1.1. Stan taboru kolejowego w Polsce i Unii Europejskiej

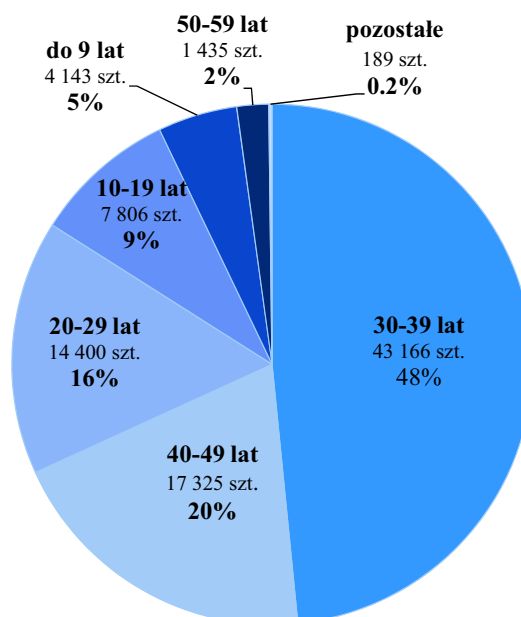
Wsparcie wydajniejszych i bardziej zrównoważonych rodzajów transportu, w tym transportu kolejowego, stanowi ważny element polityki Unii Europejskiej (UE) od wielu lat. Ma to odzwierciedlenie w postaci szeregu unijnych środków legislacyjnych (m.in. dyrektywy [145, 148], białe księgi transportu [121, 122, 136], pakiety kolejowe [144, 149–151]). Komisja Europejska już w 1992 roku ogłosiła, że jednym z głównych celów wspólnej polityki transportowej jest zmiana udziału poszczególnych środków transportu w przewozach ogółem [121, 125]. Wśród ważniejszych rekomendacji Białej Księgi z 2001 roku, było utrzymanie udziału kolei w rynku przewozów towarowych w państwach członkowskich na poziomie 35% do 2010 roku [122, 125]. Następnie, w 2011 roku została przyjęta kolejna Biała Księga dotycząca polityki transportowej UE. Jednym ze sztandarowych założeń tego planu jest to, aby odciążyć ruch drogowy transportu towarów na odległości większe niż 300 km. W związku z tym, do 2030 roku 30% tego typu transportu musi zostać przeniesiona na inne środki transportu, przede wszystkim kolej, zaś do 2050 roku powinno to być 50% [136]. Głównym celem takich działań jest zmniejszenie ilości zatorów komunikacyjnych, aspekty ekologiczne oraz ekonomiczne. Promowanie sektora kolejowego również przejawia się zaangażowaniem znacznych środków z instrumentów finansowych UE wspierających politykę transportową, m.in. „Łącząc Europę” - transport czy europejskie fundusze strukturalne i inwestycyjne (EFSI). Dla tych instrumentów kolej była jednym z największych

beneficjentów w latach 2007-2020 [126]. Priorytetem tych działań jest ożywienie popytu na przewozy pasażerskie i towarowe w sektorze kolejowym, który w ramach państw członkowskich z roku na rok rozwija się i jest trzecim najpopularniejszym środkiem transportu [116].

Z inicjatywy Komisji Europejskiej rok 2021 został ogłoszony Europejskim Rokiem Kolei [153, 154]. Ideą tego projektu jest promowanie transportu kolejowego jako zrównoważonego, niezawodnego i bezpiecznego środka transportu. Natomiast jest to przede wszystkim pierwszy pełny rok, w którym zostały wdrożone w całej Unii przepisy w ramach czwartego pakietu kolejowego. Przyjęty w 2016 roku pakiet, to zbiór sześciu dokumentów legislacyjnych [146, 147, 149–152], opracowanych w celu ukończenia procesu ujednoczenia i uproszczenia rynku usług kolejowych na obszarze UE. Zmiany dotyczą m.in. licencjonowania, zamówień publicznych, zarządzania infrastrukturą kolejową, wydawania jednolitych certyfikatów bezpieczeństwa czy zmiany kompetencji Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego (UTK) i Agencji Kolejowej Unii Europejskiej (ang. *European Railway Agency* – ERA). Dotychczasowe reformy prawne mają na celu podnieść wydajność, bezpieczeństwo oraz jakość usług unijnej branży kolejowej na poziom światowy. Aby to osiągnąć niezbędne jest zapewnienie otwartego i konkurencyjnego rynku europejskiego [147].

Dla znacznej liczby krajów sektor kolejowy stanowi ważny środek przewozów towarowych (m.in. Niemcy, Polska) [39, 130] i pasażerskich (Francja, Włochy, Szwajcaria) [37, 38, 130]. Od wielu lat Polska należy do grupy państw o największej wydajności towarowego transportu kolejowego w Unii Europejskiej oraz jest druga pod względem wielkości przewożonych ładunków [39, 130]. Ponadto Polska, zaraz po Francji, ma największą flotę kolejową dla przewozów pasażerskich w ramach krajów członkowskich UE [40, 120]. Niniejszy trend utrzymuje się od wielu lat, w 2020 roku było to 6392 pojazdy [40].

Natomiast stan taboru kolejowego w Polsce jest niezadowalający, gdyż średni wiek pojazdów u przewoźników pasażerskich i towarowych przekracza 25 lat [139]. Struktura wiekowa wagonów towarowych użytkowanych w Polsce to w większości przestarzały park, ponieważ około 70% tych pojazdów ma ponad 30 lat (Rysunek 1.1, Tabela 1.1). Średni wiek taboru kolejowego u przewoźników towarowych wynosi dla wagonu 27 lat, a dla lokomotywy 32 lata [139]. Podobne statystyki są w przewozach pasażerskich, gdzie średni wiek taboru w latach 2018 - 2020 wzrósł [166]. Jedyne spadki odnotowano w przypadku lokomotyw elektrycznych, gdzie średni wiek obniżył się z 35,24 lat do 33,19 lat. Ponadto wyniki kontroli Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego (UTK) na zlecenie NIK wykazały nieprawidłowości u ponad 40% jednostek kontrolowanych, w zakresie nierzetelnego prowadzenia czynności utrzymaniowych i nierzetelnego prowadzenia dokumentacji dotyczące eksploatacji pojazdów kolejowych [139]. Obecny stan eksploatowanych pojazdów kolejowych w Polsce obniża poziom bezpieczeństwa ruchu kolejowego, który wynika z wysokiej liczby usterek i awarii.



Rysunek 1.1: Podział wagonów towarowych na kategorie wiekowe [166]

Tabela 1.1: Podział wagonów towarowych w Polsce wg dat produkcji – rosnąca wg udziału [166]

Lata produkcji	Liczba sztuk	Udział [%]	Wiek [lata]
2008 – 2017	4 143	5	maks. 9
1988 – 2007	22 206	25	10 – 29
1968 – 1987	60 491	68	30 – 49
starsze – 1967	1 624	2	50 – starsze

W związku z rosnącą świadomością przestarzałej floty i możliwości skorzystania z dodatkowych środków UE na zakup nowego i modernizację posiadanego taboru, polscy przewoźnicy zapowiadają plany inwestycyjne na dużą skalę do 2030 roku [167, 168]. Certyfikowani przewoźnicy towarowi planują zakup 42 lokomotyw elektrycznych oraz 32 lokomotywy spalinowe. Natomiast przewoźnicy pasażerscy zadeklarowali zakup 60 lokomotyw elektrycznych do 2025 roku. Spośród wielu pojazdów, największą liczbę planowanych inwestycji dotyczyło pojazdów doczepianych. Jest to uzasadnione tym, że przewoźnicy kolejowi coraz częściej korzystają z lokomotyw należących do zewnętrznych przedsiębiorstw, na przykład w ramach umów leasingowych czy dzierżawy taboru kolejowego [168]. Mimo ambitnych planów inwestycyjnych przewoźników kolejowych, obecny stan pojazdów kolejowych dopuszczonych do eksploatacji w Polsce jest na niezadowalającym poziomie. Zatem bardzo ważne, aby podmioty odpowiedzialne za utrzymanie taboru kolejowego były świadome wymagań, jakie należy spełniać w tym zakresie.

## 1.2. Uwarunkowania prawne przeglądów i napraw okresowych taboru kolejowego

*Przeglądy i naprawy okresowe* to połączenie wszystkich działań technicznych, administracyjnych i zarządczych w trakcie cyklu życia przedmiotu, mająca na celu utrzymanie go w stanie, w którym może on pełnić wymaganą funkcję, lub przywrócenie go do takiego stanu [114, 115, 124]. Właściwy proces utrzymania może również zapobiec nadmiernej degradacji aktywów podczas ich eksploatacji i utrzymać je w dobrym stanie jak najdłużej lub przynajmniej tak długo, jak jest to wymagane. Tabor kolejowy działa w sieci kolejowej, dlatego też po wystąpieniu awarii w pojeździe usterka szybko się rozprzestrzenia w tym środowisku sieciowym. Zatem w dążeniu do minimalizacji wskaźnika awarii, przeglądy i naprawy okresowe są niezbędne. Przedsiębiorstwa kolejowe, szczególnie działające w krajach zachodnich, są zobowiązane do przeglądów i napraw okresowych taboru kolejowego, co wynika z przepisów prawa [141, 142, 148]. Przeglądy prewencyjne (ang. *preventive maintenance* – PM, nazywane również *konserwacją prewencyjną*) ma na celu zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia nagłych i ukrytych awarii w systemie, poprzez zaplanowane wcześniej działania jak inspekcje, odnowienia czy remonty [69]. Przeglądy i naprawy okresowe są obecnie najpopularniejszą strategią utrzymania floty kolejowej [101], głównie za sprawą prawodawstwa poszczególnych krajów i Unii Europejskiej.

Do podstawowych aktów prawnych, które regulują utrzymanie pojazdów kolejowych na terenie UE należy:

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/798 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa kolei (Dz.U. UE L 138/102 z 26.5.2016) [148],
- Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2019/779 z dnia 16 maja 2019 r. ustanawiające szczegółowe przepisy dotyczące systemu certyfikacji podmiotów odpowiedzialnych za utrzymanie pojazdów zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/798 oraz uchylające rozporządzenie Komisji (UE) nr 445/2011 (Dz.U. L 139I z 27.5.2019, s. 360) [30].

Natomiast regulacje prawne obowiązujące w warunkach polskich to:

- Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 13 października 2017 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o transporcie kolejowym (Dz.U. 2017 poz. 2117) [141].
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 października 2005 r. w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych (Dz. U. z 2016, poz. 226, z późn. zm.) [160],
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 28 lipca 2017 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych (Dz. U. 2017, poz. 1525) [159].

Tabela 1.2: Poziomy utrzymania pojazdów kolejowych [160]

Poziom utrzymania	Charakterystyka	Ramowy zakres prac
Poziom 1	Czynności sprawdzające lub monitoring wykonywany przed wyjazdem pojazdu na linię, w czasie jazdy bądź po zjeździe pojazdu.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ocena stanu zasadniczych zespołów, podzespołów oraz układów, które mają wpływ na bezpieczeństwo ruchu pojazdu kolejowego;</li> <li>– Zaopatrzenie pojazdu kolejowego w materiały eksploatacyjne;</li> <li>– Ewentualna wymiana zużytych elementów w trakcie eksploatacji.</li> </ul>
Poziom 2	Czynności zapobiegające przekroczeniu limitów zużycia, wykonywane na specjalistycznych stanowiskach, w przerwach pomiędzy kolejną planowaną eksploatacją pojazdu kolejowego.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Szczegółowa ocena stanu technicznego pojazdu kolejowego poprzez sprawdzenie działania jego obwodów, oględziny podzespołów dostępnych bez demontażu, a także badania diagnostyczne przewidziane w dokumentacji;</li> <li>– Naprawy dokonywane przez wymianę standardowych elementów.</li> </ul>
Poziom 3	Czynności z zakresu utrzymania, zapobiegające przekroczeniom limitów zużycia, wykonywane na specjalistycznych stanowiskach z wyłączeniem pojazdu kolejowego z planowanej eksploatacji.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Szczegółowa ocena stanu technicznego pojazdu poprzez sprawdzenie działania jego obwodów, oględziny podzespołów dostępnych po demontażu, a także przewidziane w dokumentacji badania diagnostyczne;</li> <li>– Planowe wymiany podzespołów, a także niewielkie naprawy zespołów oraz podzespołów funkcjonalnych wykonywane na wyspecjalizowanych stanowiskach.</li> </ul>
Poziom 4	Czynności wykonywane z zakresu utrzymania naprawczego wykonywane w zakładach posiadających zaplecze techniczne oraz stanowiska pomiarowe.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Szczegółowe sprawdzenie stanu technicznego podzespołów i zespołów określonych w dokumentacji, połączone z ich demontażem z pojazdu;</li> <li>– Planowe wymiany podzespołów i zespołów;</li> <li>– Naprawy podzespołów i zespołów przeprowadzane w wyspecjalizowanych warsztatach.</li> </ul>
Poziom 5	Czynności mające na celu podniesienie standardu pojazdu kolejowego bądź jego odnowienie wykonywane w wyspecjalizowanych zakładach lub u producenta.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Demontaż podzespołów i zespołów z pojazdów kolejowych oraz wymiana ich na nowe lub zregenerowane;</li> <li>– Modyfikacje nadwozi pojazdów kolejowych i układów biegowych.</li> </ul>

Gwarancją bezpieczeństwa transportu kolejowego jest zapewnienie przez *podmiot odpowiedzialny za utrzymanie* (ang. *Entity in Charge of Maintenance – ECM*) sprawności operacyjnej pojazdów kolejowych [141]. Przedsiębiorstwa kolejowe, posiadacze pojazdów oraz zarządcy infrastruktury mogą być podmiotami odpowiedzialnymi za utrzymanie floty. Natomiast system certyfikacji ECM, wprowadzony dla krajów UE, ma jednoznacznie określić podział odpowiedzialności za przeglądy i naprawy okresowe. Podmioty te są zobowiązane do realizacji procesu utrzymania pojazdów zgodnie z dokumentacją systemu

utrzymania (DSU) taboru. Każdy z pojazdów eksploatowanych w sieci kolejowej posiada dokumentację systemu utrzymania (DSU). W DSU powinny znajdować się następujące elementy [110, 160]:

- opis funkcjonalny pojazdu z podziałem na jego elementy składowe w procesie utrzymania;
- dokumentacja zawierająca:
  - strukturę cyklu przeglądowo-naprawczego (planu utrzymania),
  - opisy czynności przeglądowych i naprawczych, instrukcje demontażu lub montażu,
  - zestawienie parametrów mierzonych w procesie przeglądu lub naprawy i opisy metod pomiarowych
  - wzory kart pomiarowych z wykazem wartości konstrukcyjnych, ponaprawczych i kresowych parametrów dla zespołów, podzespołów i elementów pojazdu,
  - wykazy urządzeń i narzędzi specjalistycznych,
  - wykazy testów wykonywanych w trakcie utrzymania,
  - wymagania dotyczące kwalifikacji pracowników oraz wymagania szczególne w zakresie czynności spawania i badań nieniszczących;
- wykaz części zamiennych z opisem technicznym i wskazaniem ich producenta;
- ograniczenia związane z bezpieczeństwem i interoperacyjnością dla podzespołów lub części istotnych dla bezpieczeństwa i interoperacyjności, określające limity, których nie można przekroczyć w czasie eksploatacji, łącznie z eksploatacją w trybie awaryjnym;
- wykaz podzespołów objętych dozorem technicznym.

DSU jest formułowane odrębnie w zależności od typu i serii pojazdu przez producenta. Zmiany w dokumentacji może również dokonać przedsiębiorstwo transportu kolejowego. W Polsce zatwierdzenie DSU spełniające wymagania, należy do Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego [141, 142]. Obecnie, z zatwierdzenia zmian w dokumentacji przez Prezesa UTK zwolnione są pojazdy kolejowe podlegające obowiązkowi wpisu do krajowego rejestru pojazdów kolejowych (rejestr NVR), pojazdy kolei wąskotorowych, pojazdy przeznaczone wyłącznie do użytku lokalnego bądź turystycznego oraz pojazdy historyczne nieporuszające się po sieci kolejowej [159]. Jednocześnie zwolnienie z obowiązku zatwierdzania DSU nie zwalnia podmiotu odpowiedzialnego za utrzymanie, z obowiązku posiadania samej dokumentacji systemu utrzymania [110]. Dokumentacja jest niezbędna do prawidłowego zarządzania utrzymaniem taboru, gdzie w strukturze cyklu przeglądowo-naprawczym danego pojazdu kolejowego, określono „kolejność występowania po sobie poszczególnych rodzajów przeglądów i napraw” [142].

Charakterystyka poszczególnych poziomów utrzymania wraz z zakresem prac wykonywanych w ramach poszczególnych poziomów utrzymania, prezentuje Tabela 1.2. Zgodnie z Rozporządzeniem [160], cykle przeglądowo-naprawcze mają zdefiniowany resurs czasowy (ang. *time-based maintenance* - TBM) i kilometrowy (ang. *distance-based mainten-*

ce - DBM). Resurs to ustalony okres pracy sprzętu, wyrażony w jednostce czasu (resurs czasowy) oraz odległości (resurs kilometrowy), który jest gwarantem bezpieczeństwa i sprawności operacyjnej taboru podczas eksploatacji. Wykonanie przeglądu danego poziomu w określonym pojeździe jest obligatoryjne, kiedy przebieg przekroczy jedną z miar resursu dla wspomnianego poziomu. Brak wykonania regularnych przeglądów i napraw okresowych, określonych w DSU, lub zaniedbania w tym zakresie mogą skutkować wysoką karą finansową, a w przypadku dużej skali zdarzenia również zarzut spowodowania katastrofy w ruchu lądowym, który podlega karze pozbawienia wolności (art. 173 Kodeksu Karnego) [117]. Zgodnie z obowiązującymi przepisami każdy pojazd kolejowy eksploatowany na ogólnodostępnej sieci kolejowej musi mieć przypisany tzw. podmiot odpowiedzialny za utrzymanie (ang. *Entity in Charge of Maintenance* – ECM) [148]. W związku z tym, przedsiębiorstwa kolejowe pełniące również rolę ECM, są zobowiązane aby pojazdy, za których utrzymanie są odpowiedzialne, były w stanie poruszać się po sieci kolejowej w bezpieczny sposób.

### **1.3. Proces planowania eksploatacji i przeglądów taboru w przedsiębiorstwie transportu kolejowego**

Problem planowania eksploatacji taboru kolejowego oraz problematyka planowania przeglądów i napraw okresowych tegoż taboru nie powinny być rozpatrywane oddzielnie [98]. Ponieważ plan przypisania floty do zadań przewozowych determinuje jej harmonogram przeglądów i napraw okresowych. W rzeczywistości oba te działania mają krytyczny wpływ zarówno na bezpieczeństwo, jak i dostępność floty. Dlatego też wymagany jest dokładny plan zarówno eksploatacji oraz przeglądów i napraw okresowych.

Należy uwzględnić, że podejście do przygotowania planu transportu kolejowego może przebiegać nieco inaczej, w zależności od kraju czy też przedsiębiorstw odpowiedzialnych za te procesy. Na przykład w Wielkiej Brytanii czynności związane z przeglądami okresowymi taboru mogą być ustalane na późniejszych etapach, po harmonogramowaniu jednostek pociągowych [77]. Natomiast odmienne podejście można zauważyć między innymi w chińskiej [45] czy też koreańskiej kolei [61], gdzie podczas planowania jednostek pociągowych ich przeglądy i naprawy okresowe również są uwzględniane. Ponadto czynności związane z utrzymaniem taboru mogą być ustalane na końcu, podczas manewrowania (ang. *shunting*) pojazdami kolejowymi [53]. W innych przypadkach harmonogramy konserwacji stanowią punkt wyjściowy dla planowanych rozkładów jazdy pociągów [189]. Dlatego też, proponowane modele w literaturze przedmiotu należy zweryfikować pod kątem podobieństw regulacji, przede wszystkim dotyczących przeglądów i napraw okresowych.

Plany przeglądów były opracowywane ręcznie, a w niektórych przedsiębiorstwach kolejowych nadal są [71, 190]. Przygotowanie wykonalnego harmonogramu przeglądów i napraw okresowych jest trudnym i złożonym procesem decyzyjnym, za który są odpowie-

działni planiści oraz dyspozytorzy [76]. Przez wiele lat jakość planów zależała przede wszystkim od ich wiedzy i doświadczenia [22]. Natomiast z biegiem czasu okazało się, że ten proces jest czasochłonny i nie gwarantuje rozwiązania optymalnego [71, 190]. Wraz z postępowaniem technicznym odchodzono od optymalizacji ręcznej na rzecz eksperymentów obliczeniowych opartych na metodach dokładnych i przybliżonych [118]. Te z kolei stały się przedmiotem zainteresowania zarówno badaczy, jak i praktyków. Jednakże ręcznie przygotowywane plany przeglądów i napraw okresowych nadal są obecne w wielu przedsiębiorstwach kolejowych, np. [76, 190]. Stanowią ważne źródło i punkt odniesienia dla oceny nowych rozwiązań, tj. metod optymalizacji [71, 113, 190]. Ponadto mogą pełnić rolę planów awaryjnych, gdzie interwencje polegające na ręcznej korekcie pozwalają na uzyskanie wykonalnego harmonogramu przeglądów i napraw okresowych dla wybranych algorytmów [82, 83].

Organizację rzeczywistych prac przeglądów i napraw okresowych można podzielić na trzy następujące etapy tj. przygotowanie, serwis oraz zakończenie [74, 162]:

- Przygotowanie – polega na wcześniejszej rezerwacji terminu w odpowiednim warsztacie, który ma stosowne uprawnienia, dedykowany sprzęt oraz załogę by wykonać właściwe czynności związane z określonym poziomem utrzymania. Jednostka pociągowa powinna być dostarczona do warsztatu dzień wcześniej przed wyznaczonym terminem przeglądu, w celu uniknięcia ryzyka opóźnień wykonania prac. W zależności od typu i serii floty, wyjątek mogą stanowić przeglądy niskich poziomów np. P1, P2, które nie wymagają zaangażowania specjalistycznego warsztatu i związanych z nim zasobów. Szczegóły realizacji utrzymania danego poziomu są określone w DSU pojazdu kolejowego.
- Serwis – rozpoczęcie i zakończenie rzeczywistego przeglądu bądź naprawy okresowej zgodne z planowanymi terminami. Koszty i czas trwania przeglądu rosną wraz ze wzrostem poziomu utrzymania. Rozpiętość cenowa oraz czasowa jest bardzo duża i w głównej mierze zależy od typu i serii pojazdu. Dla przykładu, czas trwania przeglądu dla poziomu P1 może wahać się od 4 do 7 godzin i kosztuje około 1000 zł, jednakże poziom P5 wymaga poświęcenia co najmniej półtora miesiąca prac konserwacyjnych, a jego cena zaczyna się od jednego miliona zł.
- Zakończenie – po zakończeniu czynności związanych z utrzymaniem, jednostka pociągowa zostaje oddana użytkownikowi, przegląd zostaje odnotowany w DSU pojazdu.

Przygotowanie i zakończenie oznaczamy jako czas nieistotny dla planów przeglądów i napraw okresowych. Wyjątek stanowi resurs czasowy dla poziomów konserwacji, które muszą być wykonane w specjalistycznym warsztacie. Dlatego też resurs czasowy dla danego poziomu utrzymania jest często skrócony o jeden dzień, aby plan przewidywał dostarczenie dzień wcześniej floty do odpowiedniego serwisu. Jest to zawarte w cyklu przeglądowo-naprawczym określonej serii i typu jednostki kolejowej, i stanowi dane wej-



ściowe dla eksperymentów obliczeniowych. Natomiast serwis jest to czas operacyjny przeglądów i napraw okresowych, z góry oznaczony przez DSU. Na podstawie cyklu przeglądowo-naprawczego i czasów wykonania działań konserwacyjnych jest oparty proces planowania utrzymania taboru.

Przykład cyklu przeglądowo-naprawczy dla lokomotywy SM42 przedstawiono w Tabeli 1.3. Była to jedna z najpopularniejszych lokomotyw spalinowych w Polsce do 2009 roku [170]. Przypomnijmy, że dla danego poziomu przeglądu i naprawy okresowej, dany reśurs czasowy (TBM) i kilometrowy (DBM) jest definiowany w DSU pojazdu. Natomiast czas wykonania przeglądów jest ustalony przez warsztaty naprawcze na podstawie średnich czasów usług przeglądowo-naprawczych.

Tabela 1.3: Cykl przeglądowo-naprawczy dla lokomotywy spalinowej SM42 [132]

Poziom utrzymania	Reśurs czasowy TBM	Reśurs kilometrowy DBM
P 1	100 h	10 dni
P 2/1	30 dni	-
P 2/2	150 dni	-
P 2/3	450 dni	-
P 3	900 dni	75 000 km
P 4	5 lat	150 000 km
P 5	25 lat	750 000 km

Liczba poziomów w DSU pojazdów kolejowych może się od siebie różnić, przykładowo zdarzają się cztery poziomy, bądź jeden z nich jest podzielony na kolejne podpoziomy, co prezentuje Tabela 1.3 oraz Rysunek 2 (patrz Wstęp). Istotne jest to, by wszystkie działania przewidziane dla utrzymania danego pojazdu kolejowego wystąpiły niezależnie od przypisanego poziomu. Dla uogólnienia tej kwestii w literaturze przedmiotu przyjęło się, że podział przeglądów i napraw okresowych będzie dotyczył dwóch głównych kategorii działań w transporcie kolejowym, tj. rutynowe przeglądy oraz duże naprawy [13, 81]. Pierwsze dwa poziomy dotyczą czynności sprawdzających i monitorujących zasadniczych zespołów, podzespołów i układów pojazdu kolejowego. Stanowią kategorie rutynowych prac, wykonywanych w pojazdach kolejowych i posterunkach rewizji taboru elektrycznego. Natomiast poziomy P3, P4 i P5 są związane z modernizacją oraz naprawą zespołów i podzespołów wykonywanych w wyspecjalizowanych warsztatach.

Zasadnicza różnica między poziomami nie tylko dotyczy stopnia zaawansowania prac w ramach danego poziomu utrzymania [142]. Zarówno koszty i czas trwania przeglądu rosną wraz ze wzrostem poziomu utrzymania danego pojazdu kolejowego. Rozpiętość cenowa oraz czasowa jest bardzo duża i w głównej mierze zależy od typu i serii pojazdu. Dla przykładu, czas trwania przeglądu dla poziomu P1 może wahać się od 4 do 7 godzin i kosztuje około 1000 zł, jednakże poziom P5 wymaga poświęcenia co najmniej półtora miesiąca prac konserwacyjnych, a jego cena zaczyna się od jednego miliona zł [162].

Ponadto dla struktury przeglądów i napraw okresowych w sektorze kolejowym znamienne jest to, że przegląd wyższego poziomu zawiera przeglądy niższego poziomu. Przykładowo, wykonanie poziomu P4 jest równoważne z realizacją wykonania przeglądów poziomu P3, P2 i P1, zatem również związane z nimi przebiegi pojazdu kolejowego są zerowane. Ponadto poziomy utrzymania transportu kolejowego można kolejno ze sobą łączyć, a termin wykonania przyspieszać. Ten aspekt zarządzania taborem kolejowym ujawnia różnorodność podproblemów planowania, z którymi mierzą się przedsiębiorstwa transportu kolejowego. Dla nich przeglądy i naprawy okresowe taboru są koniecznością i wiąże się z wysokimi kosztami.

Przedsiębiorstwa powinny dążyć do zmniejszenia czasu poświęconego na przeglądy, jednocześnie spełniając legislacyjne wymogi bezpieczeństwa transportu kolejowego. Biorąc pod uwagę specyfikę branży kolejowej, to zwiększenie efektywności wykorzystania taboru nawet o kilka procent, przekłada się na wzrost przychodów o setki tysięcy złotych rocznie [58]. Prezentowana problematyka badawcza stanowi problem rzeczywisty i wynika z zapotrzebowania biznesu, gdzie zidentyfikowano potrzebę zwiększenia technicznej dostępności pojazdów kolejowych. Zatem kluczowe i ekonomicznie uzasadnione jest, żeby przeglądy wykonywane były w możliwie najpóźniejszym terminie, tj. wynikały z rezerwy czasowej. W praktyce można to osiągnąć poprzez celowe planowanie przydziału taboru do zadań przewozowych w taki sposób, aby minimalizować czas wyłączenia taboru z eksploatacji w wyniku realizacji prac przeglądowo-naprawczych. Takie podejście pozwala na maksymalną eksploatację posiadanych zasobów.

Na rynku istnieją różne systemy informatyczne, które wspomagają zarządzanie zasobami przedsiębiorstw transportowych, m.in. SAP [164] czy IBM Maximo [128]. Mają one jednak istotne ograniczenia dotyczące ich zastosowania dla przedsiębiorstw transportu kolejowego m.in. w obszarze planowania zadań przewozowych, czy wspomagania decyzji w zakresie zarządzania utrzymaniem pojazdów kolejowych. Natomiast dedykowane w tej branży oprogramowania, m.in. RailSoft [155], choć pozwalają na planowanie przeglądów i napraw okresowych, to jednak nie dostarczają istotnych mechanizmów zarządzania, które wspierałyby podejmowanie decyzji w zakresie równoważenia eksploatacji pojazdów kolejowych, maksymalizacji dostępności floty, itp. Dodatkowo w takich środowiskach, dla problemów optymalizacji, stosowane są heurystyki konstrukcyjne bądź metody priorytetowe, które z natury narzucają określone rozwiązania (rozdział zadań, plan przeglądów). Zatem ograniczają proces optymalizacji przy zadanych kryteriach i dodatkowych ograniczeniach, wynikających z zapotrzebowania biznesu. W związku z tym istnieje realnie duże zapotrzebowanie ze strony przedsiębiorstw transportu kolejowego na modele decyzyjne, które wspomagałyby proces podejmowania decyzji w zakresie zarządzania taborem kolejowym w opisywanych obszarach.

## Rozdział 2

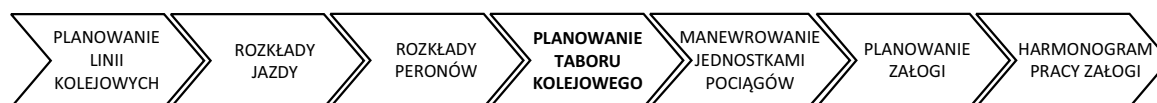
# Stan wiedzy w obszarze planowania eksploatacji i przeglądów okresowych taboru kolejowego

W tym rozdziale przedstawiono dotychczasowy stan wiedzy dla problematyki planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem przeglądów i napraw okresowych. Zagadnienie to mieści się w ramach dwóch problemów badawczych znanych w literaturze przedmiotu jako planowanie taboru kolejowego (ang. *rolling stock scheduling*) oraz planowanie przeglądów i napraw okresowych (ang. *preventive maintenance scheduling problem*). Wiele badań dotyczących planowania taboru kolejowego, które odpowiada eksploatacji, ignoruje planowanie przeglądów taboru w proponowanych modelach decyzyjnych [16, 54, 97, 186]. Czego efektem jest pomijanie powiązań między tymi dwoma problemami. Choć nie powinny być rozpatrywane oddzielnie [85, 98]. Ponieważ plan przypisania pojazdów do zadań przewozowych determinuje ich plan przeglądów i napraw okresowych, a także oba te działania wpływają na dostępność floty. Przegląd dotychczas uzyskanych rezultatów badań naukowych dokonano w oparciu o analizę następujących źródeł bibliograficznych: Google Scholar, ScienceDirect, Scopus, Springer oraz Web of Science. Wybrano artykuły naukowe, rozdziały z książek, referaty i materiały konferencyjne, które znajdują się w ramach obszarów zarządzania, modelowania zagadnień transportowych, teorii harmonogramowania zadań, teorii podejmowania decyzji i badań operacyjnych.

Na początku w Rozdziale 2.1 dokonano kompleksowego przeglądu literatury dla etapów procesu planowania w transporcie kolejowym, ze szczególnym uwzględnieniem stadium planowania taboru kolejowego. Ponadto przeprowadzono analizę wizualizacji mapowania bibliometrycznego przy zastosowaniu oprogramowania VOSviewer, którego celem było poznanie powiązań rozpatrywanych problemów i weryfikacja trendów badawczych w tematyce planowania taboru kolejowego. W Rozdziale 2.2 zidentyfikowano lukę badawczą oraz podsumowano stosowane dotychczas metody i modele na podstawie przeprowadzonego systematycznego przeglądu literatury (ang. *systematic literature review* – SLR) dla problematyki planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem przeglądów i napraw okresowych. W ostatniej części rozdziału, dokonano zgrubnej oceny stosowanych metod badań operacyjnych w literaturze przedmiotu dla rozpatrywanej problematyki, by określić metody optymalizacji oraz kierunek badań realizacji modeli decyzyjnych w niniejszej rozprawie.

## 2.1. Planowanie eksploatacji i przeglądów okresowych taboru na tle procesów planowania transportu kolejowego w świetle literatury

Procedura organizacji przygotowania planu transportowego w systemach kolejowych jest wieloetapowa [19, 48, 53, 56, 57, 62, 85]. Ogólny proces planowania dla transportu kolejowego prezentuje Rysunek 2.1 na podstawie [56, 57]. Przeglądy i naprawy okresowe są rozpatrywane dla stadium planowania taboru kolejowego (ang. *rolling stock scheduling*) [19, 49, 85]. Często ten etap jest określany jako cyrkulacja (obieg) pojazdów kolejowych (ang. *rolling stock circulation*) [179], bądź są one ze sobą zintegrowane [19]. Planowanie taboru kolejowego jest zdefiniowane bardzo ogólnie, w ramach tego obszaru można wyróżnić następujące podproblemy: wyznaczanie trasy pociągu (ang. *train routing problem*), przypisanie taboru (ang. *rolling stock assignment problem*), czy też planowanie konserwacji (ang. *maintenance scheduling problem*) [19, 21]. Przedsięwzięcia podejmowane w ramach etapu planowania taboru kolejowego odpowiadają działaniom planowania eksploatacji oraz przeglądów i napraw okresowych taboru kolejowego. Dlatego też, ten etap jest rozważany w badaniach literaturowych.



Rysunek 2.1: Proces planowania w transporcie kolejowym [57]

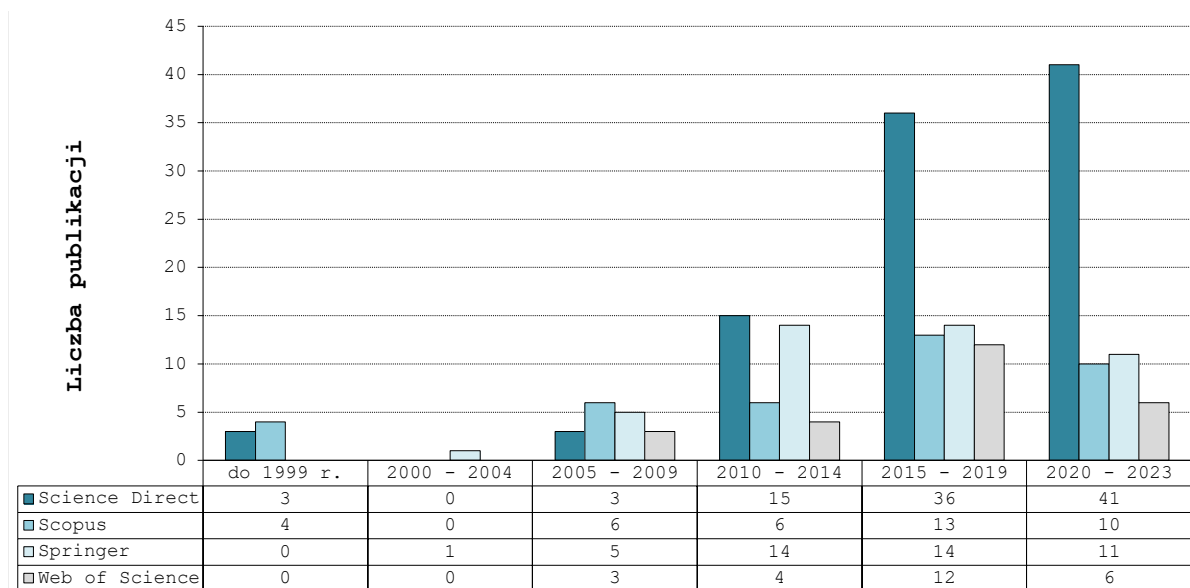
W celu identyfikacji i podsumowania dotychczasowych badań dotyczących planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem przeglądów i napraw okresowych, dokonano w pierwszej kolejności kompleksowego przeglądu literatury [72]. W związku z tym, rozpatrywany zakres obejmuje wszystkie etapy procesu planowania w transporcie kolejowym (patrz Rysunek 2.1), ze szczególnym uwzględnieniem etapu planowania taboru kolejowego. Przeszukano cztery bazy danych, tj. ScienceDirect, Scopus, Springer oraz Web of Science pod kątem słów kluczowych odpowiadających danemu stadium planowania, jednocześnie uwzględniając terminy „*rail\**” oraz „*train\**”. Dobór słów kluczowych i sformułowanie kwerend było zainspirowane pracą [57]. Przykładowa kwerenda wyszukiwania dla pierwszego etapu, którą zastosowano to „*line plan\**” AND („*rail\**” OR „*train\**”). Wybrane słowa kluczowe wyszukano w tytułach artykułów, abstraktach i słowach kluczowych. Wyjątek to baza Springer, gdzie zweryfikowano dokumenty w całości. Tabela 2.1 prezentuje wyniki niniejszej analizy, które stanowią tytuły w języku angielskim.

Liczba publikacji w ramach danej tematyki, tj. wybranego etapu planowania w transporcie kolejowym, ma zbliżony udział procentowy dla każdej z rozpatrywanych baz (patrz Tabela 2.1). Bardzo podobne wyniki mają bazy ScienceDirect i Scopus. Natomiast ba-

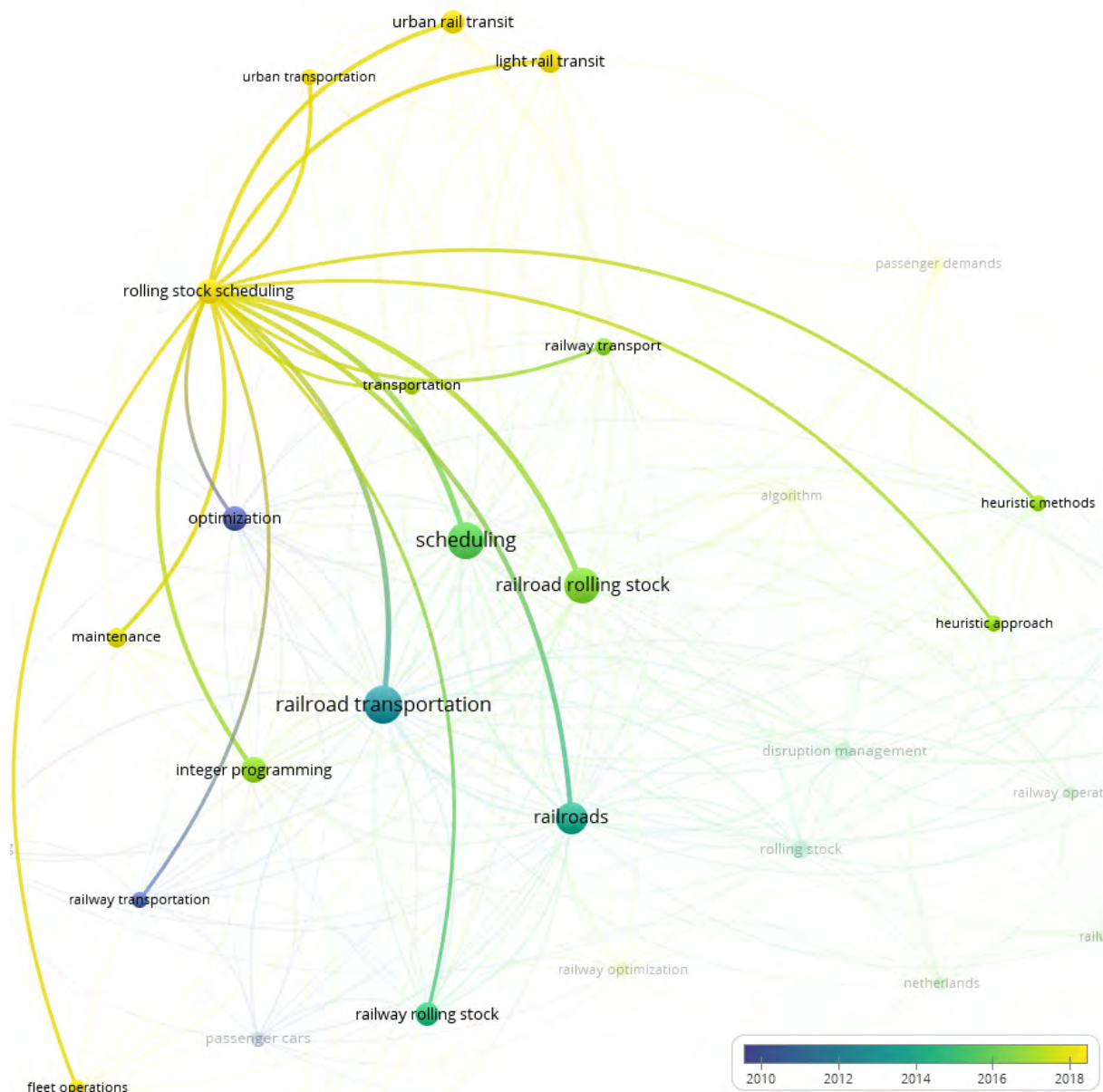
Tabela 2.1: Liczba publikacji dla etapów planowania w transporcie kolejowym

Etap planowania i tłumaczenie w języku angielskim	Science Direct	Scopus	Springer	Web of Science
Planowanie linii kolejowych ( <i>Line planning</i> )	491	225	1532	136
Rozkłady jazdy ( <i>Train timetabling</i> )	963	598	876	460
Rozkłady peronów ( <i>Train platforming</i> )	400	123	450	89
<b>Planowanie taboru kolejowego (<i>Rolling stock scheduling</i>)</b>	98	39	45	25
Manewrowanie jednostkami pociągów ( <i>Train unit shunting</i> )	12	11	8	7
Planowanie załogi ( <i>Crew scheduling</i> )	586	173	893	133
Harmonogram pracy załogi ( <i>Crew rostering</i> )	106	35	233	30

zy Springer oraz Web of Science prezentują nieco inne trendy, szczególnie dla tematyki planowania linii kolejowych. Warto zauważyć, że planowanie taboru kolejowego w porównaniu z innymi etapami, ma niski wskaźnik publikacji. Jednakże nadal jest to ważny obszar badawczy w transporcie kolejowym, ponieważ znaleziono kilkadziesiąt dokumentów w każdej z baz. Planowanie taboru kolejowego to relatywnie nowa tematyka. Pierwsze artykuły pojawiły się w latach 90-tych, jednakże wzmożone zainteresowanie skutkujące szeregiem publikacji zaczęło się między 2005 a 2009 rokiem. Rysunek 2.2 pokazuje, iż trend wzrostowy w ostatnich latach utrzymuje się, co może świadczyć o dostrzeganiu potencjału i nowych możliwości usprawnień dla tematyki planowania taboru w transporcie kolejowym. Spadek liczby publikacji między 2020 a 2023 rokiem, prawdopodobnie wynika z krótszego przedziału horyzontu czasowego branego pod uwagę, niż poprzednich okresów, tj. z 5 do 3 lat. Ponadto, wiele prac przyjętych do druku na rok 2023, nie jest jeszcze dostępnych w wybranych bazach. W związku z tym założono, że ostatni przedział czasowy może być niekompletny.



Rysunek 2.2: Liczba publikacji na przestrzeni lat dla tematyki planowania taboru kolejowego

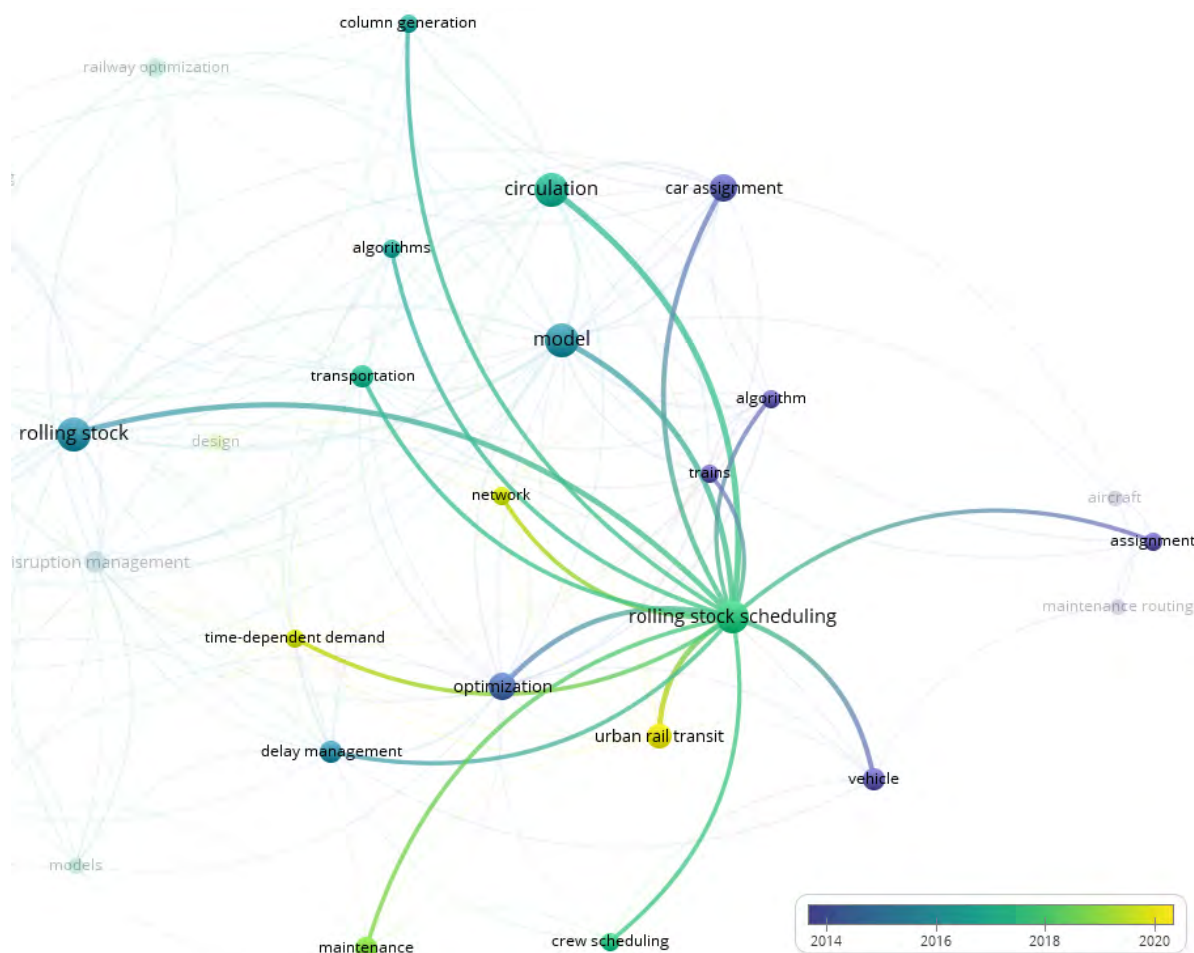


Rysunek 2.3: Analiza dla „rolling stock scheduling”. Wizualizacja nakładki w VOSviewer dla bazy Scopus.

Niniejsza analiza bibliometryczna pokazuje, że tematyka planowania taboru kolejowego w porównaniu z innymi tematami (etapami) planowania w transporcie kolejowym nie jest dostatecznie zbadana (Tabela 2.1). Wysokie wskaźniki innych problematyk wynikają z faktu, że już od wielu lat są one przedmiotem analiz badawczych. Na przykład pierwsze artykuły dla tematów planowania linii kolejowych czy też planowania załogi, pojawiły się w 1983 roku. Natomiast najnowsza problematyka tj. manewrowanie jednostkami pociągów, pierwszą odnotowaną publikacją miała w 2007 roku, i zarazem jest najmniej znana (Tabela 2.1). Planowanie taboru kolejowego, jako relatywnie nowa tematyka i jednocześnie ogólna definicja, może być nieco inaczej określana przez autorów opracowań naukowych, np. *locomotive scheduling* [42, 184], *rolling stock circulation* [19, 179]. Dlatego

też liczba publikacji jest na średnim poziomie, a warto podkreślić że większość tytułów pochodzi z ostatnich lat (patrz Rysunek 2.2). Otóż około 70% publikacji pojawiło się od 2015 roku (tj. 143 prace, spośród 207). Dalej można wnioskować, że podproblemy które są rozważane w ramach planowania taboru, również nie były wystarczająco przeanalizowane, w tym planowanie przeglądów i napraw okresowych. Niemniej jednak ostatnie lata pokazują, że dostrzega się potencjał rozpatrywanej problematyki planowania taboru kolejowego w transporcie kolejowym (Rysunek 2.2).

Dalsze badania koncentrują się na weryfikacji najnowszych trendów w tematyce planowania taboru kolejowego, a także jej powiązań z planem przeglądów i napraw okresowych (ang. *maintenance scheduling problem*). W tym celu zastosowano mapowanie bibliometryczne dla wyników wyszukiwania w bazach ScienceDirect, Scopus oraz Web of Science przy użyciu oprogramowania VOSviewer<sup>1</sup>. Wizualizacja mapowania tematów jest istotnym aspektem w badaniach bibliometrycznych [33, 175].

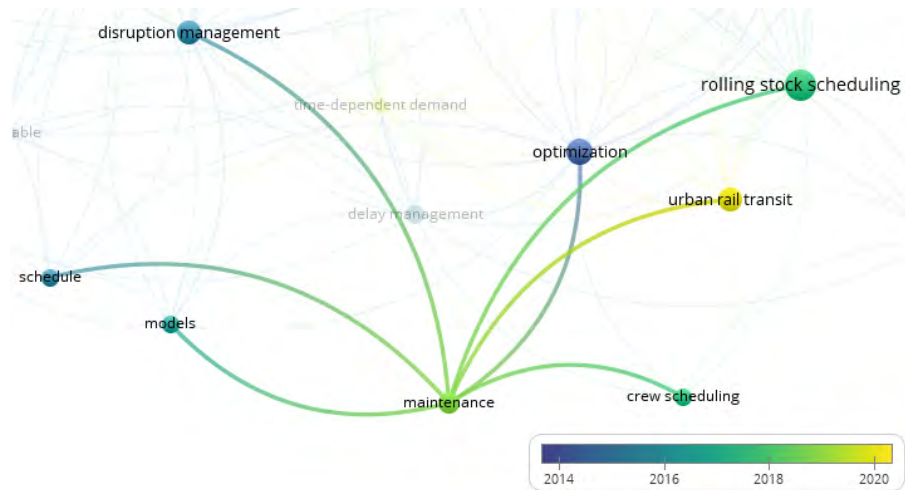


Rysunek 2.4: Analiza dla „rolling stock scheduling”. Wizualizacja nakładki w VOSviewer dla bazy Web of Science.

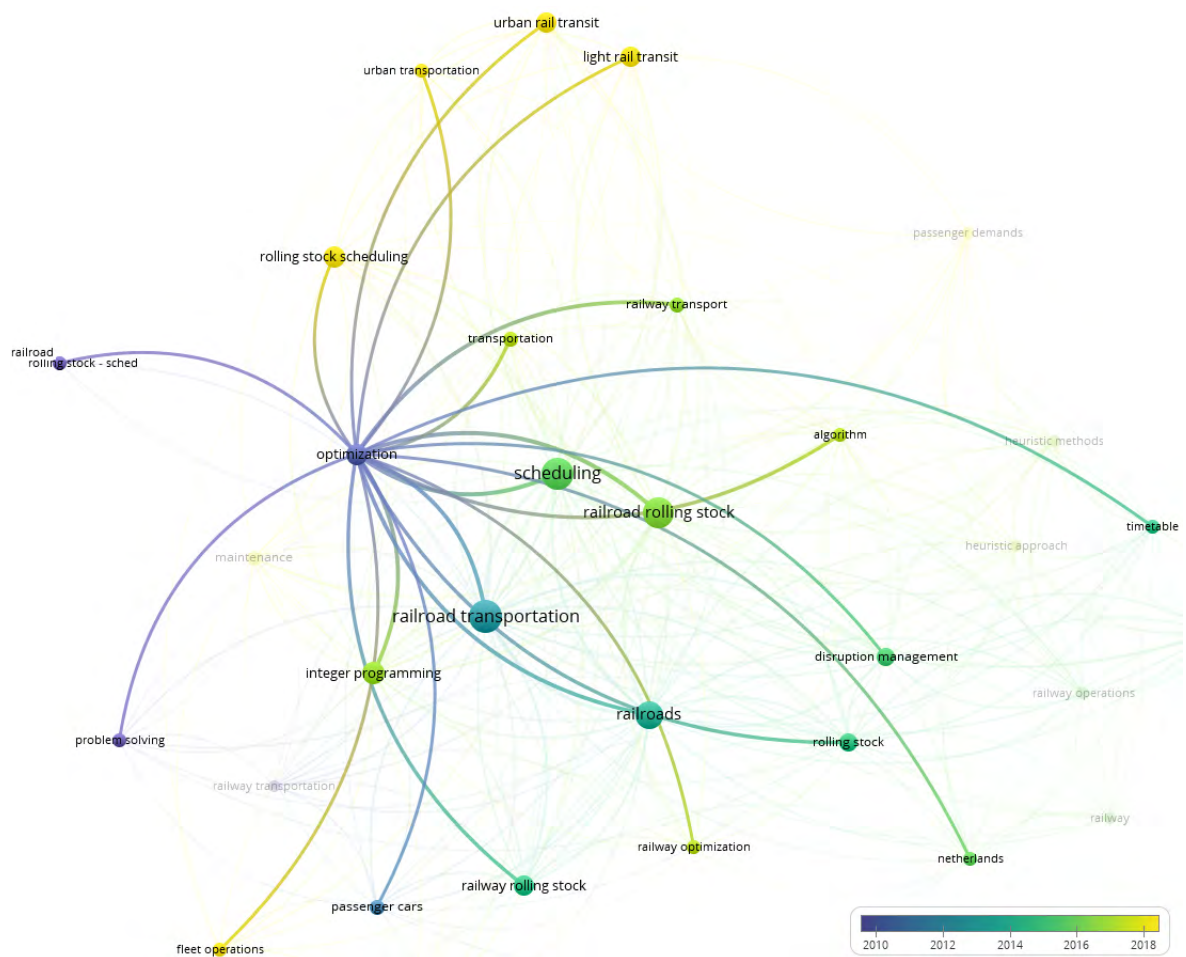
<sup>1</sup> VOSviewer to darmowy program komputerowy, który pozwala na graficzną reprezentację map bibliograficznych [174].





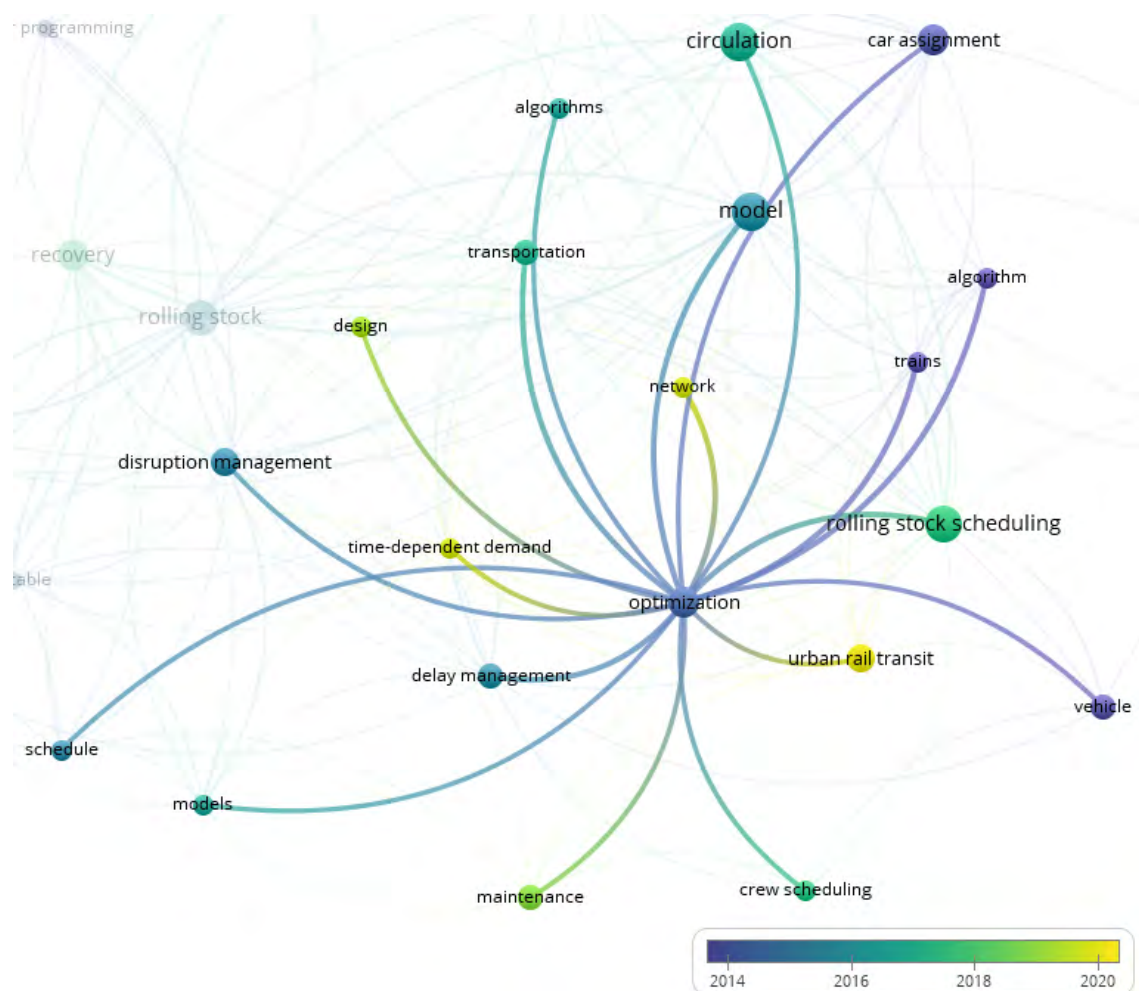


Rysunek 2.6: Analiza dla „maintenance”. Wizualizacja nakładki w VOSviewer dla bazy Web of Science.



Rysunek 2.7: Analiza dla „optimization”. Wizualizacja nakładki w VOSviewer dla bazy Scopus.

W bazie Scopus brak powiązania między pojęciami „*maintenance*” z „*optimization*” (Rysunek 2.5, 2.7). Mimo że oba słowa kluczowe są związane z hasłem „*rolling stock scheduling*”, co prezentuje Rysunek 2.3. Natomiast w bazie Web of Science wszystkie trzy terminy są mocno ze sobą skorelowane (Rysunek 2.4, 2.6, 2.8). W centrum uwagi badaczy jest przede wszystkim planowanie taboru kolejowego („*rolling stock scheduling*”), gdzie rozpatrywana jest konserwacja, przegląd („*maintenance*”) bądź optymalizacja („*optimization*”), patrz Rysunek 2.3. Wspólna kombinacja tych słów kluczowych pojawia się w literaturze przedmiotu, np. w bazie Web of Science, to świadczy o potencjale publikacyjnym. Jednakże istnieją pakiety baz, np. Scopus i Science Direct, gdzie brak bezpośrednich powiązań analizowanych terminów, co pokazuje lukę badawczą w tej materii.



Rysunek 2.8: Analiza dla „*optimization*”. Wizualizacja nakładki w VOSviewer dla bazy Web of Science.

W mapach bibliometrycznych również zwrócono uwagę na słowa kluczowe związane z metodami rozwiązania problemów planowania taboru kolejowego i przeglądów. W bazie Scopus oba te terminy są powiązane z „*heuristic methods*” (metody heurystyczne), „*heuristic approach*” (podejście heurystyczne), „*integer programming*” (programowanie całkowitoliczbowe), „*algorithm*” (algorytm), Rysunek 2.3, 2.5. Słowo optymalizacja łą-

czy się tylko z wyrazem programowanie całkowitoliczbowe „*integer programming*” oraz algorytm „*algorithm*”, Rysunek 2.7. Natomiast w Web of Science wszystkie rozpatrywane słowa kluczowe, tj. planowanie taboru kolejowego, przeglądy i optymalizacja, są skorelowane z następującymi terminami: „*algorithm*” (algorytm), „*algorithms*” (algorytmy), „*model*” (model). Prezentowane rozbieżności w bazach mogą również świadczyć o braku dostatecznego rozpoznania metod rozwiązywania niniejszej problematyki. Analiza bibliometryczna wskazuje, że jednym z przyszłych trendów w tematyce systemów kolejowych może być usprawnienie (optymalizacja) planowania eksploatacji taboru z uwzględnieniem przeglądów i napraw okresowych, przy zastosowaniu metod dokładnych (m.in. programowanie całkowitoliczbowe) i przybliżonych (m.in. algorytmy heurystyczne) bazujących na modelach matematycznych.

## 2.2. Podsumowanie dotychczas stosowanych metod i modeli dla rozpatrywanych problemów planowania taboru kolejowego

Dotychczasowy przegląd literatury światowej wskazuje, że problem planowania eksploatacji taboru kolejowego był rozpatrywany w niewystarczającym zakresie (Rozdział 2.1). Natomiast przeprowadzona analiza bibliometryczna potwierdziła potencjał badawczy i publikacyjny dla planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem jego przeglądów i napraw okresowych. Obie tematyki dotyczą następujących problemów badawczych znanych w literaturze przedmiotu, tj. *planowania taboru kolejowego* (ang. *rolling stock scheduling*) oraz *planowania przeglądów i napraw okresowych* (ang. *preventive maintenance scheduling problem*). Istnieje wiele prac dotyczących planowania zadań przewozowych dla taboru kolejowego, m.in. [16, 54, 97, 186], które ignorują harmonogram ich przeglądów w proponowanych modelach. W związku z tym pomija się powiązania między tymi dwoma problemami.

Przeglądy i naprawy okresowe (ang. *preventive maintenance*) taboru kolejowego są kluczowe z perspektywy niezawodności eksploatacyjnej transportu oraz bezpieczeństwa w ruchu lądowym [41, 139, 191]. Poprawa strategii zarządzania taborem i jego utrzymania, przy zastosowaniu modeli optymalizacji przeglądów stanowi ważny aspekt zrównoważonego rozwoju oraz konkurencyjności w sektorze kolejowym [36]. Badania na temat przeglądów i napraw okresowych w branży kolejowej przede wszystkim dotyczą infrastruktury, koncentrując się na aspektach technicznych, m.in. [13, 59, 73, 90, 92, 185, 188]. Natomiast dla problemów optymalizacji w tymże sektorze, prace głównie dotyczą modeli planowania taboru kolejowego, w tym cyrkulacji pojazdów kolejowych, np. [4, 19, 49, 50, 71]. Zjawisko planowania przeglądów i napraw okresowych dla jednostek taboru było często pomijane w literaturze przedmiotu [80, 85], a dedykowane im modele optymalizacji utrzymania są nieliczne [23, 36].

Proces planowania w transporcie kolejowym, w tym określenie planu taboru kolejowego (Rysunek 2.1), tradycyjnie przebiega sekwencyjnie (hierarchicznie). W związku z tym, wyniki poprzedniego etapu stanowią dane wejściowe lub ograniczenia dla kolejnego etapu planowania, co może prowadzić do eksploatacji systemu kolejowego w sposób nieoptymalny [111, 179]. Wady takiego podejścia to przede wszystkim duże prawdopodobieństwo opóźnień opracowania planów, dopiero na ostatnich etapach identyfikacja kosztów operacyjnych (np. liczba potrzebnego taboru), czy też możliwość nieadekwatnego planu, który nie jest dostosowywany zarazem do strony popytowej i podażowej [19, 179]. Rezygnacji z podejścia hierarchicznego, towarzyszy wzmożone zainteresowanie dla modeli zintegrowanych. Te z kolei, rozpatrują dwa lub więcej etapów planowania jednocześnie, tym samym zwiększając elastyczność i stopień odporności systemu kolejowego [19, 111, 179]. Niezależnie od tego czy przygotowanie harmonogramu bazuje na zintegrowanym czy sekwencyjnym podejściu, przeglądy i naprawy okresowe taboru są powiązane z innymi etapami. Wobec tego czynności związane z utrzymaniem nie powinny być planowane oddzielnie, w oderwaniu od innych etapów czy działań [57, 80]. Dlatego też badania w tej tematyce koncentrują się na modelach zintegrowanych (np. [18, 50, 111, 190]), co również potwierdza przegląd literatury przedmiotu.

Identyfikację luki badawczej oraz aktualizację wyników badań nad problematyką planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem przeglądów i napraw okresowych przeprowadzono przy zastosowaniu systematycznego przeglądu literatury (ang. *systematic literature review* – SLR). Przeszukano następujące bazy danych: ScienceDirect, Scopus, Springer, Web of Science oraz Google Scholar. Wybrano następujące słowa kluczowe i ich kombinacje: "railway", "rolling stock", "locomotive", "train unit", "operational planning", "scheduling", "maintenance", "optimisation", "algorithm", "model", "programming", "simulation". Wybrane słowa kluczowe wyszukano w tytułach artykułów, abstraktach i słowach kluczowych. Wyjątek to bazy Google Scholar i Springer, gdzie zweryfikowano dokumenty w całości. W niniejszym przeglądzie uwzględniono wyłącznie te prace, które odnoszą się do eksploatacji taboru kolejowego poprzez planowanie zadań przewozowych, gdzie uwzględniono w danych do modelu przeglądy i naprawy okresowe tegoż taboru.

Aktualny stan badań i wyniki badań przeglądu literatury zostały zawarte w Tabeli 2.2. Rozważano kilka ważnych aspektów, istotnych z perspektywy uniwersalności zastosowania proponowanych rozwiązań. Analizowano dotychczasowe prace pod kątem obecności w modelu różnych typów taboru kolejowego, wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych, zdefiniowany resurs cyklu przeglądowo-naprawczego (czasowy, kilometrowy), maksymalny horyzont planowania (prezentowany dla analizy przypadku) oraz rok publikacji (pierwszej w przypadku dwóch źródeł). Badane problemy przedstawiono z odpowiednimi odnośnikami do literatury wraz z zastosowaną metodą optymalizacji. W tabeli przyjęto następujące oznaczenia:

- D – metoda dokładna (ang. *exact methods*)
- P – metody przybliżona (ang. *approximate methods*)
- t – resurs czasowy (ang. *time*)
- km – resurs kilometrowy (ang. *mileage*)
- ILP – (ang. *integer linear programming*), programowanie liniowe całkowitoliczbowe
- MIP – (ang. *mixed integer programming*), mieszane programowanie całkowitoliczbowe
- NLP – (ang. *nonlinear programming*), programowanie nieliniowe
- B&B – (ang. *branch and bound*), dedykowana metoda podziału i ograniczeń
- SA – (ang. *simulated annealing*), algorytm symulowanego wyżarzania
- GA – (ang. *genetic algorithm*), algorytm genetyczny
- PLS – (ang. *probabilistic local search*), probabilistyczne wyszukiwanie lokalne
- ”+” – metody optymalizacji dostosowane do siebie

Tabela 2.2: Charakterystyka badań dotycząca problemu planowania eksploatacji i przeglądów okresowych taboru kolejowego

Metoda ogólna	Metoda optymalizacji	Różne typy taboru	Przeglądy wielopoziomowe	Resurs (t, km)	Horyzont planowania	Rok publikacji	Literatura
D	NLP+B&B	Tak	Nie	t	7 dni	1997	[192, 193]
P	GA	Tak	Tak	t	1 rok	1998	[113]
D	ILP+B&B	Tak	Nie	t	7 dni	2001	[27, 29]
P	PLS	Nie	Nie	t, km	1 dzień	2002	[189]
D	IP	Tak	Nie	t	5 dni	2004	[82–84]
D	ILP+B&B	Nie	Nie	t, km	7 dni	2009	[61]
D	LP	Tak	Nie	t	5 dni	2010	[17]
D	MIP	Tak	Nie	km	100 dni	2014	[49]
D	MIP	Tak	Nie	km	365 dni	2014	[50]
D	MIP	Tak	Nie	km	7 dni	2014	[21]
D	MIP	Tak	Tak	t, km	7 dni	2015	[71]
D	MIP	Tak	Nie	t, km	7 dni	2016	[10]
D, P	ILP, SA	Tak	Tak	t, km	208 dni	2017	[75]
D	ILP	Nie	Nie	t	40 dni	2017	[173]
D	MIP	Tak	Nie	t	1 dzień	2017	[178]
D	MIP	Tak	Nie	t	3 tygodnie	2018	[94]
D, P	MIP, GA	Tak	Nie	km	50 lat	2018	[20]
D, P	ILP, SA	Nie	Tak	t, km	607 dni	2019	[76]
D	MIP	Tak	Nie	km	7 dni	2019	[43, 44]
D	ILP+B&B	Nie	Nie	t, km	200 dni	2020	[45]
D	ILP	Nie	Nie	t	7 dni	2020	[85]

Pierwsze artykuły, w których pojawia się problematyka utrzymania taboru, jako ważnego kryterium optymalizacji planów dla przedsiębiorstw kolejowych, ukazały się pod koniec lat 90-tych i dotyczyły modeli zintegrowanych [113, 192, 193]. Przegląd literatury wskazuje, że czynności związane z przeglądami i naprawami okresowymi zostały uwzględnione przede wszystkim w takich problemach jak planowanie taboru kolejowego (czy też cyrkulacji), np. [20, 49, 50, 85, 113, 173], wyznaczanie trasy pojazdów (głównie do warsztatów), np. [61, 82–84] oraz przypisania lokomotyw [27, 29, 192, 193]. W celu poznania uwarunkowań powstałych dotychczas modeli i dedykowanych im metod, a także określeniu znaczenia przeglądów i napraw okresowych dla tych rozwiązań, przybliżono wybrane artykuły. Zaprezentowano analizę prac, które dotyczą nowatorskich podejść oraz są najpopularniejsze w ramach rozważanej problematyki, jednocześnie są zawarte w Tabeli 2.2.

Każda jednostka taboru ma określone trasy przejazdu w sieci, by realizować usługi transportowe (zwane zadaniami przewozowymi). Cyrkulacja taboru może obejmować również ich przeglądy i naprawy okresowe, by zapobiegać przemieszczaniu się zawodnych pojazdów, unikać pustych przebiegów do warsztatów lub zmniejszyć koszty ich eksploatacji. Giacco *i inni* [49, 50] zaproponowali integrację zadań planowania przeglądów z harmonogramem taboru, by zredukować koszty we włoskim przedsiębiorstwie kolejowym – Trenitalia. Głównym celem badań była minimalizacja całkowitej liczby zaangażowanych pojazdów w realizację usług transportowych, pustych przejazdów i przeglądów niskich poziomów, które były potrzebne do wykonania danego rozkładu jazdy. Rozważano rzeczywiste scenariusze, gdzie proponowane modele MIP (ang. *mixed integer programming*) rozwiązano za pomocą solvera CPLEX. Wyniki eksperymentów pokazały, że zintegrowane podejście do harmonogramów może znacznie zmniejszyć liczbę pociągów i pustych przejazdów w porównaniu z obecnym ruchem taboru. Poprawa wyników głównie dotyczyła redukcji nawet o 23% liczby pociągów potrzebnych do obsługi wszystkich zaplanowanych usług transportowych. Maksymalny horyzont czasowy dla planowanych harmonogramów to rok [50].

Podobny problem był rozpatrywany w pracy Cacchiani *i inni* [17]. Zaproponowano heurystykę opartą na generowaniu kolumn w celu minimalizacji liczby używanych jednostek pociągowych. W rozszerzonym modelu uwzględniono ograniczenia dotyczące przeglądów, które wymagały, aby wszystkie jednostki pociągowe przechodziły co najmniej jeden przegląd w ciągu tygodniowego rozkładu jazdy. Warto podkreślić, że w tej pracy przeglądy okresowe stanowią kluczowe ograniczenie techniczne dla modeli planowania taboru, natomiast celem jest unikanie nadmiernej konserwacji. Prezentowane wyniki poprawiają rozwiązania praktyków o 10-20 %. W badaniach [49, 50] czynności związane z przeglądami i naprawami okresowymi pojazdów kolejowych są oparte na polityce utrzymania bazującej na przebiegach, natomiast w opracowaniu [17] cykle utrzymania zależą od ram czasowych dla każdej jednostki kolejowej. W obu przypadkach proponowane modele były dedykowane różnym typom taboru.

Codziennie przeglądy tzw. inspekcje, były rozpatrywane dla problemu planowania składu pociągu (ang. *train-set scheduling* – TSS) przez Zhao *i inni* [189]. Dla ustalenia rozkładu jazdy pociągów zaproponowano algorytm, który najpierw tworzy plan regularnych inspekcji, a następnie znajdowana jest trasa Hamiltona. Jeśli trasa Hamiltona spełnia ograniczenia dotyczące codziennej inspekcji, może ona reprezentować wykonalny harmonogram zestawów pociągów. Celem było znalezienie możliwych do wykonania rozkładów jazdy w krótkim czasie (w kilkanaście minut), gdzie liczba użytych pociągów była jak najmniejsza. Proponowane rozwiązanie stanowi algorytm metaheurystyczny oparty o metody losowe (ang. *probabilistic local search* – PLS). W niniejszej pracy nie rozpatrywano wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych, natomiast plan przeglądów był narzucany z góry dla krótkoterminowego horyzontu czasowego.

W powyższych artykułach, tj. [17, 49, 50, 189], czynności związane z przeglądami są opisane ogólnie i nie ma rozróżnienia na poziomy, w związku z tym nie uwzględniono wielopoziomowej struktury cykli przeglądowo-naprawczych. Ponadto w prezentowanych modelach, funkcja celu nie była bezpośrednio związana z przeglądami.

Jedna z nowszych prac autorstwa Mira *i inni* [85] dotyczy problemu planowania przeglądów na dany okres w ramach normalnej eksploatacji, ale tylko dla jednego typu taboru. Dodatkowo przeprowadzono analizę wykonalności harmonogramów przeglądów z uwzględnieniem niepewności związanej z czasem trwania tychże czynności. Model programowania liniowego całkowitoliczbowego był rozwinięciem modelu opisanego w pracy Tréfond *i inni* [173], gdzie funkcja celu faworyzuje plany odporne na opóźnienia. Optymalny harmonogram dla analizowanych przypadków portugalskiego przewoźnika kolejowego można uzyskać w czasie krótszym niż pół godziny dla 7-dniowego horyzontu planowania. Jednakże scenariusz z długim czasem trwania przeglądów i napraw okazał się niewykonalny do rozwiązania przez proponowane metody.

Ograniczenie zastosowania metod optymalizacji programowania matematycznego jest istotne z perspektywy wielu rzeczywistych problemów [85], które zwykle należą do klasy NP-trudnych [20, 61, 89]. Dla tak złożonych przypadków lub dużych instancji problemów warto zastosować heurystyki lub metody przeszukiwania lokalnego, aby w sposób efektywny zapewnić rozwiązanie bliskie optymalnemu. Takie podejście zostało zaprezentowane przez Srisankarajah *i inni* [113] w 1998 roku, jednej z pierwszych prac dotyczącej rozpatrywanej problematyki w niniejszej dysertacji. W tym celu, został użyty algorytm genetyczny do rozwiązania problemu planowania przeglądów i napraw okresowych w *Hong Kong Mass Transit Railway Corporation* – MTRC. Rozważanym kryterium była minimalizacja całkowitego kosztu przeglądów, które były wykonane za późno bądź za wcześnie. Oznacza to, że celem było podejmowanie czynności związanych z utrzymaniem taboru jak najbliżej terminów ich wykonania, ponieważ zbyt wczesne lub zbyt późne działania wiązały się z kosztami. Analizowane symulacje dotyczyły 27 pociągów, a każdy z nich składał się z pięciu jednostek. Plany przeglądów miały 12-miesięczny horyzont czasowy, obejmujący

niedziele i święta, kiedy warsztaty były zamknięte. Rozważane podejście uwzględniało zmianę w polityce utrzymania pojazdów kolejowych. Oznaczało to, że skład pociągu był utrzymywany jako całość, nie dzielono go na poszczególne wagony czy jednostki. Osiągnięto poprawę kosztów o około 25 % w porównaniu z ręcznym planowaniem w firmie MTRC. Jednak proponowane rozwiązanie nie zostało wdrożone z powodów praktycznych. Mianowicie wymagało ono zaangażowania dużej liczby przestawień jednostek między pociągami, co pochłaniało dużo czasu i siły roboczej. Ponadto model uwzględniał tylko wyższe poziomy przeglądy (ang. *overhaul maintenance*), związane z remontem w warsztacie i trwające od 16 do 22 dni. W modelu zabrakło przeglądów i napraw niższych poziomów, których czas trwania może wynosić do 6 godzin [113].

Odnosząc się do aspektu zmniejszenia kosztów utrzymania, jest między innymi koncepcja łączenia czasów bezczynności między zadaniami i taborem, aby zmienić je w okna serwisowe. Takie podejście można znaleźć między innymi w [94], gdzie zwiększony ruch i konieczność wykonania nawet o 20% więcej przeglądów u fińskiego operatora kolejowy *VR Group*, spowodowało poszukania dodatkowych oszczędności. Poza łączeniem czasów bezczynności lokomotyw znajdujących się w tej samej zajezdni, wskazano tańsze godziny pracy działań serwisowych. W modelu założono, że czynności związane z przeglądami i naprawami nie będą się odbywać w nocy oraz w weekendy, by uniknąć wysokich kosztów czasu pracy zajezdni i personelu. W symulacjach brano pod uwagę maksymalnie trzy tygodniowy horyzont czasowy, z dyskretyzacją czasu 15 minut i 106 lokomotyw. Proponowane rozwiązania w postaci planów utrzymania dotyczy jedynie przeglądów niższych poziomów. Ponadto w modelu uwzględniono czas buforowy by urealnić wyniki, ale nie dotyczy to opóźnień w ruchu lub opóźnień czynności konserwacyjnych, których wystąpienie jest wysoce prawdopodobne.

Canca i inni [20] połączyli problem cyrkulacji taboru i lokalizacji zajezdni dla Sieci Szybkiego Transportu Kolejowego w Sewilli (ang. *Railway Rapid Transit Network of Seville*). W podejściu sekwencyjnym najpierw określono minimalną liczbę pociągów potrzebną do wykonania rzeczywistego rozkładu jazdy i uzyskano tygodniowy obieg pociągów. Na tej podstawie określono przebieg każdej jednostki i termin wykonania przeglądów [21]. Ostatnim krokiem było określenie lokalizacji zajezdni [20]. Do opracowania planów obiegu taboru z uwzględnieniem schematu utrzymania rotacyjnego wykorzystano model MIP, a następnie do ostatniego etapu zastosowano algorytm genetyczny, który dał najlepsze wyniki. W eksperymentach założono, że wszystkie pociągi mają podobne przebiegi, a przeglądy trwają od 2 do 3 dni i dotyczą jednego poziomu. Przeanalizowano również ile jednostek rezerwowych jest potrzebnych, gdy inne pociągi są na przeglądzie. Warto podkreślić, że w pracy [20] przeanalizowano długie horyzonty inwestycyjne tj. 25 i 50 lat, które sporadycznie są badane.

Maróti i Kroon skupili się na modelach tras utrzymania taboru z pilnymi jednostkami kolejowymi, które musiały dotrzeć do warsztatu na czas [82–84]. Zaproponowali dwa różne



sformułowania MIP dla problemu wyznaczania tras utrzymania pociągów pasażerskich, przeznaczone dla fazy operacyjnej. Na przykład, w artykule [82] opisano tzw. model przejściowy (ang. *transition model*), który zawierał informacje o możliwościach manewrowania oraz o tym, jakie nowe przejścia były dozwolone. Celem było ustalenie, czy jest wystarczająco dużo czasu na wykonanie operacji manewrowych związanych z danym przejściem bez powodowania opóźnień. Następnie przypisano wartość kosztu do każdego dozwolonego nowego przejścia i zdefiniowano ostateczny koszt, którego rozwiązanie opisano jako prostą funkcję kosztów nowych przejść. Rozważany model wymagał znacznie mniej danych dotyczących szczegółów manewrowania niż proponowany w tzw. modelu scenariusza (ang. *scenario model*) [84], ale oba modele były przeznaczone dla krótkich horyzontów planowania do 5 dni. Z drugiej strony w tzw. modelu wymiany (ang. *interchange model*) [83] nie były przeprowadzane przeglądy niskich poziomów, tzn. częste i krótko trwające. Głównym celem było uniknięcie pustych przebiegów taboru wymuszonych przez pilne czynności konserwacyjne, gdzie uwzględniano wyższe poziomy utrzymania, które wymagały specjalistycznych warsztatów.

W pracy [178], przeanalizowano problem zmiany rozkładu jazdy taboru kolejowego w czasie rzeczywistym z uwzględnieniem terminów przeglądów okresowych. Porównano trzy modele MIP dla rzeczywistych przypadków kolei holenderskich i głównego operatora pociągów pasażerskich (*Netherlands Railways – NS*). Wadą proponowanych rozwiązań było to, że po włączeniu dodatkowych typów taboru liczba możliwych składów drastycznie wzrasta, przez co modele te mogą nie mieć zastosowania w praktycznych przypadkach.

Borndörfer *i inni* [10] zaproponowali ogólny model MIP oparty na hipergrafie oraz zintegrowany algorytm dla rozważanego problemu planowania rotacji taboru kolejowego. Niniejsze podejście uwzględniało duży zestaw wymagań, w tym ograniczenia związane z utrzymaniem. Proponowane rozwiązanie przetestowano na instancjach odtwarzających rzeczywiste przypadki niemieckiego przewoźnika Deutsche Bahn Fernverkehr AG. Dla problemów o bardzo dużej skali (np. z dużą liczbą węzłów), które nie mają ograniczeń dla przeglądów mogą być rozwiązane z udowodnioną optymalnością. Problemy, które spełniają ograniczenia bazowe oraz związane z przeglądami są znacznie trudniejsze do rozwiązania, ale wciąż uzyskano bardzo wysokiej jakości wyniki, gdzie luka w optymalności wynosiła do 6%. Rozpatrywano jedynie tygodniowe plany taboru, gdzie przeglądy okresowe były jednakowe dla wszystkich typów taboru zarówno pod względem cyklu czasowego i kilometrowego.

Przeglądy i naprawy okresowe pojawiają się często w problemach przypisania lokomotyw i wagonów. Na przykład Cordeau *i inni* [27] proponują model programowania liczb całkowitych na dużą skalę i heurystyczne rozwiązanie dedykowane dla przedsiębiorstwa kolejowego VIA Rail w Kanadzie. Celem było znalezienie minimalnego zestawu cykli wyposażenia, z uwzględnieniem lokomotyw i wagonów różnych typów. Czynności związane z przeglądami były wykonywane w stałych odstępach czasu (w tym przypadku w nocy),

w jednym serwisie. Z drugiej strony dla każdego typu jednostki istniał koszt w przeliczeniu na kilometr związany m.in. przeglądami, który stanowił ograniczenie w modelu. Ten sam problem z dodatkowymi ograniczeniami, takimi jak położenie wagonów w składzie pociągu, minimalne czasy połączeń, rozpatrywano w artykule [79].

W pracach Cordeau *i inni* [27–29], opracowano podejście do modelowania i rozwiązywania problemu dla przydziału lokomotyw i wagonów jednocześnie, dla okresowego rozkładu jazdy, aby znaleźć minimalny koszt zestawu cykli pojazdów. Zaproponowany model w artykule [28], został oparty na zestawie sieci czasoprzestrzennych powiązanych z różnymi dostępnymi typami pojazdów. Dokładny algorytm rozwiązania bazuje na podejściu dekompozycji Bendersa, który wykorzystuje rozdzielność problemu z jednym dodatkowym ograniczeniem. Następnie w [27] opracowano bardziej zaawansowany model, w którym pojawia się aspekt utrzymania. Przeglądy były wykonywane w ciągu dnia (podczas okresów bezczynności), w stałych odstępach czasu (co najmniej raz w tygodniu), w jednym centrum serwisowym. Otrzymany model jest optymalizowany metodą podziału i ograniczeń (B & B), w której relaksacje liniowe są rozwiązywane poprzez generowanie kolumn. Model i strategia rozwiązania zostały przetestowane na danych z VIA Rail w Kanadzie. Metody z prac [27, 28] zostały rozszerzone w kolejnych badaniach Cordeau *i inni* [29] o dodatkowe ograniczenia, w tym związane z utrzymaniem tj. maksymalny czas między kolejnymi postojami w warsztatach, czasy wykonania przeglądów i napraw okresowych. Ponadto, wykonalne przejazdy muszą zaczynać się i kończyć na przystankach w warsztatach remontowych. Ponieważ VIA Rail Canada jest zobowiązana do wykonywania prac konserwacyjnych w oparciu o przebieg każdej lokomotywy, przedstawiony model nie ma bezpośredniego zastosowania.

Ziarati *i inni* [192] analizowali problem przypisywania lokomotyw do pociągów z niejednorodnymi składami w kanadyjskiej spółce kolejowej – Canadian National North America (CN). Rozważano harmonogram na bardzo dużą skalę, tj. około 1300 lokomotyw (26 typów) i 2000 pociągów w ciągu jednego tygodnia. Proponowany model programowania nieliniowego liczb całkowitych obejmuje jedno z głównych ograniczeń w postaci dotrzymywania terminów przeglądów okresowych i krytycznych lokomotyw, które muszą być kierowane do warsztatu na czas. Ten problem został zamodelowany jako problem przepływu wielu towarów (ang. *multicommodity flow problem* - MCF) z dodatkowymi ograniczeniami, który został rozłożony na mniejsze nakładające się problemy obejmujące od 500 do 1000 pociągów. Te podproblemy rozwiązano za pomocą metody dekompozycji Dantzig-Wolfe'a, w której każdy z nich został sformułowany w zależności od stanu lokomotywy jako ograniczone lub nieograniczone problemy najkrótszej ścieżki. Wyniki eksperymentów dały poprawę do 7 % w stosunku do obecnych rozwiązań w przedsiębiorstwie. Podejście to pozwalało na ustaleniu planów przeglądów co najwyżej o tygodniowym horyzoncie czasowym. Ponadto symulacje wymagały długich czasów działania, np. dla trzydniowego scenariusza, wyników należało się spodziewać po dwunastu godzi-

nach. W kolejnej pracy Ziarati *i inni* [193] rozpatrywano ten sam problem, natomiast rozszerzono dotychczasowy model o dodatkowe ograniczenia, w tym dotyczące określenia czasu jaki upłynął od ostatniego przeglądu lokomotywy i czy stanie się krytyczna, a także pojemności dobowej warsztatów. Ulepszono metodologię rozwiązania, oznaczoną jako *branch-first, cut-second*, która znacznie zmniejsza lukę relaksacji LP (nawet o 30%) i całkowity czas obliczeń (do około 3 godzin), w porównaniu do podejścia z [192]. Niniejsze prace rozpatrywały utrzymanie floty opartej jedynie na czasie, w krótkoterminowym horyzoncie czasowym. Nie brano pod uwagę wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych.

Dla problemu sekwencjonowania pociągów, polegającym na konstruowaniu tras taboru na podstawie rozkładu jazdy, Chung *i inni* [25] zaproponowali rozwiązanie w postaci modelu matematycznego i hybrydowego algorytmu genetycznego. Głównym założeniem było zrównoważenie przebiegów na trasach kolei koreańskiej, a tym samym zwiększenie łatwości utrzymania taboru i wyrównanie eksploatacji dostępnego taboru. Natomiast cel to skonstruowanie wykonalnych planów sekwencji pociągów, obejmujących ograniczenia dla zajezdni, która ma skończoną liczbę miejsc zatrzymania, obsługi i konserwacji. Pomimo praktycznego uwzględnienia wymagań, w modelu brakuje wielopoziomowych przeglądów.

Frisch *i inni* [44] opracowali model na multigrafie i sformułowali MIP dla konkretnego problemu planowania lokomotyw (ang. *locomotive scheduling problem* - LSP) z ograniczeniami utrzymania (ang. *locomotive scheduling problem with maintenance constraints* - LSPM). Proponowane rozwiązania były dostosowane do wymagań austriackiej firmy kolejowych przewozów towarowych - *Rail Cargo Austria* (RCA). Liczba lokomotyw okazała się głównym czynnikiem trudności obliczeniowych, co z kolei spowodowało nagły wzrost liczby krawędzi utrzymania w grafie. Nawet dla małych instancji problemu czas obliczeń nie był akceptowalny. Dodatkowo zastosowano podejście RHA (ang. *rolling horizon approach*), polegające na podziale horyzontu planowania na kilka przedziałów czasowych. To pozwoliło na skrócenie czasu obliczeń, natomiast jakość rozwiązań uległa znacznemu pogorszeniu. W pracy [43] udoskonalono podejście do rozwiązania problemu LSPM, aby można je było zastosować w warunkach rzeczywistych. Między innymi rozszerzono funkcję celu o dodatkowe aspekty, w tym uwzględniono realne koszty za prace związane z utrzymaniem, zastosowano metody nakładania się horyzontu ORHA (ang. *overlapping rolling horizon approach*), pozwalające na znalezienie dobrych rozwiązań dla dużych rzeczywistych przypadków w krótkim czasie obliczeniowym. Ponadto zaproponowano algorytm 2SMH (ang. *two-stage matheuristic*) składający się z dwóch etapów i bazujący na proponowanych dokładnych formułach (LSP-MIP i LSPM-MIP). Dzięki tej koncepcji rozwiązania dla dużych rzeczywistych instancji RCA (np. 2290 pociągów i 114 lokomotyw) były wysokiej jakości i bliskie rozwiązaniom optymalnym. Natomiast w obydwu przypadkach były rozpatrywane regularne przeglądy oparte na przebiegu, gdzie horyzont planowania dotyczył kilku dni. Mimo różnych typów lokomotyw uwzględnionych w modelu, przeglądy były jednakowe dla wszystkich jednostek.

W pracy [67] zaproponowano zintegrowane rozwiązanie do zmiany harmonogramów pociągów i przydziału lokomotyw w przypadku epidemii COVID-19. Aby zarezerwować czas potrzebny na przeglądy lokomotyw, ograniczono dla nich liczbę zadań jakie mogą realizować. Natomiast brak innych parametrów, związanych bezpośrednio z działaniami konserwacyjnymi. Dokładny model MILP dla rozpatrywanego problemu został rozwiązany przy użyciu zoptymalizowanego dwuetapowego algorytmu sekwencyjnego, a zaproponowane rozwiązanie zostało przetestowane dla studium przypadku chińskiej kolei międzymiastowej Beijing-Tianjin.

Warto podkreślić, że wszystkie powyższe badania rozpatrują przeglądy i naprawy okresowe jako element dodatkowy (np. jako ograniczenie) dla innych procesów optymalizacyjnych. Czynności związane z utrzymaniem zwykle odbywają się regularnie, w dużych częstotliwościach i wynikają z góry na podstawie narzuconych terminów (np. co 3 dni). Czasami zmiany w planowaniu przeglądów są podyktowane innymi czynnikami, jak trasy pociągów, obciążenia warsztatu czy priorytetowe składy. Natomiast w tych przypadkach, to terminy wykonania przeglądów i napraw okresowych jest dostosowana do wielu innych aspektów, które są optymalizowane.

Niewiele jest badań dotyczących poprawy wykorzystania floty kolejowej, gdzie dostrzeżga się wpływ obciążenia taboru zadaniami przewozowymi na plan utrzymania [71, 76]. W pracy Lai *i inni* [71] rozważano możliwość utworzenia optymalnego planu przydziału floty, który może pokryć zaplanowane zadania przewozowe i spełnić związane z nimi wymagania oraz ograniczenia przy minimalnych kosztach w rozpatrywanym horyzoncie. Celem był wzrost efektywności eksploatacji taboru z uwzględnieniem jego wielopoziomowych przeglądów. To jeden z nielicznych artykułów, gdzie brane są pod uwagę różne poziomy przeglądy w modelu. Jednakże uwzględniono jedynie dwa pierwsze poziomy przeglądy, tym samym pomijając naprawy wyższego rzędu (w tym przypadku tj. trzecią i czwartą). Przypisanie poszczególnych pociągów do określonych tras w ramach łącznego przebiegu każdego składu jest symulowane do tygodnia wprzód. Natomiast ostateczny plan wymagał codziennej optymalizacji, która może zwiększyć wykorzystanie taboru do 5% przez operatora kolei na Tajwanie tj. *Taiwan Railways Administration* (TRA). Wyniki eksperymentów obliczeniowych pokazały, że jakość zaproponowanej hybrydowej metody heurystycznej (opartej na modelu MIP) jest tak dobra jak wyjściowy model MIP (który ma optymalne wyniki), ale czas generowania rozwiązań jest znacznie krótszy (na przykład dla wybranych obliczeń tj. z 3 godzin do około 11 sekund).

Wpływ zmniejszenia częstotliwości przeglądów i napraw okresowych w aspekcie kosztowym została zbadana przez B. Lin i R. Lin *i inni* w pracach [75, 76]. Rozpatrywano wyłącznie przeglądy wysokiego poziomu jako HMP problem (ang. *high-level maintenance plan problem*) dla pociągów dużych prędkości EMU (Electric Multiple Unit) chińskiego regionalnego operatora kolejowego - *Shanghai Railway Bureau*(SRB). Celem było zminimalizowanie całkowitego kosztu wynikającego z niewystarczającego wykorzystania

pozostałego przebiegu taboru w odniesieniu do wartości docelowej, spowodowanej narzucenymi terminami wysyłania taboru do warsztatów. Przy ustalaniu terminów utrzymania istotne znaczenie miały takie aspekty jak przebieg taboru, zapotrzebowanie na usługę przewozową czy też liczba taboru wysyłanego do warsztatu w tym samym czasie. Dla przypadków małej skali zastosowano klasyczne metody dokładne jak programowanie liniowe (przy użyciu solvera Gurobi). Natomiast dla praktycznych problemów o większej skali (np. duży rozmiar floty) opracowano algorytm heurystyczny oparty na symulowanym wyżarzaniu (SA). Obie metody okazały się znacznie lepsze od ręcznego planowania, którego koszt oszacowano na 3 619 200 pociągokilometrów dla badanego przypadku (124 pociągi typu CRH2 EMU, plan dla 607 dni) [76]. W wyniku analizy porównawczej różnych strategii planowania zauważono, że im większa jest zdolność do jednoczesnego utrzymania, tym mniejszy jest pozostały przebieg wszystkich składów pociągów. Ponadto zwiększenie zdolności do równoczesnego utrzymania poprzez zatrudnienie większej liczby mechaników w SRB ma relatywnie niższy koszt, niż nie wykorzystanie pozostałego przebiegu w celu realizacji zadań przewozowych.

W artykule Gao *i inni* [45] celem jest znalezienie planu sekwencji podróży (ang. *trip sequence planning problem*) we wschodniej chińskiej kolei dużych prędkości, który prowadzi do minimalnych kosztów jej eksploatacji. W modelu brano pod uwagę jedynie przeglądy poziomu pierwszego, których wykonanie musi nastąpić cyklicznie po 4000 km lub 48 godzinach. Sformułowano dwa modele ILP na podstawie grafu sekwencji podróży, mianowicie model oparty na ścieżkach (ang. *path-based model*) i model oparty na łukach (ang. *arc-based model*). Te dwa modele są często stosowane dla sieci kolei dużych prędkości [45, 61], jednakże skuteczność ich zastosowania jest jeszcze testowana poprzez eksperymenty obliczeniowe. Dla problemów o średniej skali w pracy [45], model oparty na łukach może być rozwiązany w sposób optymalny za pomocą solvera ILP (w systemie Gurobi) w akceptowalnym czasie. Do rozwiązania modelu opartego na ścieżkach opracowano dostosowany algorytm *branch-and-price*, który jest dedykowany dużym przypadkom (tj. całkowita długość sieci zaczyna się od 2400 km, zestaw stacji i kursów liczy odpowiednio od 47 i 390 pociągów). Wyszukiwanie rozwiązań jest oparte na metodzie podziału i ograniczeń (ang. *branch-and-bound algorithm*). Dwukierunkowy algorytm ustawiania etykiet (algorytm Bi-LC), który znacznie skraca czas obliczeń problemu cenowego, jest wystarczająco dobry zarówno pod względem skuteczności, jak i wydajności, np. ponad 75% rozwiązań jest optymalnych.

Na podstawie regulacji utrzymania koreańskiej kolei dużych prędkości KORAIL (*Korea Railroads, Corp.*), Hong *i inni* [61] opisali problem planowania sekwencji podróży. Sformułowano dwa modele programowania liniowego, mianowicie model oparty na ścieżkach i model oparty na łukach, dla których poszukiwanie rozwiązań bazowało na takich metodach jak w pracy Gao *i inni* [45]. Dodatkowo zaproponowano dwuetapowe podejście heurystyczne, gdzie rozwiązanie z obniżonymi wymaganiami dla przeglądów zostało

najpierw uzyskane przez algorytm przepływu minimalizacji kosztów, a następnie zastosowano heurystykę do modyfikacji rozwiązania w celu spełnienia wymagań przeglądów. Rezultatem była poprawa nawet o 8,8% liczby całkowitych dni pracy składów pociągów w stosunku do dotychczasowej implementacji i uzyskane optymalne rozwiązanie dla aktualnego tygodniowego rozkładu jazdy.

Problem wyznaczania trasy pojazdu z dodatkowym ograniczeniem dotyczącym przeglądów jest zazwyczaj trudny obliczeniowo [61]. Dlatego też w pracach [45, 61] rozważono jedynie przeglądy niskiego poziomu oraz krótkoterminowy horyzont planów podróży. Zaproponowano rozwiązania oparte jedynie o metody dokładne (tj. ILP oraz B & B), które pozwoliły na uzyskanie optymalnych wyników. To co wyróżnia te prace od innych, to fakt że plany podróży muszą spełnić kryterium utrzymania wszystkich jednostek pociągowych. Przeglądy i naprawy okresowe stanowią kluczowy aspekt w modelu decyzyjnym. Natomiast warunki wykonania przeglądów są narzucone z góry, według obowiązujących regulacji. Autorzy zwracają uwagę na konieczność rozbudowania modeli, gdzie zostaną uwzględnione typy pociągów oraz wyższe poziomy utrzymania, co jest bardzo ważne dla pragmatycznego podejścia do problemu.

W literaturze przedmiotu istnieje luka, która dotyczy badania wpływu zmiany przydziału taboru kolejowego do zadań przewozowych (czyli jego eksploatacji – *rolling stock scheduling*) na plan przeglądów i napraw okresowych tegoż taboru (ang. *maintenance scheduling problem*). Znalezione publikacje prezentują kompleksowe badania, gdzie działania związane z utrzymaniem taboru, to głównie ograniczenia do modelu lub są jedną z wielu danych wejściowych. Zintegrowane modele, które stanowią słuszne podejście dla złożonych problemów planowania taboru kolejowego, uwzględniają przeglądy i naprawy okresowe podczas optymalizacji innych procesów decyzyjnych np. tras pociągów czy liczby zaangażowanego taboru. Natomiast istnieje tendencja do narzucania z góry terminów wykonania przeglądów i napraw okresowych na podstawie ustalonego cyklu przeglądowo-naprawczego floty [45, 61]. Na niewielkie zmiany w planach utrzymania taboru mogą mieć wpływ takie czynniki jak np. trasy taboru, obciążenia warsztatów. Motywem tych badań, obok innych kryteriów, jest minimalizacja kosztów związana z m.in. przestojami, czasem trwania i częstotliwością przeglądów, trasą do warsztatu, kompozycją taboru lub maksymalizacją dostępności taboru, wykorzystania przebiegów między poszczególnymi przeglądami. Jednakże niewiele jest prac dotyczących aspektów, które bezpośrednio wpływają na przeglądy i naprawy okresowe, czyli obciążenia zadaniami przewozowymi pojazdów kolejowych [45, 61, 75, 76]. Poprawa planu eksploatacji taboru kolejowego opiera się głównie na programowaniu matematycznym (ILP, MIP, NLP) oraz dopasowanej do bazowego rozwiązania metodzie podziału i ograniczeń (B&B), czyli metodach dokładnych. Celem zastosowania B&B jest przede wszystkim skrócenie czasu obliczeń dla uzyskania rozwiązań optymalnych. Natomiast by osiągnąć rozwiązania dla złożonych (i dużych rozmiarów instancji) problemów planowania taboru kolejowego, często dla tych metod stosuje

się podejścia relaksacji ograniczeń czy linearyzacji (model liniowy wynikający z wnioskowania rozmytego). To powoduje uzyskanie uproszczonego rozwiązania, które nie jest optymalne dla rozważanego problemu. Jest to zaskakujące, ponieważ to metody przybliżone, a w szczególności algorytmy genetyczne, stanowią najczęściej opisywaną metodą optymalizacji przeglądów i napraw okresowych w gospodarce [5]. Natomiast znaleziono zaledwie kilka prac, gdzie zastosowano nowoczesne metody optymalizacji jak symulowane wyżarzanie czy algorytm genetyczny (m.in. [58, 76, 113]). W proponowanych modelach nie uwzględniono wszystkich przeglądów wielopoziomowych dla danego pojazdu. w nielicznych przypadkach, analizowano wybrane grupy przeglądów i napraw okresowych (niskiego bądź wysokiego poziomu). Jednakże nie znaleziono badań, gdzie rozpatrywano by przeglądy i naprawy okresowe dla pełnego cyklu przeglądowo-naprawczego floty. Ponadto w głównej mierze brano pod uwagę wyłącznie jeden z resursów, czasowy bądź kilometrowy, warunkujących termin wykonania rozważanych przeglądów. Znaczna część badań, koncentruje się na krótkich horyzontach czasowych planów eksploatacji. Z perspektywy przeglądów i napraw okresowych wysokiego poziomu, może to nie być właściwe podejście do problemu. To bardzo ważne aspekty dla modelu, ponieważ sprawiają że lepiej odzwierciedlają rzeczywiste procesy planowania systemów kolejowych. Z drugiej strony prezentowane publikacje w głównej mierze dotyczą analizy rzeczywistych problemów przedsiębiorstw kolejowych [45, 85, 113, 192]. Wskazana luka badawcza może również wynikać z faktu, że plany przeglądów były opracowywane ręcznie, a w niektórych przedsiębiorstwach kolejowych nadal są [71, 190]. Dlatego też, inne podejścia do optymalizacji planów eksploatacji taboru kolejowego nie były rozwijane.

W związku z powyższym, w niniejszej dysertacji podjęto badania mające na celu opracowanie modeli decyzyjnych, bazujących na metodach badań operacyjnych, które poprawią plan eksploatacji taboru kolejowego w taki sposób, by zwiększyć jego dostępność, związaną z przeglądami i naprawami okresowymi. Priorytetem jest uwzględnienie w proponowanych modelach następujących czynników, jak przeglądy wielopoziomowe, których wykonanie bazuje zarówno na resursie czasowym i kilometrowym, wiele typów pojazdów ze zróżnicowanymi cyklami przeglądowo-naprawczymi oraz symulacje długoterminowych planów eksploatacji taboru kolejowego. Ponadto, część rezultatów tych badań została opublikowana przez autora dysertacji w następujących pracach [58, 104, 105].

### **2.3. Metody badań operacyjnych w rozwiązywaniu zagadnień planowania eksploatacji i przeglądów okresowych taboru**

W wyniku przedstawionego przeglądu literatury w Rozdziale 2.2, dokonano podsumowania stosowanych dotychczas metod badań operacyjnych w problemie planowania eksploatacji i przeglądów okresowych taboru kolejowego. Przybliżenie definicji oraz wa-

runków użycia metod optymalizacji, pozwoli na ich zgrubną ocenę i wskazanie kierunku realizacji badań nad modelami decyzyjnymi w niniejszej rozprawie.

Ze względu na to, że problemy planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem przeglądów i napraw okresowych są problemami optymalizacji dyskretnej lub dyskretno-ciągłej, znakomita większość z nich należy do klasy problemów NP-trudnych (ang. *NP-hard problems*) [20, 43, 61, 89]. Są to takie zadania, których nie można rozwiązać optymalnie (dla wartości funkcji kryterialnej) w czasie ograniczonym wielomianem zależnym od rozmiaru problemu (najczęściej liczby zadań transportowych czy ilości taboru) [7, 11]. Dlatego też, przy rozwiązywaniu problemów optymalizacji kombinatorycznej (ang. *combinatorial optimisation problems*), stosuje się **metody dokładne** (ang. *exact methods*) i **metody przybliżone** (ang. *approximate methods*). Pod pojęciem metod dokładnych w optymalizacji rozumie się narzędzia teoretyczne modelowania analitycznego, które dostarczają rozwiązania optymalne lub wykazują nieistnienie takich rozwiązań (czas potrzebny do jego uzyskania jest zbyt długi) [56]. Metody dokładne nie są odpowiednie dla problemów należących do klasy NP-trudnych, ponieważ czas pracy tych algorytmów rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem rozmiaru problemu. Wyjątkiem są zadania optymalizacyjne ograniczone do instancji o niewielkich rozmiarach (np. liczba zmiennych decyzyjnych) [64, 182]. W związku z tym, dla małych rozmiarów instancji problemów planowania zadań przewozowych, można zastosować następujące metody dokładne:

- **Metoda przeglądu zupełnego** (ang. *brute force search, exhaustive search*) – najprostsza metoda dokładna, która dla wygenerowanego skończonego zbioru rozwiązań dopuszczalnych, wybiera rozwiązania o najmniejszej (największej) wartości funkcji celu. Wadą tej metody jest czasochłonność, która wynika z obliczania wartości funkcji celu dla każdego rozwiązania dopuszczalnego. W efekcie, wraz ze wzrostem liczności przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych nawet dla małych instancji problemów optymalizacyjnych, czas znalezienia rozwiązania optymalnego ulega znacznemu wydłużeniu, choć jest wartością skończoną [96].
- **Metoda podziału i ograniczeń** (ang. *branch and bound, B & B*) – polega na systematycznym poszukiwaniu zbioru rozwiązań w zadaniu optymalizacyjnym, przy założeniu że jest skończony. Zbiór wszystkich możliwych rozwiązań jest sekwencyjnie dzielony na coraz to mniejsze podzbiory, a dla każdego podzbioru obliczane jest dolne ograniczenie wartości funkcji celu. Jeżeli wyliczone dolne ograniczenie jest większe niż górne ograniczenie (tj. najlepsza do tej pory znaleziona wartość kryterium dla rozwiązywanej instancji), wówczas sprawdzany podzbiór rozwiązań jest odrzucany. W przeciwnym razie ów podzbiór jest ponownie dzielony. Proces ten postępuje do chwili, aż wszystkie możliwe rozwiązania zostaną przejrane, bądź odrzucone. To przesądza o wykładniczej złożoności obliczeniowej tej metody [108].



— **Programowanie matematyczne** (ang. *mathematical programming*) – to szczególna klasa problemów decyzyjnych dla których jest konstruowany model matematyczny. Rozwiązanie optymalne tego problemu polega na poszukiwaniu ekstremum funkcji celu dla zadanego zbioru rozwiązań dopuszczalnych [55]. Dla problemu maksymalizacji funkcji celu  $f(x) \rightarrow \max$ , która spełnia następujące ograniczenia:

$$\begin{aligned} g(x) &\leq 0, \\ h(x) &= 0. \end{aligned}$$

gdzie  $x$  należy do  $X$ , zaś  $X$  jest podzbiorem przestrzeni  $\mathbb{R}^n$ , zaś  $f$ ,  $g$  i  $h$  są funkcjami zdefiniowanymi na tym podzbiore. Klasyfikacja najważniejszych problemów programowania matematycznego to programowanie liniowe, programowanie całkowitoliczbowe, programowanie zerojedynkowe, programowanie kwadratowe, programowanie nieliniowe [52]. Programowanie liniowe jest najczęściej stosowaną metodą optymalizacji. Wyróżnia je sprawny algorytm obliczeń, zależności liniowe są łatwe do sformułowania oraz wiele zadań optymalizacyjnych można sprowadzić do postaci problemu programowania liniowego. Wszystkie warunki ograniczające oraz funkcja celu mają w tym przypadku postać liniową. Adekwatność modeli liniowych dla rzeczywistych problemów może nie być zadowalająca [182]. Wynika to z natury problemów, gdzie dane elementy sytuacji decyzyjnej nie mogą być modelowane za pomocą zależności liniowych np. zwiększenie liczby zadań transportowych z 20% do 40%, spowodowało zwiększenie liczby przeglądów z 10% do 30%. Natomiast dla przybliżenia sytuacji decyzyjnej, modele liniowe mogą być wystarczające.

Wykładnicza złożoność obliczeniowa algorytmów dokładnych sprawia, że czas poszukiwania rozwiązania optymalnego (często nawet dla małych instancji problemów) jest nieakceptowalny dla decydenta. To sprawiło, że metody przybliżone stały się w latach 70-tych ubiegłego wieku przedmiotem zainteresowania badaczy oraz praktyków [12]. Efektem rezygnacji z wymogu znalezienia rozwiązania optymalnego na rzecz rozwiązania bliskiemu optimum, jest zmniejszenie wielomianowej złożoności obliczeniowej algorytmów przybliżonych, co w konsekwencji oznacza znaczne skrócenie czasu obliczeń [11]. Wśród metod przybliżonych, które bazują na sztucznej inteligencji, można wyróżnić następujące grupy:

— **Algorytmy heurystyczne** (konstrukcyjne) – są dedykowane danemu problemowi optymalizacyjnemu, dostarczając jednego lub kilku rozwiązań. Podstawową ich zaletą jest krótki czas działania, natomiast jakość dostarczanych rozwiązań z reguły jest niska. Algorytmy te konstruowane są głównie w oparciu o specyficzne własności problemu, reguły priorytetowe lub uproszczenie (relaksację) problemu poprzez pominięcie zdefiniowanych ograniczeń [15]. Wśród nich będziemy analizować między innymi po-

pularny algorytm NEH. Można wyróżnić następujące przykłady heurystyk: losowa, zachłanna czy lokalnego przeszukiwania.

- **Algorytmy metaheurystyczne** – są uniwersalne i stanowią ogólną postać algorytmów heurystycznych. Metaheurystyki mogą wykorzystywać wiedzę specyficzną dla danej dziedziny w formie heurystyk, które są kontrolowane przez strategię wyższego poziomu. Algorytmy te rozpoczynają pracę od pewnego rozwiązania początkowego, które dostarcza algorytm heurystyczny lub losowy. Następnie iteracyjnie modyfikuje (poprawia) rozwiązanie [8, 9]. Celem jest efektywna eksploracja przestrzeni poszukiwań aby znaleźć rozwiązania bliskie rozwiązaniom optymalnym. To co wyróżnia algorytmy metaheurystyczne, to możliwość stosowania technik, które wykraczają poza metody stosowane w sztucznej inteligencji, wśród których znajdują się: algorytmy genetyczne (ang. *genetic algorithms*, GA), symulowane wyżarzanie (ang. *simulated annealing*, SA), algorytm optymalizacji rojem cząstek (ang. *particle swarm optimization*, PSO).

W przypadku algorytmów przybliżonych, wskazane jest dokonanie analizy jakości dostarczanych przez nie rozwiązań. Niniejsza analiza determinuje zakres stosowalności danej metody. W tym celu, do analizy efektywności algorytmu można zastosować powszechną technikę **analizy eksperymentalnej**. To podejście bada statystyczne zachowanie algorytmu dla pewnej, reprezentatywnej dużej próbki instancji problemu. Istotną zaletą tej metody jest jej prostota. Natomiast główną wadą jest to, że uzyskane wyniki mogą nie odzwierciedlać zachowania algorytmu dla innych niż wybrane instancje. Dlatego też ważne jest dobranie w staranny sposób próbki badanych instancji tak, aby pokrywały możliwie szeroki zakres.

Podsumowując, wybór metody między dokładną a przybliżoną jest przedmiotem rozważań wielu problemów optymalizacyjnych, również planowania eksploatacji taboru. Analizę problemu należy rozpocząć od określenia jego złożoności obliczeniowej poprzez wykazanie NP-trudności lub skonstruowanie optymalnego algorytmu wielomianowego. Niestety ocena złożoności obliczeniowej problemu związana z jego rozwiązaniem jest bardzo trudna do udowodnienia [7, 106].

Dlatego też wyznacza się algorytm przybliżony lub dokładny, który jest odpowiedni zarówno dla problemu NP-trudnego bądź otwartego. Metody dokładne, dostarczają rozwiązania optymalne dla małych instancji problemów. Rzeczywiste problemy optymalizacyjne, bardzo często stanowią duże instancje, dla których czas działania algorytmów dokładnych jest nieakceptowalny. Wówczas stosuje się algorytmy wielomianowe przybliżone, które w akceptowalnym czasie dla decydenta zapewniają rozwiązania na tyle dobre, że można takie algorytmy uznać za efektywne. Ostatnim etapem jest analiza jakości dostarczanych rozwiązań przez algorytmy przybliżone i wskazanie zakresu ich zastosowania.

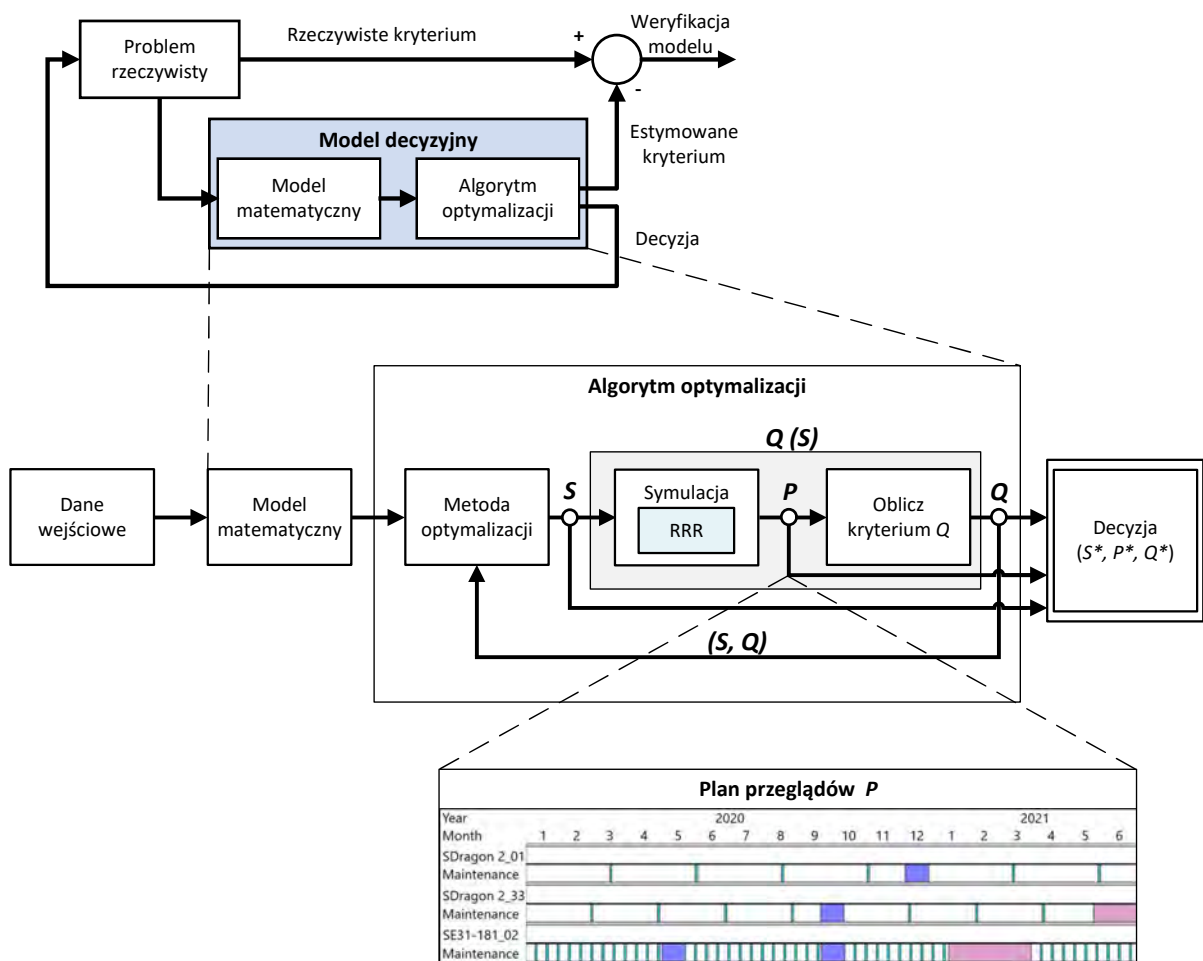
## Rozdział 3

# Modele decyzyjne dla problemów planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem przeglądów okresowych

Podstawowym rezultatem tej części rozprawy jest wprowadzenie nowych modeli decyzyjnych, dedykowanych problemowi planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych tegoż taboru. Zaproponowane przez autora modele, stanowią odpowiedź na lukę badawczą rozpatrywanej tematyki, prezentowanej w Rozdziale 2.2. Architekturę opracowanych modeli decyzyjnych, która stanowi ogólną koncepcję wzajemnych powiązań i działania zaprojektowanego modelu matematycznego wraz z metodami rozwiązań, przedstawiono w Rozdziale 3.1. Następnie formalnie zdefiniowano rozpatrywany problem planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem przeglądów i napraw okresowych w postaci modelu matematycznego (Rozdział 3.2). W Rozdziale 3.3 określono własności problemu i jego złożoność obliczeniową, aby ocenić jakie metody rozwiązania zaprojektować by były efektywne obliczeniowo. Dalej w Rozdziałach 3.4 i 3.5 zaprezentowano grupę algorytmów bazujących na metodach dokładnych i przybliżonych dla rozpatrywanego problemu. W ramach metod dokładnych (patrz Rozdział 3.4), które znajdują rozwiązanie optymalne, zaproponowano algorytm przeglądu zupełnego (ang. *brute force*, BF) oraz podziału i ograniczeń (ang. *branch and bound*, B&B). Natomiast dla metod przybliżonych (patrz Rozdział 3.5) zaprojektowano algorytmy heurystyczne (Rozdział 3.5.1) tj. Balance Heuristic – BH, Balance Mileage to Maintenance Heuristic – BM2MH, Nawaz-Enscore-Ham – NEH oraz metaheurystyczne (Rozdział 3.5.2) tj. algorytm symulowanego wyżarzania – SA, genetyczny – GA. Zaprezentowane w niniejszym rozdziale algorytmy, zostały opracowane od podstaw dla rozpatrywanej problematyki i dostosowano je do zaproponowanego modelu matematycznego (Rozdział 3.2). Należy podkreślić, że przedstawione wersje algorytmów (tj. B&B, NEH, SA, GA) nie są bezpośrednimi implementacjami opublikowanych metod, ale są nimi inspirowane. Mianowicie obejmują one modyfikacje, które są ważne z perspektywy analizowanego problemu. Niemniej jednak, podstawowe schematy tychże metod nie ulegają zmianie, przez co stanowią one referencje dla zaproponowanych algorytmów. Rezultaty prezentowane w tym rozdziale zostały częściowo opublikowane przez autora niniejszej rozprawy w następujących pracach [58, 104, 105].

### 3.1. Architektura opracowanych modeli decyzyjnych

Reprezentacja rozwiązań w postaci planów eksploatacji taboru kolejowego, będzie bazowała na nowych modelach decyzyjnych. Dlatego też, są one fundamentalne dla rozpatrywanego problemu planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem przeglądów i napraw okresowych. Ponieważ wszystkie zaproponowane modele składają się z teoretycznego odwzorowania problemu rzeczywistego w postaci modelu matematycznego wraz z metodą rozwiązania tegoż problemu decyzyjnego w formie dedykowanego algorytmu optymalizacji, poniżej sformułowano ogólną wersję architektury opracowanych modeli decyzyjnych i schemat jego budowy (patrz Rysunek 3.1).



Rysunek 3.1: Schemat architektury opracowanych modeli decyzyjnych w procesie planowania eksploatacji taboru kolejowego

Ustalenie harmonogramu przydziału taboru do zadań przewozowych, uwzględniając działania przeglądowo-naprawcze to *problem rzeczywisty* w przedsiębiorstwie kolejowym, który jest sprowadzony (zamodelowany) do postaci *modelu matematycznego*. Zbudowany model (zgodnie z zasadą Brzytwy Ockhama, mówiącej o dążeniu do prostoty) obejmuje istotne cechy i zjawiska w formie struktury matematycznej determinując sytuację de-

czyjną. Dla modelu matematycznego należy ustalić zbiór zmiennych decyzyjnych oraz matematycznych zależności występujących między nimi, zbiór ograniczeń, a także kryteria optymalizacji. Analiza problemu pozwala na dobór tychże danych, wyrażone przez aparat matematyczny, opisują (modelują) w przybliżony sposób *problem rzeczywisty* [56].

Problem decyzyjny, a dokładniej instancja problemu decyzyjnego, reprezentowana przez *dane wejściowe* jest rozwiązywana przy użyciu wybranego *algorytmu optymalizacji*. *Algorytm* to procedura działająca w skończonym czasie rozwiązująca dany problem, określająca ciąg czynności elementarnych, które należy w tym celu wykonać [119]. W odniesieniu do rozważanego problemu, w ramach algorytmu optymalizacji wyróżniliśmy *metodę optymalizacji*, *symulator* zdarzeń dyskretnych – RRR (ang. *RudRobustRailway*) oraz *obliczanie kryterium  $Q$* . *Metoda optymalizacji* to metoda wyznaczania najlepszego (optymalnego) rozwiązania z perspektywy określonego kryterium. W rozprawie zaproponowano szereg metod rozwiązania badanego problemu, które należą do metod dokładnych (patrz Rozdział 3.4) oraz przybliżonych (patrz Rozdział 3.5). Wybór określonej metody determinuje proces rozwiązania instancji problemu i jest istotą działania *algorytmu optymalizacji*.

Dla pojedynczej iteracji rezultatem eksperymentu obliczeniowego opartego o daną *metodę optymalizacji* jest rozwiązanie w postaci gotowej propozycji harmonogramu eksploatacji taboru kolejowego  $S$  (spełniający wszystkie założenia modelu matematycznego). Dalej, by porównać wartość kryteriów dla kolejnych rozwiązań, należy ustalić plan przeglądów  $P$  wynikający z danego harmonogramu  $S$ , implikujący całkowity przebieg pojazdów oraz terminy prognozowanych przeglądów i napraw okresowych (patrz Rysunek 3.1). Funkcja kryterialna  $Q(S)$  wpierw ma za zadanie zliczyć liczbę dni przeglądów analizowanego taboru na podstawie planu przeglądów  $P$ , który jest efektem danego harmonogramu eksploatacji taboru kolejowego  $S$ . Natomiast dalej wartość kryterium (*oblicz kryterium  $Q$* , czyli całkowita dostępność pojazdów w dniach) dla danego harmonogramu  $S$  jest ustalana jako różnica między iloczynem liczby lokomotyw i dni w rozważanym horyzoncie czasowym  $T$ , a liczbą dni na przeglądach i naprawach okresowych tegoż taboru.

Dokładny plan przeglądów dla pojedynczego pojazdu można uzyskać w akceptowalnym czasie przez decydenta za pomocą *symulacji*. Choć nie jest to trudne do zaimplementowania, zastosowanie symulacji opartej na czasie (ang. *time-based simulation* – TBS) charakteryzuje się złożonością obliczeniową  $O(s(T))$ , gdzie  $s(T)$  jest liczbą próbek dla horyzontu czasowego  $T$  o danej rozdzielczości (co najmniej jeden dzień). Narzuca to zbyt długie czasy działania, ze względu na dużą liczbę przeliczeń wartości kryterium dla różnych danych wejściowych w przypadku metaheurystyk (patrz [58]).

Dlatego do obliczenia wartości funkcji kryterium  $Q(S)$  zastosujemy szybką symulację zdarzeń dyskretnych (ang. *discrete-event simulation* - DES) o nazwie RRR opisaną w [105]. DES modeluje działanie systemu, jako sekwencję zdarzeń w czasie i zakłada, że pomiędzy kolejnymi zdarzeniami nie nastąpi żadna zmiana w systemie. W związku z tym, czas symulacji może zostać skrócony poprzez bezpośrednie przeskoczenie do

czasu wystąpienia następnego zdarzenia, tj. przeglądu czy naprawy okresowej pojazdu. RRR to pakiet symulacyjny stosowany w rozwiązaniach przemysłowych, który ma za zadanie przyspieszyć czas generowania wyników, jednocześnie nie wpływając na ich jakość. Przeznaczenie pakietu RRR w proponowanych modelach decyzyjnych można porównać do zastosowania optymalizatora Gurobi dla modelu MILP [95], czy też pakiet oprogramowania EPANET dedykowany modelowaniu systemów dystrybucji wody [2]. Symulator RRR działa w następujący sposób. Wyznacza (prognozuje) plan przeglądów, z dokładnością do jednej godziny z uwzględnieniem przestojów, na podstawie danych wejściowych: polityki utrzymania, średniego przebiegu na dzień w każdym miesiącu oraz całkowitego przebiegu każdego pojazdu na początku symulacji. Jego złożoność obliczeniowa zależy liniowo od liczby przeglądów (które będą miały miejsce)  $M \ll s(T)$  oraz ich maksymalnych poziomów  $K$ , czyli  $O(MK)$ . Chociaż wartość  $M$  jest znana *a posteriori* i zależy od danych wejściowych (polityka utrzymania, średni dzienny przebieg, całkowity przebieg pojazdów, przestoje spowodowane przeglądami), to czasy działania algorytmu dla rzeczywistych, znacznych rozmiarów problemu są bardzo krótkie. Warto zaznaczyć, że RRR nie jest algorytmem optymalizacyjnym, lecz oblicza terminy przeglądów dla zadanego obciążenia po przeprowadzeniu symulacji zdarzeń dyskretnych. Dostarcza więc takich samych wyników jak symulacja oparta na czasie (TBS), ale jest znacznie szybsza. Mianowicie, jest w stanie zasymulować (przewidywać) dokładny i kompletny plan przeglądów dla 17 lat i zestawu 100 pojazdów w ciągu milisekund, co jest ponad 400 razy szybsze niż w przypadku TBS. Tym samym otwiera to perspektywy dla konstrukcji czasowo efektywnych heurystyk i metaheurystyk, które mogą weryfikować tysiące rozwiązań w akceptowalnym czasie przez decydenta [104, 105], tak jak jest to zastosowane w niniejszej rozprawie.

W kolejnych iteracjach, na podstawie wartości kryterium  $Q$  oceniane są następne harmonogramy  $S$ . Wybierane jest rozwiązanie, które maksymalizuje wartość kryterium  $Q$ . Jeżeli wartość  $Q$  danego harmonogramu  $S$  jest mniejsza niż dotychczas najlepsza znaleziona  $Q^*$ , to generowany jest nowy harmonogram eksploatacji  $S$  zgodnie z przyjętą *metodą optymalizacji*. Natomiast w przypadku, gdy wartość kryterium  $Q$  harmonogramu  $S$  jest najwyższa spośród dopuszczalnych rozwiązań, stanowi jednocześnie rozwiązanie dla analizowanej instancji problemu decyzyjnego. Wybrany harmonogram eksploatacji taboru  $S$  i wynikający z niego plan przeglądów  $P$ , o kryterium  $Q$  jest gotową propozycją decyzji dla rozpatrywanego problemu decyzyjnego planowania eksploatacji taboru kolejowego, gdzie dla analizowanych *danych wejściowych* dostępność taboru jest najwyższa spośród rozpatrywanych harmonogramów  $S$ .

Otrzymany plan stanowi wariant rozwiązania problemu rzeczywistego, który jest rozwiązaniem możliwie najlepszym z perspektywy badanego kryterium  $Q$ , tj. maksymalnej dostępności taboru. Opracowane modele decyzyjne zostały sprawdzone w oparciu o analizy teoretyczne dla wybranych scenariuszy (patrz Rozdział 4). Natomiast realna weryfikacja opracowanych modeli decyzyjnych może być przeprowadzona jedynie w warunkach

rzeczywistych. Na podstawie otrzymanych rozwiązań, decydent może podjąć realną decyzję dotyczącą wyboru harmonogramu eksploatacji taboru, która zostanie zweryfikowana w praktyce gospodarczej. W takim przypadku weryfikacja zaproponowanych modeli, polegałaby na różnicy między wartością *estymowanego kryterium* (obliczonym w wyniku eksperymentów obliczeniowych –  $Q$ ) a wartością *rzeczywistego kryterium* (będącym efektem wdrożonego harmonogramu w przedsiębiorstwie, obliczonym po jego zakończeniu). Im mniejsza wartość błędu, tym model lepiej odwzorowuje rzeczywistość i jest bardziej użyteczny. Rysunek 3.1 prezentuje umiejscowienie *modelu decyzyjnego* w procesie podejmowania decyzji dotyczącej planowania taboru kolejowego.

### 3.2. Sformułowanie problemu i model matematyczny

Dla problemu planowania eksploatacji taboru kolejowego przy uwzględnieniu wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych został opracowany model matematyczny. W tymże ujęciu model jest układem (reprezentujący obiekt, proces bądź system), który odtwarza wybrany fragment rzeczywistości w takim stopniu, że może zastąpić tenże układ (więcej o definicji modelu w części Wstęp). Dlatego też, proponowany model uwzględnia szereg rzeczywistych przesłanek istotnych z perspektywy układania harmonogramów eksploatacji taboru. To co wyróżnia niniejszy model od dotychczasowych w literaturze przedmiotu, to przede wszystkim respektowanie wielopoziomowej konserwacji taboru różnego typu, przeglądy i naprawy okresowe bazujące zarówno na resursie czasowym i kilometrowym oraz możliwość wygenerowania długoterminowych planów eksploatacji floty. Na bazie opracowanego modelu będą działały zarówno algorytmy dokładne tj. przegląd zupełny, metoda podziału i ograniczeń (Rozdział 3.4.1, 3.4.2) oraz algorytmy przybliżone (Rozdział 3.5). W niniejszej części przedstawiono sformułowanie problemu oraz formalny model rozpatrywanego problemu. Postać ogólna modelu matematycznego dla problemu planowania eksploatacji taboru kolejowego jest następująca.

Dany jest zbiór  $n$  pojazdów kolejowych (np. pociągów, lokomotyw, elektrycznych zespołów trakcyjnych)  $V = \{V_1, \dots, V_n\}$ . Ze względu na aspekty praktyczne i bezpieczeństwa muszą być one poddawane przeglądom i naprawom okresowym (tzw. konserwacjom), które są podzielone na  $K$  poziomów złożoności. Każdy poziom konserwacji wymaga innego zaangażowania pracy w zakresie przeglądów i napraw okresowych [142]. Koszty i czas trwania przeglądu rosną wraz ze wzrostem poziomu konserwacji danego pojazdu kolejowego. Warto zauważyć, że przeglądy wyższego poziomu obejmują wszystkie czynności niższego poziomu. Zatem, kiedy przegląd wysokiego poziomu jest wykonany, to wszystkie niższe poziomy są również zrealizowane [75, 76]. Wskazane działania dla każdego poziomu są przeprowadzane w sposób okresowy, który determinuje cykl przeglądowo-naprawczy danego pojazdu. W ramach cyklu, każdy poziom konserwacji ma ustaloną politykę utrzymania opartą na czasie (ang. *time-based maintenance* – TBM) i przebiegu kilometrowym

(ang. *distance-based maintenance* – DBM). Wykonanie przeglądu pojazdu na danym poziomie jest obligatoryjne, gdy czas lub łączny przebieg (od ostatniego przeglądu na danym poziomie) osiągnie ustalony próg resursu czasowego (TBM) lub kilometrowego (DBM), w zależności od tego, co nastąpi wcześniej. Przykład cyklu przeglądowo-naprawczego prezentują Tabele 4.1, 4.2 i 4.3 prezentowane w Rozdziale 4.1.

W praktyce gospodarczej pojazdy tego samego typu mają zazwyczaj taką samą politykę utrzymania, która oznacza jednakową liczbę poziomów przeglądów oraz cykli TBM i DBM. Dlatego też zdefiniujemy zbiór  $F = \{1, \dots, b\}$  rodzin (typów) pojazdów ze zbioru  $V$ , gdzie każdy  $V_v \in V$  należy tylko do jednej rodziny i oznaczamy to przez  $V_v \in f$ . Zatem każda rodzina  $f \in \{1, \dots, b\}$  zawiera zestaw  $n_f$  pojazdów, gdzie  $n = \sum_{f=1}^b n_f$ . Na tej podstawie, niech  $TBM_k^f$  i  $DBM_k^f$  oznaczają wcześniej ustalone wartości progowe poziomu  $k$  dla cyklu przeglądowo-naprawczego opartego na resursie czasowym (TBM) i resursie kilometrowym (DBM), odpowiednio dla rodziny  $f$ . Ponadto oczekiwany czas trwania czynności konserwacyjnych oznaczony jest jako  $MA_k^f$ . Z reguły dla kolejnych, wyższych poziomów przeglądów zarówno wartości cykli oraz czas ich wykonania są większe, tj.  $TBM_k^f < TBM_{k+1}^f$ ,  $DBM_k^f < DBM_{k+1}^f$  oraz  $MA_k^f < MA_{k+1}^f$  dla  $k = 1, \dots, K-1$ .

Wprowadzono do modelu aktualny całkowity czas i łączny przebieg od ostatniej obsługi technicznej na poziomie  $k$  dla pojazdu  $V_v \in V$  (dla wygody ustalone również jako  $v$ ), które oznaczono jako  $VT_{v,k}$  i  $VM_{v,k}$ . Po wykonaniu przeglądu na poziomie  $k$  dla pojazdu  $v$ , powiązane wartości są ustawiane na zero, tj.  $VT_{v,i} = 0$  i  $VM_{v,i} = 0$  dla  $i = 1, \dots, k$ . Formalnie pojazd  $v$  musi zostać poddany przeglądom okresowym na poziomie  $k$ , kiedy przynajmniej jedna z nierówności nie jest spełniona:  $VT_{v,k} \leq TBM_k^f$  (przeгляд zainicjowany przez resurs czasowy) lub  $VM_{v,k} \leq DBM_k^f$  (przeгляд zainicjowany przez resurs kilometrowy). W ten sposób datę wykonania przeglądu poziomu  $k$  określa wcześniejsza data wynikająca z  $TBM_k^f$  lub  $DBM_k^f$ . Tym samym maksymalny odstęp między przeglądami jest zawsze ograniczony przez  $TBM_k^f$ , który może ulec skróceniu przez skumulowany przebieg (eksploatację), co jest ekonomicznie nieefektywne.

Zdefiniowano zbiór  $J = \{J_1, \dots, J_n\}$  cyklicznych zadań, które mają być realizowane przez pojazdy kolejowe, a także muszą być wykonane w sposób ciągły w następujących po sobie okresach  $t \in \{1, \dots, T\}$ . W praktyce gospodarczej okres  $t$  często odnosi się do miesiąca, co wynika z raportowania przebiegu taboru, umów lub możliwości zmiany pojazdów (np. lokomotyw) między zadaniami (usługami przewozowymi). W modelu każde zadanie  $J_j \in J$  (dla wygody oznaczone również jako  $j$ ) opisuje zestaw cyklicznych zadań przewozowych (np. transport ropy naftowej, usługi transportu pasażerskiego) charakteryzujących się średnim przebiegiem (obciążeniem)  $w_j$ . Ze względu na różne odstępy między poszczególnymi okresami i ewentualne zmiany w przypisaniu zadań do pojazdów, dla uproszczenia przebieg  $w_j$  podawany jest jako średnia wartość dzienna obliczona na podstawie obciążenia w dłuższym horyzoncie czasowym. Z uwagi na pragmatyczne podejście, zadanie (zbiór usług transportowych) jest wykonywane przez jeden i ten sam pojazd kole-



jowy w ciągu miesiąca, z drugiej strony pojazd może realizować tylko jedno zadanie w tym samym czasie. Niemniej jednak potencjalne zmiany w przydziale zadań do pojazdów są możliwe na początku każdego miesiąca. Ponadto zakłada się, że jeżeli pojazd znajduje się w warsztacie z powodu czynności konserwacyjnych, wówczas powiązane zadanie jest obsługiwane przez stronę trzecią (np. korzystając z outsourcingu).

Rozważanym kryterium jest całkowita dostępność  $Q^1$  pojazdów (wyrażona w dniach) dla danego horyzontu czasowego  $T$  miesięcy, która zależy od całkowitego czasu trwania czynności konserwacyjnych analizowanych pojazdów kolejowych. Zatem pożądanym jest maksymalizowanie dostępności taboru poprzez minimalizowanie czasu przeznaczanego na jego przeglądy i naprawy okresowe. Możliwości optymalizacji są ograniczone, gdy wykonanie przeglądu pojazdu wynika z rezerwu czasowego (TBM). Zatem w sytuacji, kiedy średnie wartości przebiegów  $w_j$  dla zadań są relatywnie niskie, wtedy też cykl przeglądowo-naprawczy jest oparty o rezerwu czasowy kolejnych poziomów przeglądów, to wówczas nie można wykonać optymalizacji. Ponieważ niezależnie od harmonogramu przypisania zadań do pojazdów, termin wykonania przeglądu będzie determinowany rezerwem czasowym. Niemniej jednak, w praktyce zadania wiążą się z wysokimi wartościami średniego przebiegu (obciążenia), przez co przeglądy i naprawy okresowe są często determinowane przez rezerwu kilometrowy (DBM). Tym samym wartość kryterium może być kontrolowana w pewnym zakresie przez odpowiednie przypisanie zadań do pojazdów w poszczególnych miesiącach horyzontu optymalizacji z uwzględnieniem ich obciążenia (pojazdów), polityki utrzymania ( $TBM_k^f$ ,  $DBM_k^f$ ), jak również parametrów pojazdów ( $VT_{v,k}$  i  $VM_{v,k}$ ), tak aby zmaksymalizować wartość funkcji celu  $Q$ . Innymi słowy, rozpatrywany jest problem harmonogramowania zadań przy kryterium maksymalizacji dostępności pojazdów kolejowych z uwzględnieniem przeglądów i napraw okresowych.

Następnie zdefiniowano harmonogram  $S = \langle S_1, \dots, S_t, \dots, S_T \rangle$  przydziału zadań do pojazdów w poszczególnych miesiącach  $t = 1, \dots, T$  taki, że  $S_t = \langle S_t(1), \dots, S_t(j), \dots, S_t(n) \rangle = \langle J_{[1]}, \dots, J_{[v]}, \dots, J_{[n]} \rangle$  oznacza harmonogram dla miesiąca  $t$ , gdzie  $S_t(v) = J_{[v]} \in J$  jest zadaniem przypisanym do pojazdu  $V_v$  w danym miesiącu  $t$  oraz  $S_t(i) = J_{[i]} \neq S_t(j) = J_{[j]}$  dla wszystkich  $i, j = 1, \dots, n$ . Czyli zadanie na pozycji  $v$  w sekwencji  $S_t$  jest przypisane do pojazdu  $v$  oraz każde zadanie występuje tylko raz w rozważanej sekwencji  $S_t$ . Harmonogram  $S$  określa przypisanie zadań (które stanowią obciążenie średnimi przebiegami dziennymi  $w_j$ ) do pojazdów w kolejnych  $T$  miesiącach, co odnosi się do skumulowanego przebiegu pojazdów oraz implikuje prognozowane daty ich przeglądów i napraw okresowych w ramach ich polityki utrzymania w planie przeglądów  $P$ . Na podstawie danego planu przeglądów  $P$ , który wynika z harmonogramu eksploatacji  $S$ , ustalamy całkowity czas przeznaczony na czynności konserwacyjne dla wszystkich pojazdów

<sup>1</sup> Dostępność, inaczej dyspozycyjność, gotowość (*ang. availability*) - rozpatrywana jako całkowity czas, dla którego pojazd kolejowy będzie gotowy do natychmiastowej realizacji zadań przewozowych we wskazanym terminie, przy założeniu, że okoliczności zewnętrzne to umożliwiają.

$V$  w analizowanym horyzoncie czasowym  $T$  oznaczony jako  $MA(S, T) = \sum_{v=1}^n MA_v(S, T)$ , gdzie  $MA_v(S, T)$  to całkowity czas czynności konserwacyjnych pojazdu  $v$  dla powiązanych  $S$  i  $T$ . Na tej podstawie wartość kryterium, czyli całkowita dostępność (w dniach) pojazdów, można wyrazić jako:

$$Q(S, T) \equiv Q(S) = n \cdot d(T) - MA(S, T), \quad (3.1)$$

gdzie  $d(T)$  jest liczbą dni w rozważanym horyzoncie czasowym  $T$ . Dla wygody powyższą notację będziemy zapisywać w postaci uproszczonej jako  $Q(S, T) \equiv Q(S)$  dla ustalonego horyzontu czasowego  $T$ .

Zatem celem jest znalezienie harmonogramu  $S^*$ , który maksymalizuje wartość kryterium  $Q(S^*)$ , tzn.  $S^* = \operatorname{argmax}_{S \in \mathbb{S}} \{Q(S)\}$ , gdzie  $\mathbb{S}$  jest zbiorem wszystkich możliwych harmonogramów. Dla wygody i dla zachowania przejrzystości opisu, rozważany problem będzie oznaczany jako RMAO (ang. *Railway Maintenance Activity Optimization*).

Najważniejsze symbole dla zdefiniowanego modelu matematycznego zostały zawarte w Tabeli 3.1

### Przykład dla problemu RMAO

Dane są  $n = 3$  lokomotywy tego samego typu, gdzie  $DBM_k^f = 32000$  km i  $TBM_k^f = 3$  miesiące (dla danego poziomu  $k$ ) oraz  $MA_k^f = 14$  dni. Należy wykonać w każdym miesiącu 3 zadania cykliczne o następujących wartościach średniego dziennego przebiegu:  $w_1 = 200$  km,  $w_2 = 330$  km,  $w_3 = 660$  km, które odnoszą się do następujących przybliżonych wartości średniego przebiegu na miesiąc: 6000 km (niski), 10000 km (średni) i 14000 km (wysoki). Okres optymalizacji wynosi  $T = 6$  miesięcy począwszy od marca, a wszystkie pojazdy są tuż po przeglądach, tzn.  $VT_i = 0$  i  $VM_i = 0$  dla  $i = 1, \dots, n$ .

Rozważmy harmonogram, w którym każdy pojazd  $V_i$  wykonuje to samo zadanie  $J_i$  ( $i = 1, \dots, 3$ ) we wszystkich okresach, tj.  $S = \langle S_1, \dots, S_6 \rangle$ , gdzie  $S_1 = \dots, S_6 = \langle J_1, J_2, J_3 \rangle$ . Skumulowany przebieg i planowane przeglądy okresowe  $MA_k^f$  dla każdego pojazdu zgodnie z harmonogramem  $S$  przedstawiono na Rysunku 3.2.

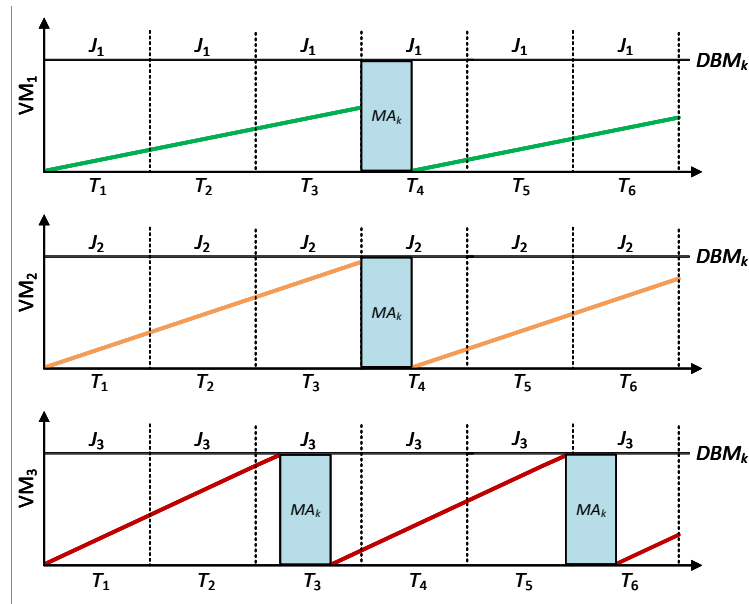
Można zauważyć, że przeglądy i naprawy okresowe dla  $V_1$  i  $V_2$  są inicjowane przez czas ( $TBM_k^f = 3$  miesiące) w miesiącu  $t = 4$ , natomiast dla  $V_3$  przez skumulowany przebieg ( $DBM_k^f = 32000$  km) w miesiącach  $t = 3$  i  $t = 6$ . Zatem całkowita dostępność pojazdów wynosi  $Q(S) = n \cdot d(T) - 4 \cdot MA_k^f = 3 \cdot 184 - 4 \cdot 14 = 496$  dni.

Przeanalizujmy teraz zoptymalizowany harmonogram  $S^* = \langle S_1^*, \dots, S_6^* \rangle$ , gdzie  $S_1^* = \langle J_1, J_2, J_3 \rangle$ ,  $S_2^* = \langle J_2, J_3, J_1 \rangle$ ,  $S_3^* = \langle J_3, J_1, J_2 \rangle$ ,  $S_4^* = \langle J_1, J_2, J_3 \rangle$ ,  $S_5^* = \langle J_2, J_3, J_1 \rangle$ ,  $S_6^* = \langle J_3, J_1, J_2 \rangle$ . Dla lepszego zrozumienia można to przedstawić z perspektywy pojazdów dla kolejnych miesięcy w następujący sposób:

- $V_1 : \langle J_1, J_2, J_3, J_1, J_2, J_3 \rangle$ ,
- $V_2 : \langle J_2, J_3, J_1, J_2, J_3, J_1 \rangle$ ,
- $V_3 : \langle J_3, J_1, J_2, J_3, J_1, J_2 \rangle$ .

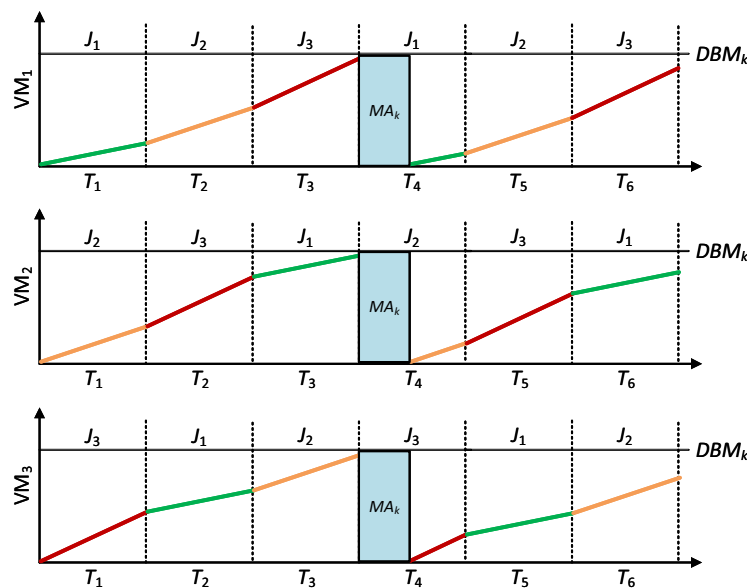
Tabela 3.1: Indeksy, dane wejściowe, kryterium i ograniczenia dla modelu problemu RMAO

Symbol	Opis
Indeksy	
$V_v$	indeks pojazdu $V_v \equiv v \in V$ , dla wygody określany również jako $v$
$f$	indeks rodziny pojazdu $f \in F$ (tego samego typu), określany również jako $f$
$k$	indeks poziomego przeglądu dla rodziny $f$ , $k \in \{1, \dots, K\}$
$J_j$	indeks zadania przewozowego, określany również jako $j$ , $J_j \equiv j \in J$
$t$	indeks przedziału czasowego dla rozpatrywanego horyzontu planowania np. miesiąc, kwartał
Dane wejściowe	
$n$	maksymalna liczba pojazdów, równoważne z maksymalną liczbą zadań przewozowych
$V$	zbiór $n$ pojazdów kolejowych: $V = \{V_1, \dots, V_n\}$
$b$	maksymalna liczba rodzin (typów pojazdów)
$F$	zbiór $b$ rodzin pojazdów $F = \{f = 1, \dots, b\}$
$K_f$	maksymalna liczba poziomów przeglądów dla rodziny $f$
$TBM_k^f$	resurs czasowy cyklu utrzymania dla danej rodziny pojazdów $f \in F$ i poziomu przeglądu $k \in \{1, \dots, K_f\}$
$DBM_k^f$	resurs kilometrowy cyklu utrzymania dla danej rodziny pojazdów $f \in F$ i poziomu przeglądu $k \in \{1, \dots, K_f\}$
$MA_k^f$	czas wykonywania przeglądu dla danego poziomu $k \in K$ i rodziny pojazdów $f \in F$
$VT_{v,k}$	całkowity czas od ostatniej obsługi technicznej dla pojazdu $v \in V$ na poziomie przeglądu $k \in K$
$VM_{v,k}$	łączny przebieg od ostatniej obsługi technicznej dla pojazdu $v \in V$ na poziomie przeglądu $k \in K$
$J$	zbiór $n$ cyklicznych zadań przewozowych $J = \{J_1, \dots, J_n\}$
$w_j$	średni przebieg dzienny zadania $J_j$
$T$	maksymalny rozpatrywany horyzont planowania dla harmonogramu $S$
Kryterium	
$Q$	całkowita dostępność pojazdów $v \in V$ dla harmonogramu $S$
Ograniczenia	
1.	Zadanie $j$ jest wykonywane w okresie $T$ przez ten sam pojazd $v$ .
2.	Pojazd $v$ w danym okresie $T$ wykonuje tylko jedno zadanie $j$ .
3.	Pojazd $v$ z rodziny $f$ musi być poddany przeglądowi na poziomie $k$ , kiedy przynajmniej jedna z nierówności nie jest spełniona: $VT_{v,k} \leq TBM_k^f$ (przeгляд determinowany przez resurs czasowy) lub $VM_{v,k} \leq DBM_k^f$ (przeгляд determinowany przez resurs kilometrowy).



Rysunek 3.2: Przykład stałego harmonogramu zadań dla pojazdów  $V_1$ ,  $V_2$  i  $V_3$  (od góry do dołu) oraz wynikający z niego skumulowane przebiegi i czynności konserwacyjne

Skumulowany przebieg i planowane przeglądy okresowe  $MA_k^f$  dla każdego pojazdu zgodnie z harmonogramem  $S^*$  przedstawiono na Rysunku 3.3.



Rysunek 3.3: Przykład zoptymalizowanego harmonogramu zadań dla pojazdów  $V_1$ ,  $V_2$  and  $V_3$  (od góry do dołu) oraz wynikający z niego skumulowane przebiegi i czynności konserwacyjne

W przypadku zoptymalizowanego harmonogramu, przeglądy i naprawy okresowe dla wszystkich pojazdów tj.  $V_1$ ,  $V_2$  i  $V_3$ , są inicjowane przez czas ( $TBM_k^f = 3$  miesiące) w miesiącu  $t = 4$ . Łączny przebieg każdego z pojazdów to  $VM_{v,k} = 30000$  km w miesiącu  $t = 4$ . Przepisanie zadań o różnych przebiegach do pojazdu w kolejnych miesiącach sprawiło,

że skumulowany przebieg stanowi maksymalny (dopuszczalny) odstęp czasowy pomiędzy przeglądami;  $DBM_k^f > VM_{v,k}$ . Dlatego też, przeglądy rozpoczynają się w oparciu o re-surs czasowy pojazdu  $TBM_k^f$ . Niniejszy harmonogram odnosi się do optymalnej wartości kryterium  $Q(S^*) = n \cdot d(T) - 3 \cdot MA_k^f = 3 \cdot 184 - 3 \cdot 14 = 510$  dni.

### 3.3. Własności i złożoność obliczeniowa problemu

Zgodnie z zasadami obowiązującymi w badaniach operacyjnych, rozwiązanie danego problemu optymalizacji polega na jego precyzyjnym sformułowaniu, następnie należy określić jego złożoność obliczeniową i skonstruować dedykowane algorytmy rozwiązania [46]. Analiza złożoności obliczeniowej rozpatrywanego problemu pozwoli ocenić jakiej kategorii algorytmy skonstruować, by czas ich działania i jakość dostarczanych rozwiązań dla praktycznych rozmiarów instancji była akceptowalna przez decydenta. Wtedy też można takie metody uznać za efektywne obliczeniowo. Przykładowo dla problemów wielomianowo rozwiązywalnych, odpowiednim będzie optymalny algorytm wielomianowy. Natomiast dla problemów NP-trudnych właściwymi metodami mogą być algorytmy pseudowielomianowe bądź przybliżone.

W toku prowadzonych badań, próby znalezienia algorytmu wielomianowego dokładnego (w tym przegląd zupełny, metoda podziału i ograniczeń - B&B) dla praktycznych rozmiarów instancji problemu RMAO nie powiodły się, ze względu na nieakceptowalne długie czasy działania (patrz Rozdział 4). Brak możliwości znalezienia rozwiązania (harmonogramu, czyli przypisania zadań do pojazdów w kolejnych miesiącach) optymalnego w czasie wielomianowym jest spowodowane dużą przestrzenią możliwych rozwiązań zależnych od liczby lokomotyw  $v$  i zadań  $j$  oraz horyzontu planowania  $T$ .

Jednakże, aby jednoznacznie wykluczyć brak możliwości konstrukcji algorytmów dokładnych wielomianowych dla analizowanego problemu (zgodnie z istniejącym stanem wiedzy w obszarze badań operacyjnych), a tym samym wykazać słuszność stosowania metod przybliżonych (tj. rezygnację z czasochłonnego i w praktyce wieloletniego poszukiwania rozwiązania optymalnego na rzecz rozwiązań suboptymalnych bądź satysfakcjonujących dla praktyki) konieczne jest udowodnienie, że rozpatrywany problem optymalizacyjny należy do klasy problemów NP-trudnych. Zatem w dalszej części pracy zostanie określona złożoność obliczeniowa problemu RMAO.

Silną NP-trudność udowodniono na podstawie pseudowielomianowej transformacji z problemu Ograniczonego Numerycznego Trójwymiarowego Dopasowania (ang. *Restricted Numerical 3-Dimensional Matching* - RN3DM) [187] do decyzyjnej wersji problemu RMAO. Problem RN3DM jest szczególnym przypadkiem problemu Numerycznego Dopasowywania Trójwymiarowego (ang. *Numerical 3-Dimensional Matching* - N3DM) [46], przy czym oba są silnie NP-zupełne (ang. *strongly NP-complete*). Definicja problemu RN3DM jest następująca [187]: *Dany jest wielozbiór liczb całkowitych*  $U = \{u_1, \dots, u_m\}$

i liczba całkowita  $B$  takie, że  $\sum_{j=1}^m u_j + m(m+1) = mB$ . Czy istnieją dwie permutacje  $\alpha$  i  $\beta$  takie że  $u_j + \alpha(j) + \beta(j) = B$  dla  $j = 1, \dots, m$ ?

**Twierdzenie 1.** *Problem RMAO jest silnie NP-trudny nawet dla jednej rodziny pojazdów o różnych skumulowanych przebiegach.*

*Dowód.* Na wstępie należy zauważyć, że rozważany problem RMAO jest równoważny problemowi minimalizacji łącznego czasu przeznaczanego na czynności konserwacyjne (TMA), czyli optymalne harmonogramy są takie same,  $\operatorname{argmax}_{S \in \mathcal{S}} \{Q(S, T)\} = \operatorname{argmax}_{S \in \mathcal{S}} \{MA(S, T)\}$ , a wartości kryterium różnią się tylko o stałą  $n \cdot d(T)$ . Zatem, w tym dowodzie zastosujemy wersję decyzyjną problemu minimalizacji całkowitego czasu przeznaczanego na przeglądy i naprawy okresowe (DTMA), która jest zdefiniowana jako:

*Czy istnieje przydział zadań, harmonogramu  $S = \langle S_1, \dots, S_T \rangle$ , do pojazdów dla każdego  $t \in \{1, \dots, T\}$  tak, aby łączny czas na przeglądach  $MA(S, T)$  w danym okresie  $T$  nie był większy niż  $y = 0$ , tzn. nie są rozpoczynane żadne działania przeglądowo-naprawcze. Transformacja pseudowielomianowa z RN3DM do DTMA jest skonstruowana w następujący sposób:*

$$\begin{aligned} n &= m; \\ T &= 2; \\ K &= 1; \\ TBM_k &= TBM > T; && \text{dla } k = 1, \dots, K; \\ DBM_k &= DBM = H + D(2E + AB); && \text{dla } k = 1, \dots, K; \\ VM_{j,k} &= VM_j = H + AD \cdot u_j; && \text{dla } j = 1, \dots, m; \\ VT_{j,k} &= VT_j < TBM - T && \text{dla } j = 1, \dots, m; \\ w_j &= E + A \cdot j; && \text{dla } j = 1, \dots, m; \end{aligned}$$

gdzie  $A > 0$ ,  $E > 0$  i  $H > 0$  są pomocniczymi, dowolnymi, wymiernymi stałymi,  $D$  jest wspólną liczbą dni dla każdego okresu  $t = 1, \dots, T$ . Jeśli przedział czasowy to miesiąc, wówczas  $D = 31$  i odnosi się do dwóch kolejnych miesięcy o tej samej liczbie dni, tj. lipca i sierpnia lub grudnia i stycznia;  $VT_j$  i  $VM_j$  to czas i skumulowany przebieg od ostatniego przeglądu pojazdu  $j$  na początku  $t = 1$ , zaś wszystkie pojazdy są tego samego typu, tzn. należą do jednej rodziny  $b = 1$ . Ponadto dla wygody użyjemy  $w'_j = D \cdot w_j$ , które odnosi się do łącznego przebiegu dla zadania  $j$  w każdym przedziale czasowym (miesiącu). Zauważmy, że wartości wszystkich stałych są ograniczone wielomianem zależnym od  $m$  i  $B$ . Będzie to istotne przy wykazaniu, iż powyższa transformacja jest pseudowielomianowa, która to własność jest niezbędna dla wykazania silnej NP-zupełności DTMA, czyli silnej NP-trudności RMAO.

Zanim przejdziemy do właściwej części dowodu, to wyjaśnijmy przeznaczenie wprowadzenia parametrów  $A$ ,  $E$  i  $H$ , które są stosowane do odzwierciedlenia zakresów rzeczywistych wartości dla  $w_j$  i  $DBM$ . Mianowicie, w praktycznych przypadkach europejskie

go transportu kolejowego (szczególnie towarowego), zwykle mamy  $w_j \in \{300, \dots, 1000\}$  (km/dzień). Zauważmy, że z matematycznego punktu widzenia niniejszy dowód jest poprawny również wtedy, gdy  $E = H = 0$  i  $A = 1$ . Oznacza to jednak, że wartości  $w_j$  lub  $DBM$  mogą nie odzwierciedlać rzeczywistych przypadków. Przeanalizujmy następujący przykład dla  $E = H = 0$  oraz  $A = 1$ , gdzie  $n = 100$ . Zatem dla rozważanej transformacji uzyskujemy bardzo małe, a jednocześnie sztuczne wartości  $w_j \in \{1, \dots, 100\}$  (km/dzień). Z drugiej strony, jeśli przyjmiemy, że jednostką dla  $w_j$  jest 100 km/dzień, to dla  $w_1 = 1$  mamy 100 km/dzień, ale  $w_{100} = 100$  jest interpretowane jako 10000 km/dzień, co jest ogromnie dużą wartością, niemożliwą do osiągnięcia w rzeczywistych warunkach. Dlatego ograniczenia takie można wyeliminować w następujący sposób, np. jeśli  $n = 100$ , to możemy przyjąć  $E = 300$  i  $A = 7$ , a tym samym  $w_j \in \{307, 314, \dots, 1000\}$ , co odzwierciedla praktyczne przypadki, podczas gdy próg  $DBM$  można łatwo ustawić w odpowiednim zakresie rzeczywistym przez  $H$ . Takie podejście (odzwierciedlające instancje praktyczne) prezentowane jest w dalszej części dowodu.

Zdefiniujmy teraz harmonogram  $S = \langle S_1, S_2 \rangle$  (gdzie  $T = 2$ ) dla DTMA, który jest skonstruowany na podstawie RN3DM w następujący sposób:  $S_1 = \alpha$  i  $S_2 = \beta$ , gdzie  $S_1(j) = \alpha(j)$  i  $S_2(j) = \beta(j)$  dla  $j = 1, \dots, m$ . Przypomnijmy, że  $S_t(j)$  jest indeksem zadania przypisanego do pojazdu  $j$  w okresie (miesiącu)  $t$  w harmonogramie  $S$ . Zatem  $w'_{S_t(j)} = D \cdot w_{S_t(j)} = D(E + A \cdot S_t(j))$ , tym samym  $w'_{S_1(j)} = D(E + A \cdot S_1(j)) = D(E + A\alpha(j))$  oraz  $w'_{S_2(j)} = D(E + A \cdot S_2(j)) = D(E + A\beta(j))$ .

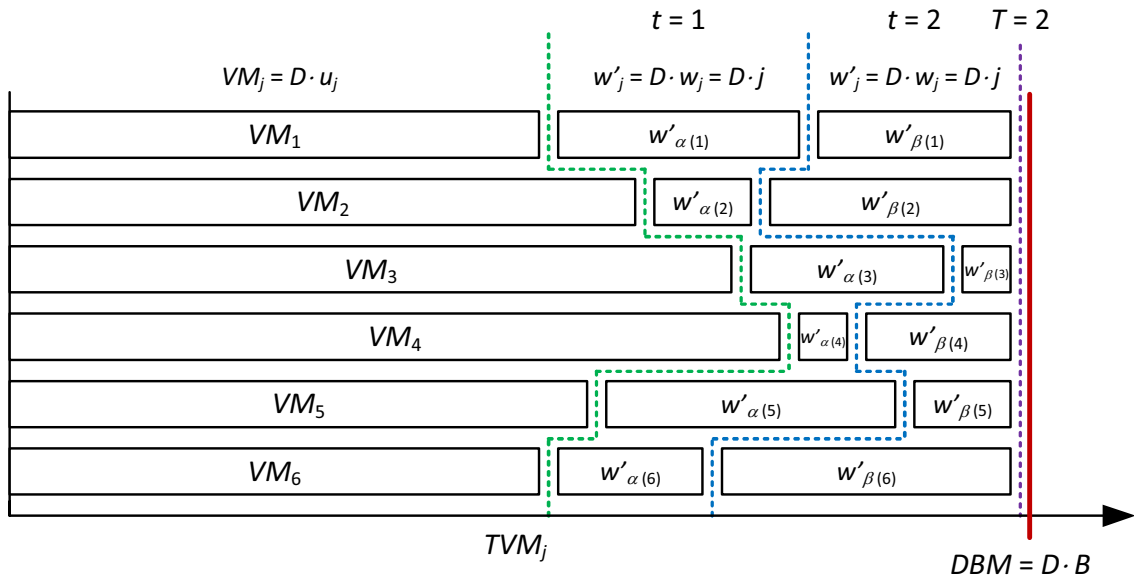
Zauważmy, że transformacja skonstruowana dla tego dowodu jest pseudowielomianowa wówczas, gdy czas potrzebny na obliczenia wszystkich parametrów i maksymalnej wartości można ograniczyć wielomianem zależnym od rozmiaru i maksymalnej wartości instancji [46]. W powyższej transformacji wszystkie parametry można obliczyć w czasie ograniczonym wielomianem zależnym od  $m$  (tj.  $O(m)$ ), natomiast wartość maksymalna  $DBM$  może być ograniczona wielomianem zależnym od  $B$  oraz  $m$  (tj.  $O(B)$ ). Dlatego też transformacja z RN3DM do DTMA jest pseudowielomianowa, co jest wymagane w tymże dowodzie.

Zdefiniujmy teraz całkowity skumulowany przebieg pojazdu  $j$  na koniec okresu  $T$ , który jest równy  $TVM_j(S, T) = VM_j + M_j(S, T)$ , gdzie  $M_j(S, T) = \sum_{t=1}^T w_{S_t(j)}$  to całkowity przebieg pojazdu  $j$  obliczony dla harmonogramu  $S$  na koniec okresu  $T$ . Zauważmy, że jeśli  $TVM_j(S, T) = VM_j + M_j(S, T) \leq DBM$ , to dla pojazdu  $j$  i  $MA_j(S, T) = 0$  nie są wykonywane żadne czynności przeglądowo-naprawcze, w przeciwnym razie  $MA_j(S, T) > 0$ .

Na podstawie skonstruowanych instancji DTMA, potencjalne czynności konserwacyjne w horyzoncie czasowym  $T$  nie mogą być inicjowane przez politykę utrzymania opartą na czasie (TBM), ponieważ  $VT_j + T < TBM$  dla wszystkich pojazdów  $j = 1, \dots, m$ , zatem mogą wynikać wyłącznie z DBM. W związku z tym, aby udzielić odpowiedzi dla DTMA, wystarczy sprawdzić, czy nierówność  $TVM_j(S, T) \leq DBM$  zachodzi dla wszystkich pojazdów  $j = 1, \dots, m$ .

Pokażemy teraz, że odpowiedź dla DTMA jest *tak* ( $MA(S, T) = y = 0$ ) **wtedy i tylko wtedy**, gdy odpowiedź dla RN3DM jest również *tak*.

(**RN3DM**  $\Rightarrow$  **DTMA**) Załóżmy, że odpowiedź dla RN3DM jest *tak*. Zatem istnieją permutacje  $\alpha$  i  $\beta$  takie, że  $u_j + \alpha(j) + \beta(j) = B$  dla wszystkich  $j = 1, \dots, m$ . Ideę dowodu opartą na uproszczonym przykładzie instancji DTMA z  $E = H = 0$  i  $A = 1$ , jeśli odpowiedzią dla RN3DM jest *tak*, przedstawiono na Rysunku 3.4.



Rysunek 3.4: Idea dowodu oparta na uproszczonym przykładzie instancji DTMA z  $E = H = 0$  i  $A = 1$ , jeśli odpowiedzią dla RN3DM jest *tak*

Zgodnie z rozważaną transformacją całkowity przebieg  $TVM_j(S, T)$  każdego pojazdu  $j = 1, \dots, m$  na koniec miesiąca  $T$  może być wyrażony wzorem:

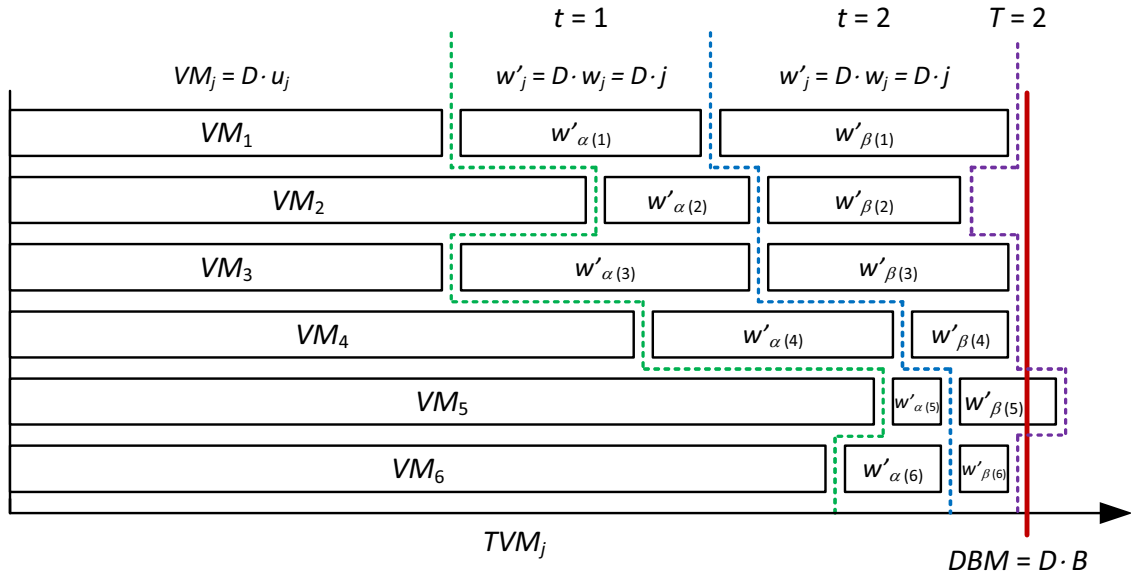
$$\begin{aligned}
 TVM_j(S, T) &= VM_j + M_j(S, T) = VM_j + w'_{S_1(j)} + w'_{S_2(j)} \\
 &= VM_j + Dw_{S_1(j)} + Dw_{S_2(j)} \\
 &= H + DAu_j + D(E + A\alpha(j)) + D(E + A\alpha(j)) \\
 &= H + D(2E + A(u_j + \alpha(j) + \beta(j))) \\
 &= H + D(2E + AB) \\
 &= DBM.
 \end{aligned}$$

Ponieważ  $TVM_j(S, T) = VM_j + M_j(S, T) \leq DBM$  dla wszystkich  $j = 1, \dots, m$ , to w czasie  $T$  nie ma żadnych czynności konserwacyjnych, stąd  $MA(S, T) = 0$ . Zatem odpowiedź dla DTMA jest również *tak*.

( $\neg$ **RN3DM**  $\Rightarrow$   $\neg$ **DTMA**) Przyjmijmy teraz, że odpowiedź dla RN3DM jest *nie*. Zatem nie istnieją permutacje  $\alpha$  i  $\beta$  takie, że  $u_j + \alpha(j) + \beta(j) = B$  dla wszystkich  $j = 1, \dots, m$ .



Ideę dowodu opartą na uproszczonym przykładzie instancji DTMA z  $E = H = 0$  i  $A = 1$ , jeśli odpowiedzią dla RN3DM jest *nie*, przedstawiono na Rysunku 3.5.



Rysunek 3.5: Idea dowodu oparta na uproszczonym przykładzie instancji DTMA z  $E = H = 0$  i  $A = 1$ , jeśli odpowiedzią dla RN3DM jest *nie*

Innymi słowy, istnieje co najmniej jedno  $q \in \{1, \dots, m\}$  takie, że  $u_q + \alpha(q) + \beta(q) = B + \lambda_q$ , gdzie  $\lambda_q \neq 0$ . Ponadto, z definicji RN3DM mamy  $\sum_{j=1}^m (u_j + \alpha(j) + \beta(j)) = \sum_{j=1}^m (u_j + \alpha(j) + \beta(j) + \lambda_j) = \sum_{j=1}^m (u_j + \alpha(j) + \beta(j)) + \sum_{j=1}^m \lambda_j = Bm$ , co implikuje  $\sum_{j=1}^m \lambda_j = 0$ . Stąd, jeśli istnieje co najmniej jedna taka wartość  $\lambda_q \neq 0$ , to również musi istnieć co najmniej jedno takie  $\lambda_r > 0$ , które kompensuje wartości ujemne, aby zachować  $\sum_{j=1}^m \lambda_j = 0$ . Na tej podstawie całkowity przebieg  $TVM_r(S, T)$  wskazanego pojazdu można wyrazić wzorem

$$\begin{aligned}
 TVM_r(S, T) &= VM_r + M_r(S, T) = VM_r + w'_{S_1(r)} + w'_{S_2(r)} \\
 &= VM_r + Dw_{S_1(r)} + Dw_{S_2(r)} \\
 &= H + DAu_r + D(E + A\alpha(r)) + D(E + A\beta(r)) \\
 &= H + D(2E + A(u_r + \alpha(r) + \beta(r))) \\
 &= H + D(2E + A(B + \lambda_r)) = H + D(2E + AB) + DA\lambda_r \\
 &= DBM + DA\lambda_r > DBM.
 \end{aligned}$$

Ponieważ dla co najmniej jednego pojazdu  $r$  mamy  $TVM_r(S, T) > DBM$ , to w czasie  $T$  występuje co najmniej jedna czynność konserwacyjna, a tym samym  $MA(S, T) > y = 0$ . Zatem odpowiedź dla DTMA jest również *nie*.

Niniejszym wykazano, że dla wersji decyzyjnej rozważanego problemu harmonogramowania DTMA odpowiedź jest *tak* wtedy i tylko wtedy, gdy odpowiedź dla problemu RN3DM jest również *tak*. To oznacza, że problem DTMA jest silnie NP-zupełny (ang. *strongly NP-complete*), a w konsekwencji rozważany problem harmonogramowania RMAO jest silnie NP-trudny (ang. *strongly NP-hard*).  $\square$

Wykazano, że rozważany problem planowania eksploatacji taboru kolejowego przy uwzględnieniu wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych jest silnie NP-trudny, czyli należy do klasy problemów NP-trudnych (udowodniono H1). Ma to duże znaczenie praktyczne, ponieważ wykluczono możliwość rozwiązania problemu obliczeniowego RMAO w czasie wielomianowym. Niniejszy dowód świadczy o niskim prawdopodobieństwie znalezienia dokładnych algorytmów rozwiązania o złożoności wielomianowej lub nawet pseudowielomianowej. Należy przypomnieć, że brak dokładnych algorytmów czasu wielomianowego wynika z NP-trudnej natury problemów, natomiast NP-trudność w sensie silnym powoduje, że nie istnieją algorytmy czasu pseudowielomianowego, które gwarantowałyby optymalne rozwiązania (chyba że  $P = NP$ ). Z drugiej strony, harmonogram  $S_t$  dla każdego miesiąca  $t$  może być reprezentowany jako sekwencja zadań (permutacja elementów zbioru  $J$ ), co implikuje całkowity rozmiar przestrzeni rozwiązań  $|S| = (n!)^T$ . W związku z tym, znalezienie rozwiązania optymalnego poprzez zastosowanie algorytmu przeglądu zupełnego (tj. sprawdzenie wszystkich rozwiązań) charakteryzuje się złożonością wykładniczą  $O((n!)^T)$  wynikającą z rozmiaru tejże przestrzeni.

Dlatego w tym rozdziale przedstawiono wielomianowe czasowo algorytmy optymalizacyjne oparte na heurystykach priorytetowych, metodzie Nawaz-Enscore-Ham'a (NEH), symulowanym wyżarzaniu (SA) oraz algorytmie genetycznym (GA) wzbogacone o poprawki i modyfikacje autora dysertacji. Choć nie gwarantują one uzyskania rozwiązania optymalnego, są w stanie znaleźć harmonogramy o zadowalających wartościach kryterialnych z praktycznego punktu widzenia.

### 3.4. Metody dokładne w rozwiązywaniu zadania planowania eksploatacji taboru kolejowego

W tym rozdziale zaprezentowano optymalne rozwiązania o złożoności wielomianowej, zaprojektowane przez autora niniejszej pracy. Badania w tym zakresie skupiły się na metodach przeglądu zupełnego (ang. *brute force*, BF) oraz podziału i ograniczeń (ang. *branch and bound*, B&B). Pierwsza z nich wymaga wygenerowania i sprawdzenia każdego dopuszczalnego rozwiązania. Natomiast druga, używa metody szacowania do ograniczania nieperspektywicznych rozwiązań, czyli podprzestrzeni, które nie zawierają optimum. Choć wykazano że problem RMAO jest problemem NP-trudnym, i związku z tym nie należy poszukiwać algorytmów dokładnych. To celem zastosowania proponowanych metod jest

weryfikacja ich możliwości dla teoretycznych wielkości instancji problemu (tj. małych rozmiarów), a także porównanie optymalnych rozwiązań z wynikami uzyskanymi przy użyciu nowych metod przybliżonych czasowych wielomianowych.

### 3.4.1. Przegląd zupełny

Opracowana metoda przeglądu zupełnego (ang. *brute force*, BF) polega na generowaniu permutacji w kolejności leksykograficznej, czyli konstrukcji zbioru  $\mathbb{S}$  wszystkich możliwych rozwiązań o mocy  $(n!)^T$ , tj.

$$\begin{aligned} \mathbb{S} = \{ & \langle \langle 1, 2, \dots, n-1, n \rangle, \langle 1, 2, \dots, n-1, n \rangle, \dots, \langle 1, 2, \dots, n-1, n \rangle, \langle 1, 2, \dots, n-1, n \rangle \rangle, \\ & \langle \langle 1, 2, \dots, n-1, n \rangle, \langle 1, 2, \dots, n-1, n \rangle, \dots, \langle 1, 2, \dots, n-1, n \rangle, \langle 1, 2, \dots, n, n-1 \rangle \rangle, \\ & \dots \\ & \langle \langle n, n-1, \dots, 2, 1 \rangle, \langle n, n-1, \dots, 2, 1 \rangle, \dots, \langle n, n-1, \dots, 2, 1 \rangle, \langle n, n-1, \dots, 2, 1 \rangle \rangle \}. \end{aligned}$$

Na tej podstawie dla każdego  $S \in \mathbb{S}$  obliczana jest wartość kryterium  $Q = Q(S)$ . Jeżeli dla nowo wygenerowanego  $S$  wartość  $Q$  jest większa niż najlepsza znaleziona  $Q^*$ , wówczas takie rozwiązanie zastępuje dotychczasowe, tj.  $Q^* = Q$  oraz  $S^* = S$ . Algorytm kończy działanie, gdy przejrzany zostanie cały zbiór przestrzeni rozwiązań  $\mathbb{S}$ , zaś rozwiązaniem optymalnym jest harmonogram  $S^*$  o najlepszej znalezionej wartości kryterium  $Q^*$  (patrz krok 7 w Algorytm 1).

Przypomnijmy, że harmonogram  $S = \langle S_1, \dots, S_t, \dots, S_T \rangle$  można reprezentować jako sekwencję permutacji  $S_t$ , gdzie każda z nich odpowiada określonemu przydziałowi zadań do lokomotyw w okresie  $t = 1, \dots, T$ . W związku z tym, przejrzanie całej przestrzeni rozwiązań (tj. możliwych harmonogramów) przez zaimplementowany algorytm BF bazuje na generowaniu permutacji  $S_t$  ( $t = 1, \dots, T$ ) zbioru  $n$  elementowego w porządku leksykograficznym. Procesów ów w oparciu o przykładowy zbiór  $n = 4$  elementowy generujący wszystkie permutacje ( $n! = 24$ ) można zobrazować w postaci drzewa (patrz również Rysunek 3.6) oraz w następujący sposób:  $\langle 1, 2, 3, 4 \rangle$ ,  $\langle 1, 2, 4, 3 \rangle$ ,  $\langle 1, 3, 2, 4 \rangle$ ,  $\langle 1, 3, 4, 2 \rangle$ ,  $\dots$ ,  $\langle 4, 3, 1, 2 \rangle$ ,  $\langle 4, 3, 2, 1 \rangle$ .

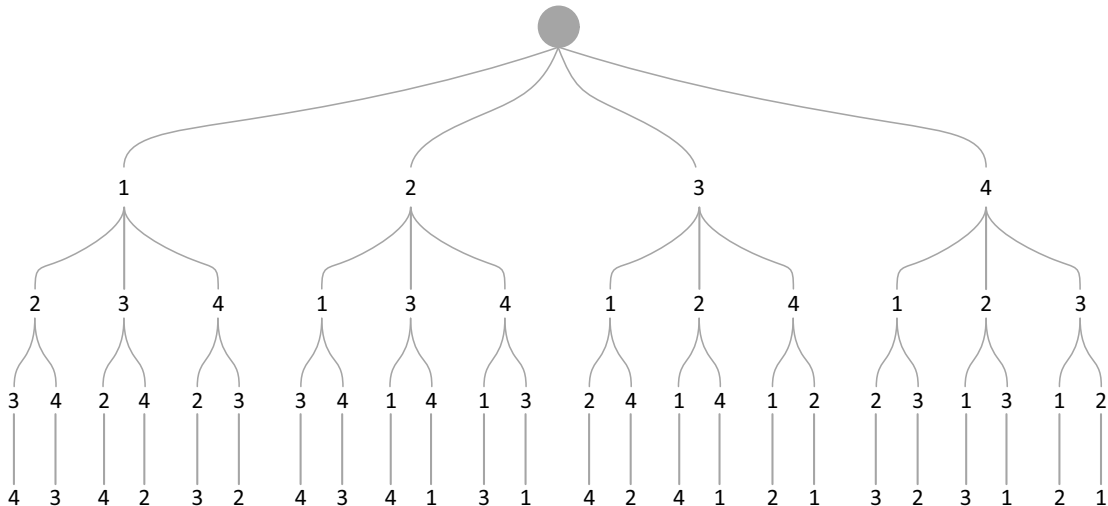
Pseudokod implementacji algorytmu przeglądu zupełnego został przedstawiony poniżej (Algorytm 1), którego złożoność obliczeniowa wynosi  $O((n!)^T)$ .

---

#### Algorytm 1 Przegląd zupełny – BF

---

- 1: Inicjalizuj:  $S = S^* = \langle \langle 1, \dots, n \rangle, \dots, \langle 1, \dots, n \rangle \rangle$   
oraz oblicz wartość kryterium  $Q^* = Q(S)$
  - 2: Jeżeli przejrzano całą przestrzeń rozwiązań idź do kroku 7
  - 3: Wygeneruj kolejny  $S$  zgodnie z kolejnością leksykograficzną
  - 4: Bazując na uzyskanym harmonogramie eksploatacji  $S$   
oblicz wartość kryterium  $Q = Q(S)$
  - 5: Jeżeli  $Q^* < Q$  wtedy  $S^* = S$  oraz  $Q^* = Q$
  - 6: Idź do kroku 2
  - 7:  $S^*$  jest rozwiązaniem optymalnym z wartością kryterium  $Q^* = Q(S^*)$
-



Rysunek 3.6: Przykład generowania permutacji w kolejności leksykograficznej

Dla lepszego zobrazowania działania algorytmu przeanalizujemy teraz proces przeszukiwania przestrzeni rozwiązań w oparciu o Przykład 1.

**Przykład 1.** Rozważmy instancję  $n = 3$  pojazdów oraz okres optymalizacji  $T = 4$  miesięcy. Wówczas konstrukcję harmonogramów opartych o generowanie permutacji w kolejności leksykograficznej tworzących zbiór wszystkich możliwych rozwiązań  $\mathbb{S}$  o mocy  $(n!)^T = 1296$  można przedstawić następująco:

$\langle\langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle\rangle,$   
 $\langle\langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 3, 2 \rangle\rangle,$   
 $\langle\langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 2, 1, 3 \rangle\rangle,$   
 $\dots$   
 $\langle\langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 3, 2, 1 \rangle\rangle,$   
 $\langle\langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 3, 2 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle\rangle,$   
 $\dots$   
 $\langle\langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 3, 2 \rangle, \langle 3, 2, 1 \rangle\rangle,$   
 $\langle\langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 2, 1, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle\rangle,$   
 $\dots$   
 $\langle\langle 3, 2, 1 \rangle, \langle 3, 2, 1 \rangle, \langle 3, 2, 1 \rangle, \langle 3, 2, 1 \rangle\rangle.$

### 3.4.2. Metoda podziału i ograniczeń

Ze względu na fakt, że algorytm BF przegląda całą przestrzeń rozwiązań, to wskazane jest opracowanie innej metody dokładnej, która pozwalałaby na zawężenie poszukiwań, a tym samym przyspieszenie procesu znajdowania rozwiązania optymalnego. Dlatego też, w niniejszej części skonstruowano dokładny algorytm oparty o technikę podziału i ograniczeń (od ang. *branch and bound*, B&B). Jest to podejście stosowane do uzyskiwania rozwiązań dokładnych dla problemów NP-trudnych (np. [108, 172, 177]). Warto podkreślić,

że nie jest to metoda podstawienia do wzoru. Dla danego problemu wymaga opracowania dedykowanego algorytmu łącznie ze sposobem generowania częściowych rozwiązań oraz wyznaczania sposobu szacowania górnych ograniczeń pozwalających na przycinanie nieperspektywicznych obszarów przestrzeni rozwiązań. Schemat opracowanego algorytmu podziału i ograniczeń może być przedstawiony następująco.

Zbiór wszystkich możliwych harmonogramów (rozwiązań) jest sekwencyjnie dzielony na mniejsze podzbiory opisane następującymi parametrami:

- $S' = \langle S'(1), \dots, S'(h) \rangle$  – częściowy harmonogram złożony z  $h$  elementów, zawierający faktyczne przypisanie zadań dla wszystkich pojazdów  $V$  w okresach  $\{1, \dots, t'\}$  oraz dla pojazdów  $V' = \{V_1, \dots, V_{v'}\}$  w okresie  $t'$ ; stosując wcześniej zdefiniowaną ogólną notację dla harmonogramu możemy zapisać  $S' = \langle S'_1, \dots, S'_{t'-1}, S'_{t'} = \langle J_{[1]}, \dots, J_{[v']} \rangle \rangle$ ;
- $S'' = \langle S''(h+1), \dots, S''(N) \rangle$  – sztucznie generowany harmonogram będący dopełnieniem  $S'$  służący oszacowaniu potencjalnego wpływu jeszcze nieprzydzielonych zadań dla pojazdów  $V'' = V \setminus \{V_1, \dots, V_{v'}\}$  w okresie  $t'$  oraz dla pojazdów  $V$  w okresach  $\{t'+1, \dots, T\}$ ; stosując wcześniej zdefiniowaną ogólną notację dla harmonogramu możemy zapisać  $S'' = \langle S''_t = S''_{t'} = \langle J_{[v'+1]}, \dots, J_{[n]} \rangle, S''_{t'+1}, \dots, S''_T \rangle$ , jeżeli  $V'' = \emptyset$  wówczas  $S''_t = \emptyset$ ;

gdzie  $h \leq N$ ,  $t' = \lfloor (h-1)/n \rfloor + 1$  oraz  $v' = ((h-1) \bmod n) + 1$ . Ponadto dla ułatwienia rozważań zdefiniujemy zbiór  $J' = \{j : j = J_{[v]}, v \in V'\}$  indeksów zadań przypisanych do pojazdów  $V'$  w okresie  $t'$  oraz zbiór  $J'' = J \setminus J'$  pozostałych indeksów zadań, tj. nieprzydzielonych w okresie  $t'$ .

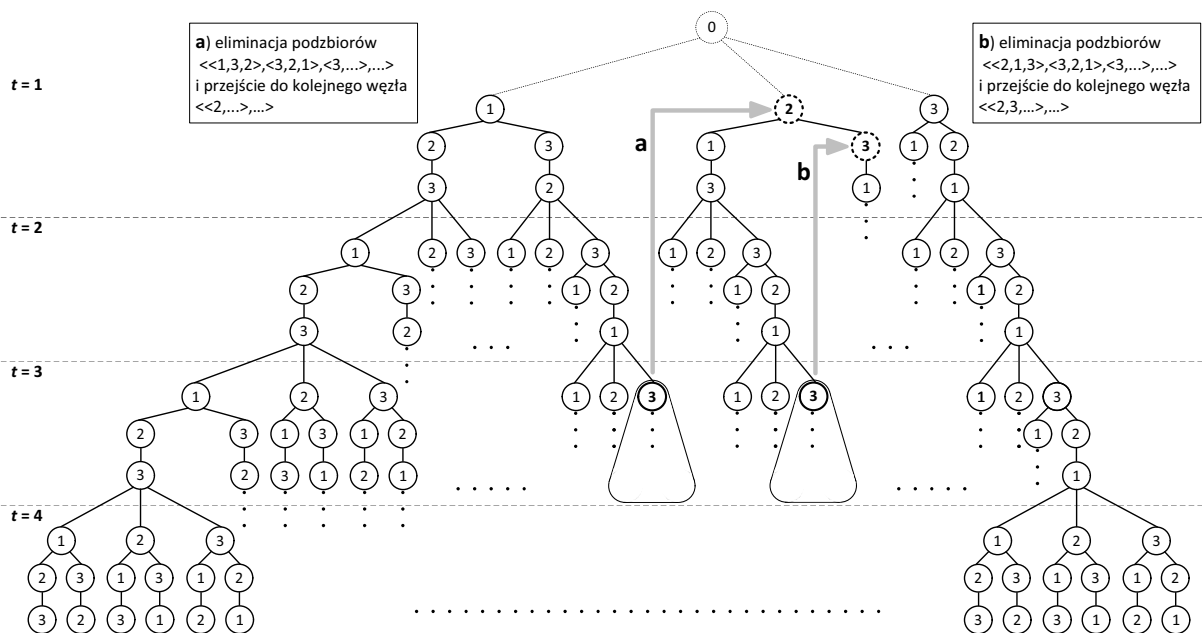
W trakcie procesu przeszukiwania przestrzeni rozwiązań dla każdego analizowanego częściowego harmonogramu  $S'$  generowane jest jego dopełnienie  $S''$ , w taki sposób, że w okresie  $t'$  dla pojazdów ze zbioru  $V' = V \setminus \{V_1, \dots, V_{v'}\}$  przypisywane jest to samo zadanie o najmniejszym obciążeniu spośród nieprzydzielonych w okresie  $t'$ , tj.  $j'' = \operatorname{argmin}_{j \in J''} \{w_j\}$ . Natomiast w pozostałych okresach  $\{t'+1, \dots, T\}$  wszystkim pojazdom w  $S''$  przydzielone jest zadanie o najmniejszym możliwym obciążeniu, tj.  $j_{\min} = \operatorname{argmin}_{j \in J} \{w_j\}$ , tj.  $S'' = \langle S''_{t'} = \langle J_{[v'+1]} = j'', \dots, J_{[n]} = j'' \rangle, S''_{t'+1} = \langle J_{[1]} = j_{\min}, \dots, J_{[n]} = j_{\min} \rangle, \dots, S''_T = \langle J_{[1]} = j_{\min}, \dots, J_{[n]} = j_{\min} \rangle \rangle$ .

Na tej podstawie obliczane jest górne oszacowanie (ang. *upper bound*) kryterium jakie może zostać uzyskane na bazie częściowego harmonogramu  $S'$ , tj.  $UB(S') = Q(\hat{S})$ , gdzie  $\hat{S} = S' \cup S''$  jest konkatencją  $S'$  oraz  $S''$  (sztucznego rozwiązania skonstruowanego wg powyższych zasad). Innymi słowy każdy możliwy dopuszczalny harmonogram będący rozwinięciem  $S'$  nie będzie miał kryterium wyższego niż obliczone  $UB$ .

Bazując na tym fakcie, jeżeli podczas procesu przeszukiwania przestrzeni rozwiązań i generowania kolejnych  $S'$  uzyskamy oszacowanie  $UB$  mniejsze bądź równe od wartości dolnego ograniczenia  $LB$  (ang. *lower bound*), czyli najlepsze znalezione do tej pory rozwiązanie, wtedy sprawdzany podzbiór rozwiązań jest odrzucany. Oznacza to, że nieper-

spektywiczne jest analizowane harmonogramów będących rozwinięciem  $S'$ . W przeciwnym razie częściowy harmonogram  $S'$  jest modyfikowany wraz z dopełnieniem  $S''$  tak, aby odwzorować kolejne podzbiory przestrzeni rozwiązań. Proces ten jest kontynuowany, aż wszystkie możliwe rozwiązania zostaną przejrane, bądź odrzucone. W przedstawionym podejściu zastosowano poszukiwanie włąb, a wartość początkowa dolnego ograniczenia  $LB$  dostarczana jest przez algorytm heurystyczny.

Zauważmy, że jeżeli w procesie przeszukiwania  $h = N$ , to wartość  $UB(S')$  odpowiada faktycznemu przypisaniu wszystkich zadań do pojazdów i obliczane jest rzeczywiste kryterium bez oszacowania. Ponadto, gdyby dla takiego przypadku spełniona była nierówność  $UB(S') > LB$ , wówczas jest to najlepsze do tej pory znalezione rozwiązanie i zostaje zapamiętane, tj.  $LB = UB$  oraz  $S^* = S'$ .



Rysunek 3.7: Przykład obrazujący ideę proponowanego algorytmu B&B

W celu przybliżenia sposobu obliczania górnego oszacowania przeanalizujemy Przykład 2.

**Przykład 2.** Dana jest instancja problemu złożona z  $n = 3$  pojazdów oraz zadań o następujących relacjach obciążeń  $w_1 > w_2 > w_3$ . W trakcie procesu przeszukiwania przestrzeni rozwiązań analizowano następujący częściowy harmonogram  $S' = \langle \langle 1, 3, 2 \rangle, \langle 3, 2, 1 \rangle, \langle 3 \rangle \rangle$ , gdzie  $h = 7$ . Na tej podstawie obliczymy parametry pomocnicze:

- $t' = \lfloor (h - 1)/n \rfloor + 1 = \lfloor (7 - 1)/3 \rfloor + 1 = 3$ ,
- $i' = ((h - 1) \bmod n) + 1 = ((7 - 1) \bmod 3) + 1 = 1$
- $V' = \{1\}$ ,  $V'' = \{2, 3\}$ ,
- $J' = \{3\}$  ponieważ  $S'_{t'} = \langle J_{[1]} = 3 \rangle$ ,
- $J'' = J \setminus J' = \{1, 2\}$ ,  $j'' = 2$  oraz  $j_{\min} = 3$ , gdyż  $w_1 > w_2 > w_3$ .

Bazując na powyższym otrzymujemy  $S'' = \langle\langle 1, 1 \rangle, \langle 1, 1, 1 \rangle, \dots \langle 1, 1, 1 \rangle\rangle$ , a tym samym  $\hat{S} = S' \cup S'' = \langle\langle 1, 3, 2 \rangle, \langle 3, 2, 1 \rangle, \langle 3|1, 1 \rangle, \langle 1, 1, 1 \rangle, \dots \langle 1, 1, 1 \rangle\rangle$ , gdyż  $\hat{S}' = S'_t \cup S''_t = \langle 3|1, 1 \rangle$ .

Przeanalizujemy teraz proces przeszukiwania przestrzeni rozwiązań w oparciu o Przykład 3 i zaprezentowany na Rysunku 3.7.

**Przykład 3.** Rozważmy instancję  $n = 3$  pojazdów oraz okres optymalizacji  $T = 4$  miesięcy. Częściowe harmonogramy  $S'$  wyznaczane są na bazie permutacji generowanych w porządku leksykograficznym analogicznie jak w przypadku algorytmu przeglądu zupełnego (Przykład 1). Zatem w pierwszej kolejności generowany jest następujący harmonogram  $S = \langle\langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle\rangle$ , zaś na tej podstawie oraz poziomu  $h$  budowane są powiązane z nim częściowe harmonogramy  $S'$ , tj.  $\langle\langle 1 \rangle\rangle$  ( $h = 1$ ),  $\langle\langle 1, 2 \rangle\rangle$  ( $h = 2$ ),  $\dots$ ,  $\langle\langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle\rangle$  ( $h = N = 12$ ), gdzie  $N = 12$  jest maksymalną głębokością drzewa reprezentującego przestrzeń rozwiązań (Rysunek 3.6). Na każdym poziomie  $h$  generowane jest dopełnienie  $S''$  aktualnego częściowego rozwiązania  $S'$  pozwalające na obliczenie szacowanego górnego ograniczenia  $UB(S')$  (patrz Przykład 2), które jest porównywane z aktualnie najlepszym znalezionym rozwiązaniem (dolnym ograniczeniem)  $LB$ . Na najniższym poziomie drzewa  $N = 12$  obliczana jest wartość kryterium  $Q$  dla harmonogramu  $S' = S$ , a następnie generowany jest kolejny harmonogram bazowy w kolejności leksykograficznej  $S = \langle\langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 3, 2 \rangle\rangle$ , zaś  $h = 11$ . Proces ten jest kontynuowany, aż nastąpi przycięcie drzewa (tj. przestrzeni rozwiązań), bądź sprawdzone zostaną wszystkie potencjalne rozwiązania.

Proces przeszukiwania przestrzeni rozwiązań przez omawiany algorytm można zobrazować na podstawie drzewa (patrz Rysunek 3.7). Na tej podstawie założymy, że pierwsze odcięcie przestrzeni rozwiązań następuje dla częściowego harmonogramu  $S' = \langle\langle 1, 3, 2 \rangle, \langle 3, 2, 1 \rangle, \langle 3 \rangle\rangle$ , gdzie  $h = 7$ , czyli obliczony  $UB(S')$  jest nie większy niż aktualna dolna granica  $LB$ . W związku z tym, wszystkie rozwiązania będące rozwinięciem  $S'$  nie będą zawierały harmonogramu o kryterium lepszym niż dotychczas znalezione  $LB$ . W takim przypadku następuje odcięcie powiązanej przestrzeni i przejście do kolejnego węzła drzewa poszukiwań, tj. nowe  $S' = \langle\langle 2 \rangle\rangle$  (patrz Rysunek 3.7, przykład (a)). Jeżeli dla nowego  $S'$  uzyskamy oszacowanie  $UB(S') > LB$ , wówczas proces poszukiwania przechodzi w głąb drzewa poprzez generowanie kolejnego częściowego rozwiązania zgodnie z kolejnością leksykograficzną tworzenia permutacji, tj.  $S' = \langle\langle 2, 1 \rangle\rangle$ . Natomiast jeżeli dla oszacowania zachodzi relacja  $UB(S') \leq LB$ , to następuje odcięcie powiązanej przestrzeni i przejście do kolejnego węzła drzewa, tj. nowe  $S' = \langle\langle 2, 3, \dots \rangle, \dots \rangle$  (patrz Rysunek 3.7, przykład (b)).

Pseudokod opracowanego algorytmu podziału i ograniczeń (B&B) został przedstawiony w następujący sposób (Algorytm 2). Chociaż opracowane podejście nadal ma teoretyczną złożoność obliczeniową wykładniczą  $O((n!)^T)$ , to jednak w praktyce pozwala (w odnie-

sieniu do BF) na znaczne przyspieszenie procesu znajdowania rozwiązania optymalnego (patrz Rozdział 4.2).

---

**Algorytm 2** Algorytm podziału i ograniczeń – B&B
 

---

- 1: Inicjalizuj:  $S^*$  oraz  $LB$  uzyskane przez algorytm heurystyczny,  $S' = \emptyset$
  - 2: Jeżeli przejrano całą przestrzeń rozwiązań idź do kroku 10
  - 3: Wygeneruj kolejny częściowy harmonogram  $S'$  zgodnie z kolejnością leksykograficzną
  - 4: Wygeneruj sztuczny harmonogram  $S''$  będące dopełnieniem  $S'$
  - 5: Bazując na uzyskanym harmonogramie eksploatacji  $\hat{S} = S' \cup S''$   
oblicz górne oszacowanie  $UB = Q(\hat{S})$
  - 6: Jeżeli  $UB \leq LB$  idź to kroku 8
  - 7: Jeżeli  $h == N$  wtedy  $S^* = S'$  oraz  $LB = UB$
  - 8: Idź do kroku 2
  - 9: Przytnij przestrzeń rozwiązań bazując na  $S'$  oraz idź do kroku 2
  - 10:  $S^*$  jest rozwiązaniem optymalnym o kryterium  $Q^* = LB$
- 

### 3.5. Metody przybliżone w rozwiązywaniu zadania planowania eksploatacji taboru kolejowego

W niniejszej części dysertacji przedstawiono zaprojektowane przez autora metody przybliżone, rekomendowane dla problemów silnie NP-trudnych, jakim jest problem RMAO. Metody te dostarczają rozwiązania gorsze od optymalnego, ale działają w czasie wielomianowym. Zaproponowano algorytmy heurystyczne (Balance Heuristic – BH, Balance Mileage to Maintenance Heuristic – BM2MH, Nawaz-Enscore-Ham – NEH) oraz metaheurystyczne (algorytm symulowanego wyżarzania – SA, genetyczny – GA), które zostały wzbogacone o dodatkowe modyfikacje, ważne z perspektywy generowania wyników dla rozważanego problemu. Dodatkowo uwzględniono ustalony harmonogram bez optymalizacji (Fix assignement – FA), który stanowi dotychczas stosowaną heurystykę dla tworzenia planów w przedsiębiorstwach kolejowych<sup>2</sup>. Jest to początkowy harmonogram eksploatacji taboru ze stałym przypisaniem zadań transportowych. W niniejszych badaniach FA jest również punktem odniesienia dla rozwiązań generowanych przez inne proponowane metody. Skoncentrowano się na algorytmach heurystycznych (Rozdział 3.5.1), które są dedykowane danemu problemowi optymalizacyjnemu oraz algorytmach metaheurystycznych (Rozdział 3.5.2), będące ogólną koncepcją przeszukiwania przestrzeni rozwiązań. Celem zaprojektowania tychże metod jest przede wszystkim możliwość ich zastosowania dla rzeczywistych rozmiarów instancji problemu RMAO. W Rozdziale 4 dokonano analizy czasu działania i jakości dostarczanych rozwiązań przez zaproponowane algorytmy przybliżone.

<sup>2</sup> m.in. taką politykę budowania harmonogramów eksploatacji taboru ma firma, z którą współpracował autor rozprawy w ramach prowadzonych badań. Jest to również popularne podejście przedsiębiorstw kolejowych dla generowania początkowych harmonogramów.



### 3.5.1. Algorytmy heurystyczne

Heurystyką nazywamy algorytm zwracający rozwiązanie przybliżone, uzyskane w akceptowalnym czasie przez decydenta. Metoda ta powinna dążyć do wygenerowania rozwiązania dopuszczalnego o wartości funkcji celu jak najbliższej optymalnej. Dla pewnych instancji algorytm heurystyczny może generować rozwiązania nieoptymalne i nie jest znana dla niego ocena najgorszego przypadku. Jednakże w przypadku problemów trudnych obliczeniowo, gdzie czas na dokładne rozwiązanie dla większych instancji problemu staje się zbyt duży, stanowi doskonałą alternatywę dla metod dokładnych. Zazwyczaj algorytm heurystyczny ma złożoność wielomianową i działa szybko w praktyce.

#### Ustalony harmonogram bez optymalizacji – FA

Metoda FA (od ang. *Fix Assignment*) dotyczy stałego przypisania zadań do pojazdów w harmonogramie  $S$ . Te same zadanie  $j$  jest realizowane przez ten sam pojazd  $v$  w rozpatrywanym horyzoncie  $T$ . Niniejsze podejście jest bazowym punktem odniesienia dla innych metod, ponieważ odzwierciedla sytuację, kiedy brak jakichkolwiek zmian w planach przypisania zadań do lokomotyw (stały przydział zadań do pojazdów).

#### Algorytm Balance Heuristic – BH

Proponowana metoda BH (ang. *Balance Heuristic*) to zachłanny algorytm priorytetowy, który opiera się na równomiernym bilansowaniu obciążenia zadaniami (średnimi przebiegami  $w_j$ ) między pojazdami, biorąc pod uwagę ich bieżący, skumulowany przebieg  $VM_{v,K}$ . Wszystkie zadania w każdym okresie  $t$  (np. miesiącu) są przydzielane w porządku nierosnącym według ich średnich wartości przebiegu  $w_j$  do pojazdów zgodnie z niemalejącą wartością skumulowanego przebiegu  $VM_{v,K}$  od ostatniej obsługi technicznej na poziomie  $K$  (tj. najwyższego poziomu przeglądu pojazdu). Pseudokod opracowanego algorytmu BH przedstawiono poniżej (Algorytm 3). Indeks zadania na pozycji  $r$  w  $J'$  to  $J'(r)$ , natomiast  $V'(r)$  stanowi indeks lokomotywy na pozycji  $r$  w  $V'$ . Liczbę dni w okresie  $t$  oznaczono jako  $d(t)$ . Złożoność obliczeniowa wyznaczania harmonogramu przez heurystykę BH to  $O(Tn \log n)$  (kroki 1-9), zaś terminy przeglądów i wartość kryterium obliczane są w  $O(MKn)$  (krok 10). Rozwiązanie w postaci harmonogramu  $S$  z wartością kryterium  $Q^*$  jest generowane po symulacji wszystkich okresów  $t$ , gdzie  $t = T$ . Algorytm BH wówczas kończy swoje działanie (krok 11).

Algorytm BH nie uwzględnia okresu optymalizacji  $T$ . To oznacza, że w każdym okresie  $t$  konstruowane jest nowe rozwiązanie (poprzez częściowe harmonogramy), które może być nieperspektywiczne dla całego rozpatrywanego horyzontu czasowego optymalizacji. W ogólnym przypadku jest to wada, ponieważ bilansowanie obciążenia lokomotyw zadaniami w każdym okresie  $t$  nie uwzględnia zmiany wartości kryterium, co może spowodować że dla rozpatrywanego horyzontu czasowego  $T$  zostanie zaplanowanych więcej przeglądów (szczególnie w długich horyzontach czasowych). Metody, które bilansowałyby obciążenia,

jednocześnie uwzględniające horyzont czasowy i wartość kryterium dla każdego okresu, opóźniłyby przeglądy taboru w taki sposób, aby ich terminy znajdowały się poza rozpatrywanym horyzontem. Jest to ważne z perspektywy zarządzania taborom kolejowym, dlatego też w przypadku algorytmu BH jest to niekorzystne zjawisko. Dotychczas nie udało się ulepszyć tejsze metody.

---

**Algorytm 3** Balance Heuristic – BH
 

---

```

1: Uporządkuj indeksy zadań w  $J'$  według ich nierosnących wartości  $w_j$  i ustaw  $S = \emptyset$ 
2: Uporządkuj indeksy pojazdów w  $V'$  według
   ich nierosnących wartości łącznego przebiegu  $VM_{v,K}$ 
3: for  $t = 1$  to  $T$ 
4:   for  $r = 1$  to  $n$ 
5:     Przypisz zadanie  $j = J'(r)$  do pojazdu  $v = V'(r)$ 
       w miesiącu  $t$ :  $S_t(v) = j$ ;
6:     Zaktualizuj  $VM_{v,K}$  według przebiegu  $w_j$  i miesiąca  $t$ :
        $VM_{v,K} = VM_{v,K} + w_j d(t)$ ;
7:   end for
8:   Uporządkuj indeksy pojazdów w  $V'$  według
       ich nierosnących wartości łącznego przebiegu  $VM_{v,K}$ 
9: end for
10: Bazując na uzyskanym harmonogramie eksploatacji uzyskanym dla  $S$ 
    oblicz wartość kryterium  $Q = Q(S)$ 
11: Harmonogram  $S^* = (S_1, \dots, S_T)$  jest otrzymanym rozwiązaniem
    z wartością kryterium  $Q^* = Q(S^*)$ 

```

---

**Algorytm Balance Mileage to Maintenance Heuristic – BM2MH**

Algorytm BM2MH (ang. *Balance Mileage to Maintenance Heuristic*) to kolejna priorytetowa metoda zachłanna, której ideą jest równoważenie obciążenia zadaniami (średnim przebiegiem  $w_j$ ) między pojazdami, przy uwzględnieniu ich pozostałego przebiegu do kolejnego przeglądu o najwyższym poziomie. Zadania w każdym okresie  $t$  (np. miesiącu) są przydzielane w porządku nierosnącym według średnich wartości przebiegu  $w_j$  do pojazdów zgodnie z ich nierosnącymi wartościami pozostałego przebiegu. Wartość pozostałego przebiegu obliczona jest jako różnica między bieżącym przebiegiem  $VM_{v,K}$ , a wartością progową cyklu przeglądowo-naprawczego opartego na resursie kilometrowym  $DBM_K^f$  (w odniesieniu do najwyższego poziomu  $K$ ). Pseudokod BM2MH jest przedstawiony w postaci Algorytmu 4, gdzie  $J'(r)$  i  $V'(r)$  są kolejno indeksem zadania na pozycji  $r$  w  $J'$  oraz indeksem lokomotywy na pozycji  $r$  w  $V'$ . Natomiast  $d(t)$  to liczba dni w okresie  $t$ . Złożoność obliczeniowa wyznaczania harmonogramu (kroki 1-9), terminu przeglądów i wartości kryterium (krok 11) jest taka sama jak dla algorytmu BH, i wynosi  $O(Tn \log n + MKn)$ .

Podobnie jak algorytm BH, metoda BM2MH nie uwzględnia w procesie optymalizacji horyzontu  $T$ . Zatem rozwiązanie jest generowane z perspektywy lokalnej (zachłannie), ko-

lejno dla każdego okresu  $t$ . Brak uwzględnienia zadanego horyzontu czasowego  $T$  w konstrukcji rozwiązania, powoduje ryzyko wystąpienia planu przeglądów, gdzie sumaryczna dostępność pojazdów będzie niższa niż przy optymalizacji uwzględniającej zakładany okres  $T$ . Równoważenie obciążenia zadaniami między pojazdami, może spowodować, że więcej przeglądów zostanie zaplanowanych w zadanym okresie, a tym samym dostępność taboru będzie mniejsza. Metoda BM2MH, podobnie jak BH, nie uwzględnia tego, że termin przeglądów można opóźnić w taki sposób, by był poza okresem optymalizacji. Z perspektywy przedsiębiorstwa byłoby to korzystne, na przykład gdy po rozpatrywanym horyzoncie czasowym  $T$  brana jest pod uwagę sprzedaż taboru. Jest to wada zaproponowanej metody BM2MH, którą warto mieć na względzie szczególnie przy długoterminowych harmonogramach.

---

**Algorytm 4** Balance Mileage to Maintenance Heuristic – BM2MH
 

---

```

1: Uporządkuj indeksy zadań w  $J'$  według
   ich nierosnących wartości  $w_j$  i ustaw  $S = \emptyset$ 
2: Uporządkuj indeksy pojazdów w  $V'$  według
   ich nierosnących wartości  $(DBM_K^f - VM_{v,K})$ 
3: for  $t = 1$  to  $T$ 
4:   for  $r = 1$  to  $n$ 
5:     Przypisz zadanie  $j = J'(r)$  do pojazdu  $v = V'(r)$ 
     w miesiącu  $t$ :  $S_t(v) = j$ ;
6:     Zaktualizuj  $VM_{v,K}$  według przebiegu  $w_j$  i miesiąca  $t$ :
      $VM_{v,K} = (VM_{v,K} + w_j d(t)) \bmod DBM_K^f$  ;
7:   end for
8:   Uporządkuj indeksy pojazdów w  $V'$  według
     ich nierosnących wartości  $(DBM_K^f - VM_{v,K})$ 
9: end for
10: Bazując na uzyskanym harmonogramie eksploatacji uzyskanym dla  $S$ 
    oblicz wartość kryterium  $Q = Q(S)$ 
11: Harmonogram  $S^* = (S_1, \dots, S_T)$  jest otrzymanym rozwiązaniem
    z wartością kryterium  $Q^* = Q(S^*)$ 

```

---

**Algorytm NEH**

Proponowana metoda, bazuje na ogólnej koncepcji przeszukiwania przestrzeni rozwiązań opracowanej przez Nawaz-Enscore-Ham (NEH) [87]. Algorytm NEH jest uważany za jedną z najbardziej skutecznych heurystyk do rozwiązywania klasycznego permutacyjnego problemu przepływowego (ang. *flowshop problem*), minimalizującego długość uszeregowania (ang. *makespan*) przy stałych czasach wykonywania zadań. Wskazuje się, że bezdyskusyjna wyższość innych algorytmów (w tym metaheurystyk) nad NEH może być wykazana, jeśli poprawiają one losowe rozwiązanie początkowe (sekwencję zadań) w czasie zbliżonym do czasu potrzebnego dla NEH w taki sposób, że dostarczone rozwiązanie jest lepsze od uzyskanego przez NEH [65]. W pracy [66] przedstawiono wprawdzie pewne próby projek-

towania takich algorytmów, ale jednocześnie stwierdzono, że jest mało prawdopodobne, aby udało się opracować heurystykę typu innego niż NEH, która byłaby konkurencyjna w stosunku do algorytmu NEH. Zaobserwowano, że NEH może być równie wydajny nie tylko jako samodzielny algorytm, ale również jest często stosowany do określenia początkowego rozwiązania w wielu innych algorytmach [107]. Dlatego też, była to silna motywacja by skonstruować algorytm oparty o ideę działania algorytmu NEH.

Warto podkreślić, że główna trudność w zbudowaniu takiej metody dla rozważanego problemu wynika z oceny harmonogramów cząstkowych. Mianowicie, przypisanie zadań do pojazdów na dany miesiąc nie ma widocznego wpływu na globalną wartość kryterium, gdyż wyniki decyzji podjętych na wcześniejszych etapach są widoczne dopiero w dłuższym horyzoncie czasowym. Aby zniwelować tę niedogodność, analizując harmonogramy cząstkowe i ich potencjalny wpływ na wartość kryterium, tymczasowo przypisujemy zadania nie tylko do bieżącego miesiąca, ale do wszystkich pozostałych miesięcy w horyzoncie czasowym. Pseudokod implementacji proponowanej metody jest podany w Algorytmie 5.

---

**Algorytm 5** Algorytm NEH
 

---

```

1: Uporządkuj indeksy zadań w  $J'$  według ich nierosnących wartości  $w_j$  i  $S = \emptyset$ 
2: for  $t = 1$  to  $T$ 
3:   for  $j' = 1$  to  $J'$ 
4:      $Q^* = \infty$ ;
5:      $j = J'[j']$ ;      /*indeks zadania na pozycji  $j'$  w  $J'^*$ */
6:     for  $v' = 1$  to  $n - j' + 1$ 
7:        $v = V'[v']$ ;    /*indeks pojazdu na pozycji  $v'$  w  $V'^*$ */
8:       for  $t' = t$  to  $T$ 
9:         Ustal harmonogram pomocniczy  $S_{t'}(v) = j$ ;
10:      end for
11:      Bazując na uzyskanym harmonogramie eksploatacji uzyskanym dla  $S$ 
12:      oblicz wartość kryterium  $Q = Q(S)$ 
13:      for  $t' = t$  to  $T$ 
14:        Przywróć harmonogram częściowy  $S_{t'}(v) = \emptyset$ ;
15:      end for
16:      if  $Q > Q^*$  then
17:         $v'^* = v'$  i  $v^* = v$  i  $Q^* = Q$ ;
18:      end if
19:    end for
20:    Ustal harmonogram częściowy  $S_t(v^*) = j$ ;
21:    Zamień  $V'[v'^*]$  i  $V'[n - j' + 1]$ ; /*równoznaczne z usunięciem  $v^*$  z  $V'^*$ */
22:  end for
23:  Ustal harmonogram częściowy  $S_t(V'[1]) = J'[n]$ ;
24: end for
25: Harmonogram  $S^* = (S_1, \dots, S_T)$  jest otrzymanym rozwiązaniem
    z wartością kryterium  $Q^* = Q(S^*)$ 

```

---

Proponowany algorytm NEH analizuje dla każdego miesiąca  $t$  (krok 2) potencjalny przydział zadań w kolejności oznaczonej przez  $J'$  (krok 3) do wszystkich pojazdów

(krok 6), gdzie  $J'[j']$  jest indeksem zadania na pozycji  $j'$  w strukturze  $J'$ . Podobna interpretacja dotyczy  $V'[v']$  i pojazdów. Związany z tym algorytmem harmonogram pomocniczy zakłada, że zadanie  $j$  na pozycji  $j'$  w  $J'$  jest czasowo przypisane do pojazdu  $v = V'[v']$  dla pozostałych miesięcy horyzontu czasowego, tj.  $t' = t, \dots, T$  (kroki 8-10). Na tej podstawie przeprowadzana jest symulacja przeglądów i napraw okresowych oraz obliczana jest wartość kryterium  $Q$  dla harmonogramu pomocniczego (krok 11). Następnie harmonogram częściowy jest przywracany dla rozważanego  $v$  (kroki 12-14). Jeżeli wartość kryterium  $Q$  uzyskana dla harmonogramu pomocniczego dla pojazdu  $v$  jest większa od najlepszej znalezionej wartości  $Q^*$  (krok 15), to bieżący pojazd  $v^* = v$ , jego pozycja  $v'^* = v'$  w  $V'$  oraz wartość kryterium  $Q^* = Q$  są przechowywane jako najlepsze dla danego zadania (krok 16) w rozważanym miesiącu  $t$ .

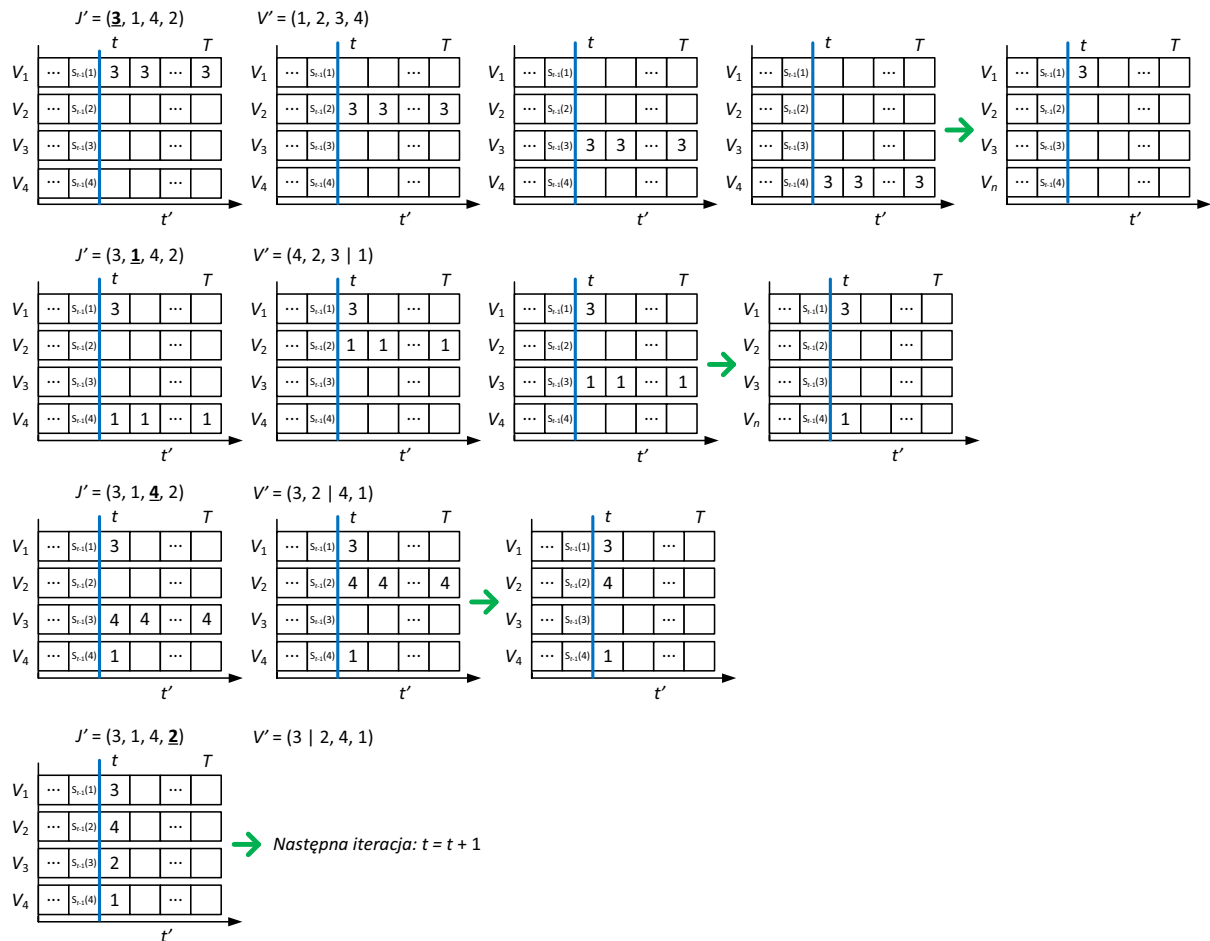
Po sprawdzeniu wszystkich nieprzydzielonych pojazdów dla zadania  $j$ , harmonogram częściowy jest aktualizowany tak, że zadanie  $j$  jest przypisane do pojazdu  $v^*$  podczas miesiąca  $t$ , tj.  $S_t(v^*) = j$  (krok 19). Ponadto pojazd  $v^*$  jest wykluczony z rozpatrywanej puli w miesiącu  $t$  dla innych zadań (krok 20). Proces ten jest kontynuowany do momentu, gdy wszystkie zadania dla każdego miesiąca  $t = 1, \dots, T$  zostaną przypisane do pojazdów. Przedstawiona implementacja NEH wymaga  $O((T^2n^2 + TMKn^3)/2)$  kroków, a jej złożoność obliczeniowa również wynosi  $O(T^2n^2 + TMKn^3)$ . Dla lepszego zrozumienia prezentowanej metody przeanalizujemy Przykład 4.

**Przykład 4.** Rozważmy częściowy harmonogram  $n$  zadań w miesiącu  $t$  generowany przez algorytm NEH, gdzie kolejność ich sprawdzania określona jest przez  $J' = \langle 3, 1, 4, 2 \rangle$ , a indeksy pojazdów rozpatrywane są według  $V' = \langle 1, 2, 3, 4 \rangle$ . Kroki iteracji  $t$  dla zadań oznaczonych kolejnymi pozycjami w  $V'$  są wykonywane w następujący sposób (patrz Rysunek 3.8):

- $j' = 1$ : zadanie  $J'[1] = 3$  jest przypisywane do pojazdów w kolejności określonej przez  $V' = \langle 1, 2, 3, 4 \rangle$  dla  $v' = 1, \dots, n - j' + 1 = 4$ . Ocena dla każdego pojazdu jest wykonywana w taki sposób, że zadanie 3 jest tymczasowo przydzielane dla wszystkich  $t' = t, \dots, T$ . Załóżmy, że najlepszą wartością kryterium jest  $v^* = 1$  ( $v'' = 1$ ), zatem wynikowa struktura pomocnicza to  $V' = \langle 4, 2, 3, 1 \rangle$ ;
- $j' = 2$ : zadanie  $J'[2] = 4$  przypisywane do pojazdów w kolejności określonej przez  $V' = \langle 4, 2, 3, 1 \rangle$  dla  $v' = 1, \dots, n - j' + 1 = 3$ . Zatem analizowane są tylko pierwsze 3 pozycje w  $V'$ , tj.  $V' = \langle 4, 2, 3 | 1 \rangle$ , gdzie dla większej przejrzystości zastosowano symbol '|'. Załóżmy, że najlepszym przypisaniem  $j = 4$  jest  $v^* = 2$ , stąd  $V' = \langle 3, 2, 4, 1 \rangle$ ;
- $j' = 3$ : zadanie  $J'[3] = 1$  jest przypisane do pojazdów w kolejności określonej przez  $V' = \langle 3, 2, 4, 1 \rangle$  dla  $v' = 1, \dots, n - j' + 1 = 2$ . Zatem analizowane są tylko pierwsze 2 pozycje w  $V'$ , tj.  $V' = \langle 3, 2 | 4, 1 \rangle$ . Załóżmy, że najlepszym przypisaniem  $j = 1$  jest  $v^* = 4$ , a więc  $V' = \langle 3, 2, 4, 1 \rangle$ ;

—  $j' = 4$ :  $J'[4] = 2$ , ponieważ istnieje również jeden nieprzydzielony pojazd i  $V' = \langle 3, 2, 4, 1 \rangle$ , to  $v^* = V'[1] = 3$ .

Na tej podstawie otrzymaliśmy częściowy harmonogram dla miesiąca  $t$  równy  $S_t = \langle 3, 4, 2, 1 \rangle$ . Następnie  $t$  jest zwiększane, a zadania są rozpatrywane w kolejności określonej przez  $J'$  i tymczasowo przypisane do pojazdów w kolejności określonej przez  $V' = \langle 3, 2, 4, 1 \rangle$ .



Rysunek 3.8: Przykład obrazujący ideę działania proponowanego algorytmu NEH

### 3.5.2. Algorytmy metaheurystyczne

Metaheurystyki nie są szczegółowo opisanymi algorytmami, a ogólną koncepcją przeszukiwania przestrzeni rozwiązań, które to powinny zostać dopasowane pod kątem specyfiki rozwiązywanego zagadnienia. Ich konstrukcja pozwala na realizację jednocześnie dwóch sprzecznych strategii tj. intensyfikacji (eksploatacji) i dywersyfikacji (eksploracji). Strategia intensyfikacji polega na lokalnym przeszukiwaniu przestrzeni rozwiązań i dąży do iteracyjnej poprawy bieżącego rozwiązania (lub populacji rozwiązań). Natomiast strategia dywersyfikacji, określana mianem globalnej optymalizacji, polega na odnajdowaniu nowych kierunków poszukiwania i dąży do jak najszerszej eksploracji przestrzeni

rozwiązań. Wiąże się to z możliwością znacznego pogorszenia bieżącego rozwiązania (bądź populacji rozwiązań), ale dzięki temu pozwala na wyjście z obszaru lokalnego optimum. Obie te strategie przeplatają się wewnątrz algorytmów metaheurystycznych.

Dla każdej metaheurystyki możemy wyróżnić takie parametry jak *rozwiązanie początkowe*, *ruchy i sąsiedztwo*, *warunek zatrzymania*. Z perspektywy decydenta, szczególnie istotny jest parametr dotyczący *warunku zatrzymania* pracy algorytmu. Może on dotyczyć np. liczby iteracji bądź wartości progowej poprawy rozwiązania początkowego. Natomiast trudno ocenić na podstawie wymienionych przykładów, jak długo będzie działał algorytm. Dlatego też ze względów praktycznych, *warunkiem zatrzymania* dla proponowanych algorytmów metaheurystycznych w tej pracy jest czas trwania obliczeń (działania algorytmu). Stosowany parametr czasu uwzględnia rozmiar instancji problemu. Ponadto czas działania algorytmu będzie znany decydentowi, a ten z kolei może mieć wpływ na skrócenie bądź przedłużenie czasu obliczeń. Dłuższe działanie algorytmu, pozwala na przejrzanie większej liczby rozwiązań, tym samym zwiększając prawdopodobieństwo (nie gwarantując) znalezienie lepszego rozwiązania z perspektywy rozpatrywanego kryterium. Warto mieć na uwadze, że lepsze warunki sprzętowe pozwalają na szybszy proces przeszukiwania sąsiedztwa, czego efektem jest również przejrzanie większej liczby rozwiązań, niż na komputerze o niższej mocy obliczeniowej.

### Algorytm symulowanego wyżarzania – SA

Technika symulowanego wyżarzania (ang. *Simulated Annealing*, SA), zaproponowana w pracy [68], jest iteracyjną, stochastyczną metodą opartą na przeszukiwaniu sąsiedztwa. Inspiracją dla tego algorytmu jest proces technologiczny stosowany w metalurgii i hutnictwie szkła - schematu wyżarzania i chłodzenia ciał stałych. Dlatego też parametr sterujący zwany *temperaturą* (*Temp*) jest cechą charakterystyczną tej metody. Im wyższą wartość ma *temperatura*, tym prawdopodobieństwo wyboru gorszego rozwiązania jest większe, zwłaszcza w początkowej fazie działania algorytmu. Dzięki temu algorytm symulowanego wyżarzania może w określonych warunkach wyjść ze znalezionych ekstremów lokalnych i dalej podążać w kierunku rozwiązania optymalnego.

Prezentowany w niniejszej części algorytm SA opiera się na idei metody symulowanego wyżarzania [68], ale nie jest jego bezpośrednią implementacją. Główna idea tej techniki polega na rozpoczęciu pracy w pewnym *rozwiązaniu początkowym* (harmonogram)  $S = \langle S_1, \dots, S_t, \dots, S_T \rangle$  i sukcesywnym przemieszczaniu się po rozwiązaniach sąsiednich, aż nie zostanie spełniony *warunek zatrzymania*. W każdej iteracji *iter*, z *sąsiedztwa* aktualnego rozwiązania  $S$  wybierane są losowo dwa elementy tj.  $i$  oraz  $j$  (przydziału zadań do pojazdów) w losowo wybranym okresie  $t$ , gdzie nowe rozwiązanie  $S'$  jest generowane jako zamiana między sobą elementów  $i$ ,  $j$  w okresie  $t$ , tzn.  $S_t = \langle \dots, J_i, \dots, J_j, \dots \rangle$ ,  $S'_t = \langle \dots, J_j, \dots, J_i, \dots \rangle$ . Nowe rozwiązanie  $S = \langle S_1, \dots, S'_t, \dots, S_T \rangle$  zastępuje poprzednie  $S = \langle S_1, \dots, S_t, \dots, S_T \rangle$  z prawdopodobieństwem zależnym od różnicy między ich

wartościami kryterialnymi  $P(Temp_{iter}, S', S) = \min\{1, \exp(-(Q' - Q)/Temp)\}$ , gdzie  $Temp_{iter}$  jest parametrem nazywanym *temperaturą* w *iteracji iter*. Temperatura maleje podczas procesu poszukiwań zgodnie z logarytmicznym *schematem wyżarzania*  $Temp = Temp/(1 + \gamma \cdot Temp)$ , gdzie jego wartość początkowa i  $\gamma$  jest dobierana empirycznie. Przypominając, *warunkiem zatrzymania* dla proponowanego algorytmu SA będzie czas trwania obliczeń (działania algorytmu), który będzie uwzględniał rozmiar instancji problemu. Złożoność obliczeniowa pojedynczej iteracji dla SA jest określona przez złożoność obliczania kryterium  $Q(S)$  i jest szacowana jako  $O(MKn)$ . Pseudokod obecnego podejścia jest podany w Algorytmie 6.

---

#### Algorytm 6 Algorytm symulowanego wyżarzania – SA

---

```

1: Określ początkowy harmonogram  $S$  i związaną z nim
   wartość kryterium  $Q = Q(S)$  oraz  $S^* = S$  i  $Q^* = Q$ 
2: while (warunek_zatrzymania  $\neq$  prawda)
3:    $t =$  losowy indeks okresu z  $\{1, \dots, T\}$ 
4:    $i =$  losowy indeks zadania z  $\{1, \dots, n\}$ 
5:    $j =$  losowy indeks zadania z  $\{1, \dots, n\}$ 
6:   Ustal nowy harmonogram  $S'$  od  $S$  przez zamianę
     elementów z pozycji  $i$  na  $j$  w  $S_t$ 
7:   Bazując na uzyskanym harmonogramie eksploatacji uzyskanym dla  $S'$ 
     oblicz wartość kryterium  $Q' = Q(S')$ 
8:   Przypisz  $S = S'$  i  $Q = Q'$ 
     z prawdopodobieństwem  $\min\{1, \exp(-(Q' - Q)/Temp)\}$ 
9:   if  $Q < Q^*$  then
10:     $S^* = S$  i  $Q^* = Q$ 
11:   end if
12:   Aktualizuj  $Temp = Temp/(1 + \gamma \cdot Temp)$ 
13: end while
14: Harmonogram  $S^* = (S_1^*, \dots, S_T^*)$  jest otrzymanym rozwiązaniem
     z wartością kryterium  $Q^* = Q(S^*)$ 

```

---

#### Algorytm genetyczny – GA

Algorytmy genetyczne (ang. *Genetic Algorithms*, GA) należą do grupy algorytmów ewolucyjnych, które wzorowane są na naturalnych procesach ewolucji świata przyrody. Ideą GA jest zjawisko doboru naturalnego i dziedziczenia. Mechanizmy te polegają na procesie selekcji poprzez ocenę przystosowania poszczególnych osobników w danym środowisku, eliminację osobników gorzej przystosowanych (słabszych) i krzyżowanie ze sobą osobników najlepiej przystosowanych (silniejszych). Wynikiem działania algorytmu genetycznego jest populacja najlepiej przystosowanych osobników, wśród których może znajdować się najlepsze rozwiązanie.



---

**Algorytm 7** Algorytm genetyczny – GA

---

```

1: Inicjalizacja:
2: Określ początkowy harmonogram  $S^*$  i wartość kryterium  $Q^*$ 
3: Zdefiniuj zbiory Population, ParentPool, Offspring,
   gdzie każdy element jest parą  $(S, Q)$ 
   dostępną jako, np.  $Population[idx].S$ ,  $Population[idx].Q$ 
4: Wygeneruj populację początkową:
5: for  $p = 1, \dots, PopulationSize$ 
6:    $S' = \langle S'_1, \dots, S'_t, \dots, S'_T \rangle = S^*$ 
7:   for  $t = 1, \dots, T$ 
8:     for  $r = 1, \dots, n/2$ 
9:        $i =$  losowy indeks zadania z  $\{1, \dots, n\}$ 
10:       $j =$  losowy indeks zadania z  $\{1, \dots, n\}$ 
11:      Zamień elementy  $i$  i  $j$  w  $S'_t$ 
12:    end for
13:  end for
14: Bazując na uzyskanym harmonogramie eksploatacji uzyskanym dla  $S'$ 
   oblicz wartość kryterium  $Q' = Q(S')$ 
15: Przypisz  $Population[p].S = S'$  i  $Population[p].Q = Q'$ 
16: end for
17: Proces optymalizacji:
18: while (warunek_zatrzymania  $\neq$  prawda)
19:   ParentPool = {wybierz  $2 * OffspringSize$  losowe
   elementy z Population}
20: for  $idx = 1, \dots, OffspringSize$ 
21:    $ParentXX = ParentPool[2 * idx - 1]$ 
22:    $ParentXY = ParentPool[2 * idx]$ 
23:   Krzyżowanie:
24:    $S' = \langle S'_1, \dots, S'_t, \dots, S'_T \rangle = ParentXX.S$ 
25:   for  $q = 1, \dots, MixSize$ 
26:      $t =$  losowy indeks okresu z  $\{1, \dots, T\}$ 
27:      $i =$  losowy indeks zadania z  $\{1, \dots, n\}$ 
28:      $j =$  losowy indeks zadania z  $\{1, \dots, n\}$ 
29:      $S'_t = PMX(ParentXX.S_t, ParentXY.S_t, i, j)$ 
30:   end for
31: Bazując na uzyskanym harmonogramie eksploatacji uzyskanym dla  $S'$ 
   oblicz wartość kryterium  $Q' = Q(S')$ 
32: Przypisz  $Offspring[idx].S = S'$  and  $Offspring[index].Q = Q'$ 
33: end for
34: Selekcja:
35: Population = Wybierz PopulationSize najlepszych elementów
   ze zbioru  $\{Population \cup Offspring\}$ 
   uporządkowanych według nierosnących wartości  $Q$ 
36: if  $Q^* > Population[1].Q$  then
37:    $Q^* = Population[1].Q$  and  $S^* = Population[1].S$ 
38: end if
39: end while
40: Harmonogram  $S^* = (S^*_1, \dots, S^*_T)$  jest otrzymanym rozwiązaniem
   z wartością kryterium  $Q^* = Q(S^*)$ 

```

---

Proponowana metoda (Algorytm 7) nawiązuje do idei algorytmów genetycznych pierwotnie zapoczątkowanych w [60], ale nie jest ich bezpośrednią implementacją. Opiera się na zbiorze rozwiązań populacji o nazwie  $Population = \{\dots, (S, Q), \dots\}$  o rozmiarze  $PopulationSize$ . W proponowanym algorytmie, każdy element  $S$  populacji początkowej jest konstruowany na podstawie początkowego harmonogramu  $S^*$  przez  $n$  operacji zamiany zadań dla każdego okresu  $t = 1, \dots, T$  (zobacz kroki 4–17 Algorytmu 7). W każdej iteracji (kroki 18–38), generowany jest zbiór rozwiązań potomstwa  $Offspring$  o rozmiarze  $OffspringSize$ . Mianowicie,  $2 \cdot OffspringSize$  rozwiązania ze zbioru  $Population$  są wybierane losowo do zbioru puli rodziców  $ParentPool$  (krok 20). Następnie, są one dzielone sukcesywnie na pary  $OffspringSize$ . Na tej podstawie, generowane są elementy z każdej pary zwanej  $ParentXX$  i  $ParentXY$  stanowiące nowe rozwiązanie, które zostało dodane do zbioru potomstwa  $Offspring$  (kroki 24–34). Ponieważ harmonogram  $S$  składa się z permutacji  $S_t$  dla  $t = 1, \dots, T$ , to stosujemy dobrze znane krzyżowanie typu PMX (ang. *Partially Matched Crossover*, krzyżowanie z częściowym odwzorowaniem), będące odmianą krzyżowania dwupunktowego (krok 30). Metoda ta dla każdej pary rozwiązań oznaczonych jako  $ParentXX.S_t$  i  $ParentXY.S_t$  (dla losowego  $t$ ) oraz punktów przecięcia  $i$  i  $j$  zwraca dwóch osobników/potomków (permutacje). W niniejszej implementacji, wybieramy tylko jedną z nich do zbioru potomków  $Offspring$ . Ponadto, nie zmienione  $S'_t \in S'$  są oparte na  $ParentXX$  (krok 25). Jednakże, z powodu randomizacji, wybór konkretnego rodzica jako bazy nie jest istotny. Liczba krzyżujących się harmonogramów  $S'_t$  dla różnych losowych  $t$  jest określony przez parametr  $MixSize$  (kroki 26–31). Jego celem jest zwiększyć dywersyfikację nowego rozwiązania w odniesieniu do  $ParentXX$  i  $ParentXY$ .

Nowa populacja jest oparta na elementach  $PopulationSize$  o najlepszych wartościach kryterialnych  $Q$  z obu zbiorów  $Population$  i  $Offspring$ . Złożoność obliczeniowa pojedynczej iteracji GA wynosi  $O(OffspringSize(MKn + MixSize \cdot |PMX|) + N \log N)$ , gdzie  $N = PopulationSize + OffspringSize$  i  $|PMX|$  jest złożonością obliczeniową implementacji PMX.

## Rozdział 4

# Eksperymenty obliczeniowe dla modeli decyzyjnych

W tej części dysertacji dokonano analizy efektywności algorytmów dokładnych i przybliżonych, przeznaczonych dla modeli decyzyjnych rozpatrywanego problemu. Zaproponowane modele decyzyjne opisane w Rozdziale 3, wspomagają planowanie eksploatacji taboru kolejowego przy uwzględnieniu przeglądów i napraw okresowych, natomiast ich skuteczność została zbadana na podstawie wybranych studium przypadku (ang. *case study*) prezentowanych w Rozdziale 4. Każde studium przypadku to opis rzeczywistych parametrów i zdarzeń determinujących proces planowania eksploatacji taboru kolejowego w przedsiębiorstwie transportu kolejowego. Główną inspiracją dla analizowanych przypadków była obserwacja rzeczywistych zdarzeń w przedsiębiorstwie, które obecnie jest liderem wynajmu lokomotyw elektrycznych i spalinowych oraz elektrycznych zespołów trakcyjnych w Polsce<sup>1</sup>. Ponadto źródłem zebranych danych była również literatura przedmiotu i prezentowane w niej analizy przypadku. Na początku w Rozdziale 4.1 określono wersję ogólną danych wejściowych rozważanych instancji problemu, ustawień dla algorytmów oraz sposobu oceny modeli decyzyjnych. Rozdział 4.2 zawiera rezultaty analizy eksperymentalnej przeprowadzonej dla metod dokładnych, tj. BF i B&B. Prócz weryfikacji generowania rozwiązań optymalnych dla małych rozmiarów instancji, zbadano czas dostarczanych wyników przez algorytmy dokładne w odniesieniu do rozmiaru danych wejściowych problemu. Dalej w Rozdziale 4.3 przeprowadzono na podstawie błędu względnego, ocenę rozwiązań dla małych instancji, dostarczanych przez metody przybliżone tj. BH, BM2MH, NEH, SA60, SA600, GA60, GA600. Następnie dla tych algorytmów przeprowadzono eksperymenty numeryczne dla dużych rozmiarów instancji problemu, odzwierciedlających rzeczywiste warunki procesów decyzyjnych w przedsiębiorstwie transportowym. W ostatnim Rozdziale 4.4, ustalono ranking najlepszych algorytmów przybliżonych dla dotychczas badanych grup instancji. Tę część pracy zamyka podsumowanie uzyskanych wyników oraz związane z nimi rekomendacje, dotyczące sposobu postępowania w procesie rozwiązywania problemu planowania eksploatacji taboru kolejowego przy uwzględnieniu wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych tegoż taboru.

---

<sup>1</sup> Ze względu na regulacje dotyczące ujawniania informacji, rzeczywiste dane udostępnione przez firmę w ramach współpracy zostały zmodyfikowane w pewnym zakresie i odpowiednio przygotowane dla celów badawczych (m.in. zawężono zakres danych, odrzucono specyficzne przypadki).

## 4.1. Opis eksperymentów

Eksperymenty obliczeniowe przeprowadzono dla różnych sytuacji decyzyjnych związanych z eksploatacją taboru kolejowego w przedsiębiorstwie kolejowym (patrz Rozdział 4.2 i 4.3). W ramach analizowanego studium przypadku, rozważano trzy rodzaje lokomotyw (typów i serii). Pierwszy z nich dotyczy lokomotyw elektrycznych Škoda 31E (seria 181) wyprodukowanych w latach 1963-1965 (Rysunek 4.1). Pojazdy te nadal są eksploatowane przez czeskich i słowackich przewoźników, w Polsce przede wszystkim w prywatnym sektorze [137]. Druga grupa obejmuje lokomotywy E6ACTa Dragon 2 produkowane od 2018 roku przez polską firmę NEWAG [88](Rysunek 4.2). Ostatnia grupa pojazdów to Pesa Gama typu 111Ed (Rysunek 4.3), konstruowane w zakładach Pesa Bydgoszcz od 2012 roku [99]. Zarówno E6ACTa Dragon 2 i Pesa Gama typu 111Ed używane są przez polskich przewoźników towarowych [180, 181].



Rysunek 4.1: Lokomotywa Škoda 31E seria 181 [70]



Rysunek 4.2: Lokomotywa E6ACTa Dragon 2 [102]

Cykl przeglądowo-naprawczy oraz czas trwania czynności konserwacyjnych dla poszczególnych typów lokomotyw przedstawiono w Tabelach 4.1, 4.2 i 4.3. Przypomnijmy,



Rysunek 4.3: Lokomotywa Pesa Gama typu 111Ed [171]

że dla danego poziomu  $k$  i rodziny  $f$  określony  $TBM_k^f$  (resurs czasowy) i  $DBM_k^f$  (resurs kilometrowy) jest definiowany w DSU rodziny pojazdów (typ i seria), natomiast  $MA_k^f$  (czas wykonania przeglądów) jest ustalony przez warsztaty naprawcze na podstawie średnich czasów usług przeglądowo – naprawczych.

Tabela 4.1: Przykładowy cykl przeglądowo-naprawczy i czas trwania czynności konserwacyjnych dla Škoda 31E (seria 181)

Poziom $k$	$TBM_k^f$	$DBM_k^f$	$MA_k^f$
1	14 dni	2,500 km	3 godz.
2	110 dni	20,000 km	2 dni
3	32 mies.	220,000 km	21 dni
4	8 lat	606,000 km	74 dni
5	16 lat	1,200,000 km	84 dni

Tabela 4.2: Przykładowy cykl przeglądowo-naprawczy i czas trwania czynności konserwacyjnych dla E6ACTa Dragon 2

Poziom $k$	$TBM_k^f$	$DBM_k^f$	$MA_k^f$
1	3 mies.	30,000 km	3 godz.
2	1 rok	150,000 km	2 dni
3	4 lat	660,000 km	21 dni
4	8 lat	1,220,000 km	74 dni
5	32 lata	4,800,000 km	84 dni

Można zauważyć, że ze względu na lukę technologiczną rozpatrywanych lokomotyw i efekt ich starzenia, przeglądy oparte na czasie i odległości dla Skody 31E są znacznie krótsze niż dla Dragon 2 i Pesa 111Ed. Ponadto podczas eksperymentów zakładamy (zgodnie z praktyką przemysłową), że przeglądy od poziomu  $k3$  (duże prace rutynowe) muszą rozpocząć się o jeden dzień wcześniej niż wynika to z  $TBM_k^f$ . Takie podejście ma zagwa-

Tabela 4.3: Przykładowy cykl przeglądowo-naprawczy i czas trwania czynności konserwacyjnych dla Pesa Gama 111Ed

Poziom $k$	$TBM_k^f$	$DBM_k^f$	$MA_k^f$
1	3 mies.	30,000 km	3 godz.
2	1 rok	130,000 km	2 dni
3	6 lat	1,200,000 km	21 dni
4	12 lat	2,450,000 km	74 dni
5	24 lata	4,800,000 km	84 dni

rantować, że każdy pojazd dotrze do warsztatu na czas i nie przekroczy wyznaczonych terminów wykonania przeglądów okresowych.

W analizowanych przypadkach zakładamy, że symulacje rozpoczną się 1.01.2020 roku. Pojazdy przeszły właśnie przegląd okresowy  $k = 5$  (np. Škoda 31E) lub są nowo wyprodukowane i dopuszczone do eksploatacji (np. Dragon 2, Pesa 111Ed), a przebieg każdej z nich wynosi 0 km na wszystkich poziomach, tj.  $VT_{v,k} = 0$  i  $VD_{v,k} = 0$  dla  $v = 1, \dots, n$  i  $k = 1, \dots, K$  dla okresu  $t = 1$ . Lokomotywy w rozpatrywanych przypadkach mają  $K = 5$ .

Ocena modeli decyzyjnych przeprowadzono na podstawie wartości kryterium (tj. całkowitej dostępności pojazdów w dniach –  $Q(S)$ ) oraz czasu potrzebnego do uzyskania rozwiązania. Pozytywnie oceniono metody, szczególnie dla dużych instancji problemu, które w relatywnie krótkim czasie, akceptowalnym przez decydenta, znajdowały harmonogram  $S$ , gdzie dostępność taboru w dniach była najwyższa. Akceptowalny czas obliczeń z perspektywy praktycznej, oznacza czas trwania obliczeń w zakresie od kilku sekund do kilkudziesięciu godzin, nie dziesiątki lat. W zależności od stawianych wymagań przez decydenta, ustalane są maksymalne czasy znajdowania określonych harmonogramów. Przykładowo, po konsultacji z decydem, maksymalne czasy generowania planów dla 20-letniego planu dotyczącego 50 pojazdów różnego typu to 60 minut, ponieważ niniejszy plan musi być gotowy na kolejny dzień (np. w związku z podpisaniem umowy dzierżawy pojazdów, umowy dotyczącej realizacji zadań przewozowych). Natomiast w przypadku, gdy decydent ma kilka dni na podjęcie decyzji, związanej z planem eksploatacji (takiej samej floty oraz horyzontu czasowego), maksymalny czas oczekiwania na rozwiązanie może wynosić 3 dni. Otrzymane rozwiązania dla  $Q(S)$  zaokrąglono do liczb całkowitych i jest wyrażona w dniach.

Modele decyzyjne oparte o algorytmy przybliżone (Rozdział 3.5) zbadano również w odniesieniu do ustalonego przydziału zadań do pojazdów (FA) w każdym okresie  $t \in \{1, \dots, T\}$  w następujący sposób:  $\Delta(A) = Q(S^A) - Q(S^{FA})$ , gdzie  $Q(S^A)$  to wartości kryterium dla harmonogramu dostarczonego przez algorytm  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  oraz  $Q(S^{FA})$  to stałe przypisanie zadań bez optymalizacji tj. FA. Ponadto każdy z algorytmów metaheurystycznych tj. SA i GA, był uruchamiany

10 razy i wybrano dla nich uśrednione wartości kryteriów. W związku z tym, że heurystyki BH, BM2MH, NEH są deterministyczne, czyli w swoim działaniu nie zawierają żadnego elementu losowości, dlatego też niezależnie od liczby symulacji planów, rozwiązania dla tej samej instancji pozostają bez zmian.

Ustawienia dla metod metaheurystycznych, dla wszystkich rozpatrywanych przypadków, były następujące:

- Algorytm symulowanego wyżarzania, wersja:
  - SA60:  $Temp = 1000000$ ,  $\alpha = 0.01$ ,  $warunek\_zatrzymania = 60s$ ;
  - SA600:  $Temp = 1000000$ ,  $\alpha = 0.01$ ,  $warunek\_zatrzymania = 600s$ ;
- Algorytm genetyczny, wersja:
  - GA60:  $PopulationSize = 200$ ,  $OffspringSize = 50$ ,  $MixSize = 0.2T$ ,  $warunek\_zatrzymania = 60s$ ;
  - GA600:  $PopulationSize = 200$ ,  $OffspringSize = 50$ ,  $MixSize = 0.2T$ ,  $warunek\_zatrzymania = 600s$ .

Zarówno algorytmy dokładne tj. przegląd zupełny, metoda podziału i ograniczeń (Rozdział 3.4.1, 3.4.2) oraz algorytmy przybliżone (Rozdział 3.5) zostały napisane w C# (VS 2019)<sup>2</sup>. Wszystkie symulacje przeprowadzono na komputerze PC z systemem Windows 10 CPU Intel<sup>®</sup> Core<sup>™</sup>i9-7960X 2.80GHz i 32GB RAM.

## 4.2. Badanie metod dokładnych

Na początkowym etapie analizy rozważanego problemu, zaprojektowano metody dokładne. Wiedząc, że problem jest trudny obliczeniowo, wątpliwe jest znalezienie wielomianowych lub nawet pseudowielomianowych rozwiązań. Jednakże w celu zbadania praktycznej przydatności zaprojektowanych algorytmów dokładnych i wskazania możliwości obliczeniowych tychże metod przeprowadzono następujące eksperymenty numeryczne.

Wpierw przetestowano algorytmy przeglądu zupełnego (BF) oraz podziału i ograniczeń (B&B), opisane w Rozdziale 3.4, dla małych instancji problemu (teoretycznych, rzadko spotykanych w rzeczywistości). Eksperymenty zostały przeprowadzone zarówno dla zbiorów taboru homogenicznego (jednego typu lokomotyw) oraz heterogenicznego (różnych typów lokomotyw) bazujących na pojazdach Škoda 31E (seria 181), E6ACTa Dragon 2 oraz Pesa Gama typu 111Ed (patrz Rozdział 4.1). Rozważano dwie grupy zadań przewozowych  $j \in J$ , dla których założono następujące średnie dzienne przebiegi  $w_j \in \{400, 800, 1200\}$  km dla  $n = 3$  oraz  $w_j \in \{500, 700, 900, 1100\}$  km dla  $n = 4$ . Niniejsze

---

<sup>2</sup> Prace programistyczne, polegające na implementacji zaprojektowanych przez autora niniejszej rozprawy algorytmów oraz wizualizacji wyników w narzędziu do symulacji, zlecono i sfinansowano w ramach dwóch projektów MNiSW „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” – Interekon, zrealizowanych na Uniwersytecie Ekonomicznym we Wrocławiu w latach 2019-2021.

zadania odnoszą się do średnich przebiegów na miesiąc (tj. 30 dni) które wynoszą kolejno, dla  $n = 3$  tj.  $\{12000, 24000, 36000\}$  km, dla  $n = 4$  tj.  $\{15000, 21000, 27000, 33000\}$  km. Dla zbadania jakości i czasów dostarczanych rozwiązań przez algorytm BF oraz B&B zaproponowano następujące instancje:

- **I1** tabor homogeniczny, lokomotywy Škoda 31E (seria 181),  $n = 3$ ,  $T \in \{9, \dots, 12\}$ ,  $w_j \in \{400, 800, 1200\}$  km;
- **I2** tabor homogeniczny, lokomotywy Škoda 31E (seria 181),  $n = 4$ ,  $T \in \{5, \dots, 7\}$ ,  $w_j \in \{500, 700, 900, 1100\}$  km;
- **I3** tabor homogeniczny, lokomotywy E6ACTa Dragon 2,  $n = 3$ ,  $T \in \{9, \dots, 12\}$ ,  $w_j \in \{400, 800, 1200\}$  km;
- **I4** tabor homogeniczny, lokomotywy E6ACTa Dragon 2,  $n = 4$ ,  $T \in \{5, \dots, 7\}$ ,  $w_j \in \{500, 700, 900, 1100\}$  km;
- **I5** tabor homogeniczny, lokomotywy Pesa Gama typu 111Ed,  $n = 3$ ,  $T \in \{9, \dots, 12\}$ ,  $w_j \in \{400, 800, 1200\}$  km;
- **I6** tabor homogeniczny, lokomotywy Pesa Gama typu 111Ed,  $n = 4$ ,  $T \in \{5, \dots, 7\}$ ,  $w_j \in \{500, 700, 900, 1100\}$  km;
- **I7** tabor heterogeniczny, lokomotywy Škoda 31E (seria 181), E6ACTa Dragon 2, Pesa Gama typu 111Ed,  $n = 3$ ,  $T \in \{9, \dots, 12\}$ ,  $w_j \in \{400, 800, 1200\}$  km;
- **I8** tabor heterogeniczny, dwie lokomotywy Škoda 31E (seria 181), po jednej lokomotywie E6ACTa Dragon 2 i Pesa Gama typu 111Ed,  $n = 4$ ,  $T \in \{5, \dots, 9\}$ ,  $w_j \in \{500, 700, 900, 1100\}$  km;
- **I9** tabor heterogeniczny, dwie lokomotywy E6ACTa Dragon 2, po jednej lokomotywie Škoda 31E (seria 181) i Pesa Gama typu 111Ed,  $n = 4$ ,  $T \in \{5, \dots, 9\}$ ,  $w_j \in \{500, 700, 900, 1100\}$  km;
- **I10** tabor heterogeniczny, dwie lokomotywy Pesa Gama typu 111Ed, po jednej lokomotywie Škoda 31E (seria 181) i E6ACTa Dragon 2,  $n = 4$ ,  $T \in \{5, \dots, 9\}$ ,  $w_j \in \{500, 700, 900, 1100\}$  km.

Przypomnijmy, że czas obliczeń algorytmu BF jest uzależniony od rozmiaru instancji i obliczania wartości kryterium. To oznacza, że im krótsze cykle przeglądowo – naprawcze rozpatrywanego pojazdu, tym dłużej będzie działać niniejsza metoda. Natomiast działanie B&B jest również determinowane przez te same parametry co BF, z tą różnicą, że jest ograniczana przestrzeń rozwiązań znacznie skracając czas obliczeń wspomnianej metody (patrz Rozdział 3.4). Wyniki przeprowadzonych eksperymentów przedstawiono w Tabelach 4.4, 4.5, 4.6, 4.7<sup>3</sup>.

Podstawowym wnioskiem płynącym z analizy eksperymentalnej jest to, że algorytm B&B dostarcza rozwiązania w znacznie krótszym czasie niż algorytm BF. Przyspieszenie

<sup>3</sup> Mając na uwadze zmienną wydajność środowiska systemu operacyjnego, w którym są przeprowadzane eksperymenty numeryczne, dla precyzyjnego określenia podano średnie czasy trwania obliczeń.



B&B jest widoczne dla każdej rozpatrywanej instancji, a narzuty czasowe rosną wraz ze wzrostem liczby lokomotyw i zadań oraz okresów, czyli de facto wzrostem rozmiaru przestrzeni rozwiązań problemu –  $\mathbb{S}$ .

Tabela 4.4: Średni czas trwania obliczeń algorytmów przeglądu zupełnego (BF) oraz podziału i ograniczeń (B&B) dla lokomotywy Škoda 31E

$n$	$T$	$ \mathbb{S} $	Algorytm				Przyspieszenie B&B	Wartość kryterium $Q^*$ [dni]
			BF		B&B			
			Czas [s]	Czas [h]	Czas [s]	Czas [h]		
I1								
3	9	10 077 696	794	0.22	757	0.21	1.0	738
	10	60 466 176	5 130	1.43	1 654	0.46	3.1	822
	11	362 797 056	33 187	9.22	8 188	2.27	4.1	885
	12	2 176 782 336	216 744	60.21	10 588	2.94	26.5	967
I2								
4	5	7 962 624	465	0.13	403	0.11	1.2	545
	6	191 102 976	12 660	3.52	7 349	2.04	1.7	652
	7	4 586 471 424	347 258	96.46	127 174	35.33	2.7	763

Analizując czasy dla taboru homogenicznego (patrz Tabela 4.4, 4.5, 4.6), najdłuższe działanie algorytmów BF i B&B odnotowano dla pojazdów Škoda 31E (seria 181)<sup>4</sup>. Wynika to z krótszych cykli przeglądowo – naprawczych tej lokomotywy (patrz Tabela 4.1), czego implikacją jest więcej planowanych przeglądów w porównaniu z innymi rozpatrywanymi pojazdami. Wskazuje na to również dostępność serii 181, czyli wartość kryterium  $Q$ , która dla takiego samego rozmiaru instancji jest zawsze najmniejsza w porównaniu z dostępnością dla lokomotyw Dragon 2 oraz Pesa Gama. Przykładem może być instancja dla czterech lokomotyw i 5-cio miesięcznego harmonogramu, gdzie dostępność dla lokomotyw Škoda wynosi 545 dni, natomiast dla pojazdów zarówno Dragon i Pesa jest o 61 dni większa.

Dalej rozpatrując wyniki dla taboru jednego typu (Tabela 4.4, 4.5, 4.6), największe przyspieszenie dla B&B w porównaniu do BF zaobserwowano dla Instancji 3 oraz 6, które dotyczą kolejno lokomotyw E6ACTa Dragon 2 i Pesa Gama typu 111Ed. Oznacza to, że dla wybranych przypadków (tj. I3, I6) algorytm B&B skuteczniej ogranicza przestrzeń rozwiązań. Możliwości eliminacji przeszukiwanych podzbiorów w głównej mierze zależą od wartości parametrów danych wejściowych m.in. liczby zadań  $j$ , średnich przebiegów zadań -  $w_j$ , cykli przeglądowo-naprawczych lokomotyw. W związku z tym dla Instancji 3, gdzie  $n = 3$  dla lokomotyw Dragon i 10-cio miesięcznego harmonogramu, przyspieszenie generowanego rozwiązania przez B&B jest o 256.7 razy szybsze niż dla metody BF. Nato-

<sup>4</sup> Spośród rozpatrywanych pojazdów (patrz Rozdział 4.1), to Škoda ma najkrótsze cykle przeglądowo – naprawcze. Dlatego też można przewidywać, że dla takich samych zestawów danych wejściowych, w planie eksploatacji lokomotywy 31E pojawi się najwięcej przeglądów. Czego efektem będą dłuższe czasy symulacji wszystkich harmonogramów, niż dla lokomotywy Dragon 2 czy Pesa Gama. Podobny wniosek będzie również w pozostałych analizach, jedynie wyjątek stanowią algorytmy metaheurystyczne, które mają ustalone czasy działania.

Tabela 4.5: Średni czas trwania obliczeń algorytmów przeglądu zupełnego (BF) oraz podziału i ograniczeń (B&B) dla lokomotywy E6ACTa Dragon 2; symbol < 0.01 oznacza wartość poniżej najmniejszej wskazanej jednostki czasu

n	T	S	Algorytm				Przyspieszenie B&B	Wartość kryterium Q* [dni]
			BF		B&B			
			Czas [s]	Czas [h]	Czas [s]	Czas [h]		
I3								
3	9	10 077 696	294	0.08	5	< 0.01	56.7	816
	10	60 466 176	1 946	0.54	8	< 0.01	256.7	909
	11	362 797 056	12 135	3.37	87	0.02	139.4	996
	12	2 176 782 336	82 008	22.78	1 212	0.34	67.7	1089
I4								
4	5	7 962 624	197	0.05	24	0.01	8.3	606
	6	191 102 976	5 200	1.44	124	0.03	42.0	726
	7	4 586 471 424	136 870	38.02	410	0.11	334.0	848

Tabela 4.6: Średni czas trwania obliczeń algorytmów przeglądu zupełnego (BF) oraz podziału i ograniczeń (B&B) dla lokomotywy Pesa Gama typu 111Ed; symbol < 0.01 oznacza wartość poniżej najmniejszej wskazanej jednostki czasu

n	T	S	Algorytm				Przyspieszenie B&B	Wartość kryterium Q* [dni]
			BF		B&B			
			Czas [s]	Czas [h]	Czas [s]	Czas [h]		
I5								
3	9	10 077 696	305	0.08	64	0.02	4.8	814
	10	60 466 176	1 892	0.53	531	0.15	3.6	906
	11	362 797 056	12 243	3.40	4 028	1.12	3.0	994
	12	2 176 782 336	77 474	21.52	7 578	2.10	10.2	1087
I6								
4	5	7 962 624	200	0.06	17	< 0.01	11.6	606
	6	191 102 976	5 379	1.49	47	0.01	114.1	724
	7	4 586 471 424	143 729	39.92	79	0.02	1 814.4	845

miast dla tego samego rozmiaru instancji, ale dla lokomotywy Pesa Gama (Instancja 5), przyspieszanie B&B w porównaniu do BF wynosi jedynie 3.6 razy. Warto zwrócić uwagę, że dla tych dwóch instancji (tj. I3, I5) czas działania metody BF jest porównywalny, różnica dotyczy 54 sekundy. Jest to spowodowane zbliżonymi wartościami dotyczącymi cykli przeglądowych dla obydwu lokomotyw. Świadczy o tym również ich dostępność (czyli wartość kryterium Q) dla analizowanych scenariuszy, która dla Dragon 2 jest o 3 dni dłuższa niż dla lokomotywy Pesa Gama. Kolejnym przykładem może być Instancja 6, dla 7-mio miesięcznego harmonogramu eksploatacji czterech lokomotyw Pesa ( $n = 4$ ), gdzie otrzymano o 1 814.4 razy szybciej rozwiązanie generowane przez metodę B&B niż przez BF. Dla takiego samego rozmiaru instancji dla pojazdu Dragon 2 (Instancja 4), B&B zadziałał 334 razy szybciej niż BF. Różnica w dostępności lokomotyw Dragon znowu wynosiła o 3 dni więcej, niż dla Pesa. Można zauważyć, że nawet niewielka zmiana

Tabela 4.7: Średni czas trwania obliczeń algorytmów przeglądu zupełnego (BF) oraz podziału i ograniczeń (B&B) dla heterogenicznego taboru; symbol  $< 0.01$  oznacza wartość poniżej najmniejszej wskazanej jednostki czasu

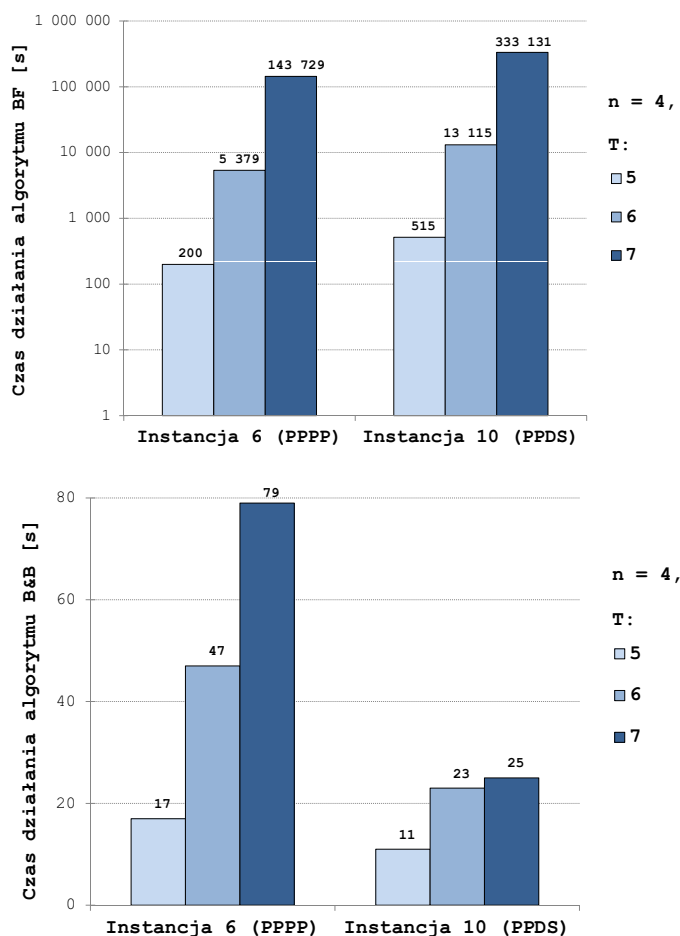
n	T	S	Algorytm				Przyspieszenie B&B	Wartość kryterium $Q^*$ [dni]
			BF		B&B			
			Czas [s]	Czas [h]	Czas [s]	Czas [h]		
I7								
3	9	10 077 696	877	0.24	1	$< 0.01$	1 004.2	800
	10	60 466 176	5 698	1.58	1	$< 0.01$	5 646.9	891
	11	362 797 056	36 540	10.15	3	$< 0.01$	10 986.1	978
	12	2 176 782 336	231 533	64.31	5	$< 0.01$	50 454.0	1068
I8								
4	5	7 962 624	557	0.15	12	$< 0.01$	45.3	582
	6	191 102 976	13 795	3.83	48	0.01	288.4	694
	7	4 586 471 424	368 925	102.48	111	0.03	3 313.5	812
	8	110 075 314 176	-	-	139	0.04	-	932
	9	2 641 807 540 224	-	-	1 869	0.52	-	1 046
I9								
4	5	7 962 624	518	0.14	10	$< 0.01$	51.3	597
	6	191 102 976	13 268	3.69	21	0.01	627.1	713
	7	4 586 471 424	339 053	94.18	30	0.01	8 309.1	832
	8	110 075 314 176	-	-	41	0.01	-	953
	9	2 641 807 540 224	-	-	266	0.07	-	1 070
I10								
4	5	7 962 624	515	0.14	11	$< 0.01$	47.7	597
	6	191 102 976	13 115	3.64	23	0.01	568.9	711
	7	4 586 471 424	333 131	92.54	25	0.01	13 301.8	832
	8	110 075 314 176	-	-	45	0.01	-	953
	9	2 641 807 540 224	-	-	333	0.09	-	1 070

wartości jednego z parametrów wejściowych, w wymienionych przypadkach były to cykle przeglądowo-naprawcze lokomotyw, determinującą dużą różnicę w działaniu B&B.

Rozważając przypadek trzech pojazdów i zadań przewozowych (tj. I1, I3, I5, I7), najdłuższe działanie algorytmu BF odnotowano dla floty heterogenicznej, a nie jak oczekiwano, dla taboru złożonego wyłącznie z lokomotyw Škoda 31E (patrz Tabela 4.4, 4.5, 4.6, 4.7). Spośród wymienionych instancji, metoda B&B działa również najkrócej dla zbioru różnego typu lokomotyw tj. I7. Czasy generowania rozwiązań dla tego rodzaju floty to zaledwie kilka sekund, co sprawia że B&B dla  $n = 3$  ma największe przyspieszenia w porównaniu z działaniem BF. Potwierdzeniem może być roczny harmonogram, gdzie zamiast 64.31 godzin przy użyciu BF, B&B generuje wynik w ciągu 5 sekund. Dla tego samego rozmiaru instancji, ale dla floty homogenicznej (dla której osiągnięto najkrótsze czasy w tym przypadku) złożonej z lokomotyw Dragon 2 (I3), na plan eksploatacji taboru musimy poczekać 0.34 godziny. Tempo zmiany czasów działania zarówno BF oraz B&B w zależności od rozpatrywanego  $T$ , dla I1, I3, I5, I7, uzasadnia weryfikację metod dokładnych dla małych instancji problemu. Na przykład analizując generowanie rozwiązań dla rozpatrywanych harmonogramów, gdzie  $T = 11$  i  $T = 12$ , różnica w czasach dla BF jest ponad 6-cio krotna.

To oznacza, że zwiększenie horyzontu czasowego planowanej eksploatacji trzech pojazdów z jedenastu na dwanaście miesięcy, implikuje wydłużenie się oczekiwania na rozwiązanie przy zastosowaniu BF o co najmniej sześć razy. Dla algorytmu B&B tempo zmiany czasów względem kolejnych, nowych okresów początkowo jest na niskim poziomie (nieco powyżej wartości 1.2), a dla taboru heterogenicznego różnica w czasach dla wybranych przypadków jest wręcz niezauważalna. Przede wszystkim wynika to z dużych przyspieszeń działania tej metody dla pierwszych rozpatrywanych okresów, szczególnie dla zróżnicowanej floty. Dodatkowo, tempo wzrostu rozmiaru przestrzeni rozwiązań problemu w dużej mierze determinuje tempo zmiany czasu działania B&B. Dlatego też, dla kolejnych przypadków, im większe różnice między przestrzenią rozwiązań tj.  $S$ , tym działanie B&B jest coraz dłuższe. Jednocześnie zwrócono uwagę na bardzo dużą czułość tej metody na wielkość danych. Przykładem, może być brak wyników dla harmonogramu  $T = 13$ . Ponieważ czas oczekiwania na rozwiązanie generowane przez B&B dla floty homogenicznej trwało tak długo (ponad kilkadziesiąt godzin), że zrezygnowano z dalszych eksperymentów numerycznych w tym zakresie. Mając na uwadze, że w niniejszych obliczeniach rozpatrywano jedynie 3 pojazdy, stosując metody BF i B&B otrzymano rozwiązania w akceptowalnym dla decydenta czasie, w postaci planów eksploatacji floty kolejowej, maksymalnie dla rocznego harmonogramu.

Wyniki dotyczące czasów działania BF i B&B prezentowane dla czterech pojazdów i zadań przewozowych (tj. I2, I4, I6, I8, I9, I10), nasuwają podobne wnioski jak dla floty  $n = 3$  (Tabela 4.4, 4.5, 4.6, 4.7). Zatem, czas oczekiwania na rozwiązanie dla  $n = 4$ , przy zastosowaniu metody BF jest najdłuższy i zarazem przy użyciu B&B najkrótszy, dla heterogenicznego taboru (tj. I8, I9, I10). Czego efektem jest również największe przyspieszenie działania B&B, w odniesieniu do BF (patrz Tabela 4.7). Analizując grupy pojazdów homogenicznych i heterogenicznych, porównujemy ze sobą następujące pary instancji: I2 i I8; I4 i I9; I6 i I10. Niniejsze zestawienie wynika z dominującego typu floty w określonej instancji, przy czym jedna instancja dotyczy floty jednego typu, a druga jest zróżnicowana w swoim składzie. Rozważając różnicę w przyspieszeniu działania algorytmu B&B w odniesieniu do BF, w zależności od składu lokomotyw, przeanalizujemy Rysunek 4.4. Zaprezentowane wykresy dotyczą czasów działania BF i B&B dla I6 oraz I10, przy czym wyniki dla BF przedstawiono w skali logarymicznej. Na niniejszym porównaniu widać, jak algorytm B&B przyspiesza swoje działanie dla zróżnicowanej floty, mimo to że przy zastosowaniu BF czasy były bardzo długie dla tej instancji, znacznie dłuższe niż dla składów homogenicznych. Przyspieszenie działania B&B względem BF, dla rozpatrywanych harmonogramów  $T = \{5, 6, 7\}$  jest kolejno ponad 4, 5 i 7-krotnie wyższe dla heterogenicznego składu (I10) niż homogenicznego (I6). Warto zwrócić uwagę, że B&B działał najkrócej dla wybranej instancji I6, spośród floty homogenicznej tj. czterech pojazdów Pesa Gama typu 111Ed. Jednakże mimo to, algorytm B&B skuteczniej ogranicza przestrzeń rozwiązań dla

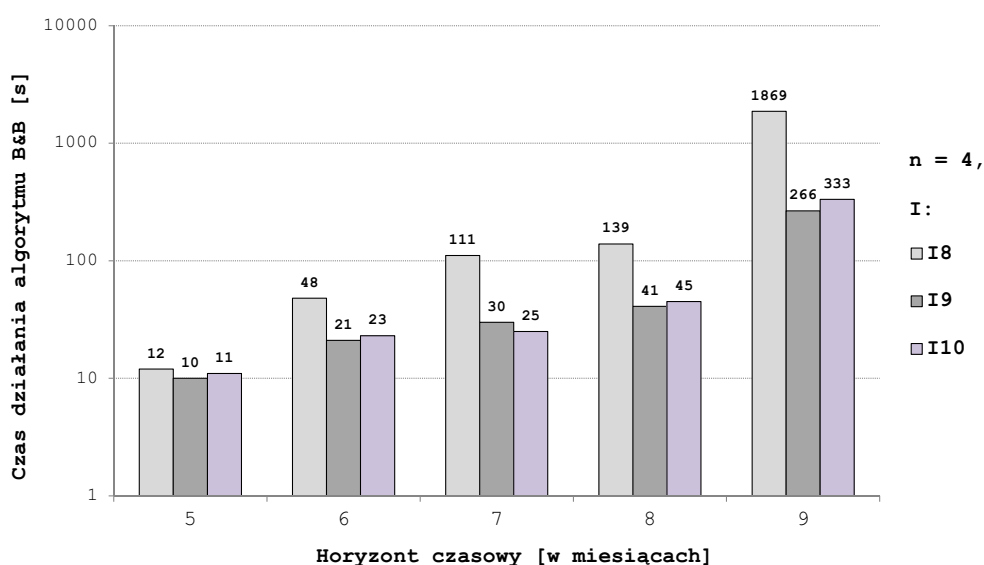


Rysunek 4.4: Średni czas trwania obliczeń (w sekundach) algorytmu BF oraz B&B dla instancji I6 (cztery lokomotywy Pesa Gama typu 111Ed – oznaczono jako P) oraz I10 (dwie lokomotywy Pesa Gama typu 111Ed – P, po jednej lokomotywie Škoda 31E seria 181 – S i E6ACTa Dragon 2 – D)

floty heterogenicznej. W tym przypadku złożonej z dwóch lokomotyw Pesa Gama typu 111Ed, po jednej lokomotywie Škoda 31E (seria 181) i E6ACTa Dragon 2.

Podobne wnioski, wynikają z porównania I2 i I8 oraz I4 i I9. Analizując tempo zmiany czasów dla obydwu metod, jest ono znacznie wyższe, w odniesieniu do  $n = 3$ . Rozpatrując harmonogram dla sześciu i siedmiu miesięcy, gdzie  $n = 4$ , czas oczekiwania na rozwiązanie przy zastosowaniu BF wydłuża się o co najmniej 25 razy. Na przykład dla lokomotyw Škoda (I2) plan eksploatacji dla  $T = 6$  jest generowany w 3.52 godziny, natomiast dla  $T = 7$ , należy odczekać 96.46 godzin. Dla taboru heterogenicznego, instancji I8, te czasy są jeszcze dłuższe, wynoszą kolejno 3.83 i 102.48 godzin. W ramach badanych instancji, najdłuższy czas dla B&B odnotowano dla 7-mio miesięcznego harmonogramu dla pojazdów Škoda 31E (I2), który wynosił 35.33 godziny. Natomiast dla odpowiadającej temu przypadkowi instancji I8, czas ten skraca się do 0.03 godziny. Krótsze czasy działania B&B dla zróżnicowanych składów pojazdów, pozwoliło na dokonanie eksperymentów

obliczeniowych dla dłuższych horyzontów czasowych. Warto zwrócić uwagę, że dla floty heterogenicznej z jeszcze dłuższym horyzontem czasowym, tj.  $T = 9$ , B&B generuje rozwiązanie w około 31 minut (tj. 0.52 godziny). Kolejnym potwierdzeniem, iż tempo wzrostu rozmiaru przestrzeni rozwiązań determinuje tempo zmiany czasu działania B&B, jest I8, I9, I10 dla  $T = 8$  i  $T = 9$ . Dwudziestoczekrotny wzrost  $\mathbb{S}$  spowodował, że generowanie rozwiązań przy zastosowaniu B&B wydłuża się co najmniej siedmiokrotnie. Dodatkowym potwierdzeniem, dużej czułości metody B&B na wielkość danych, to brak wyników dla harmonogramu  $T = 10$ . Niestety bardzo długie oczekiwanie na rozwiązanie dostarczane przez ten algorytm (ponad kilkadziesiąt godzin), sprawiło że zrezygnowano z dalszych eksperymentów numerycznych. Dlatego też, maksymalny horyzont czasowy, gdzie  $n = 4$ , dla którego mogliśmy otrzymać optymalne wyniki to 9 miesięcy (patrz Tabela 4.7).



Rysunek 4.5: Średni czas trwania obliczeń (w sekundach) algorytmu B&B dla floty heterogenicznej i  $n = 4$ , tj. instancji I8, I9, I10

W związku z tym, że dotychczas odnotowano najkrótsze czasy dla działania algorytmu B&B, rozważmy instancje dla których te wyniki są relatywnie najlepsze (patrz Rysunek 4.5). Prezentowane przykłady dotyczą heterogenicznej floty,  $n=4$ , gdzie w I8, I9 i I10 przeważa w składzie kolejno Škoda, Dragon 2 i Pesa. Dlatego też, dłuższe czasy odnotowane dla instancji I8 są oczywiste, ponieważ dominuje tam Škoda. Na przykład, dla 7-mio miesięcznego harmonogramu należy odczekać 111 sekund na rozwiązanie optymalne. Jest to ponad trzykrotnie więcej, niż dla I9 i I10. Natomiast czas oczekiwania na wynik dla I8 jest co najmniej 5 razy dłuższy, dla 9-cio miesięcznego harmonogramu, niż dla pozostałych instancji. Jednakże, jest to niespełna godzina (0.52 h). Obliczenia dla instancji I9 i I10 są zbliżone, ponieważ cykle przeglądowo – naprawcze są podobne dla floty, która w tych składach przeważa tj. E6ACTa Dragon 2, Pesa Gama typu 111Ed. Mimo, że czas działania metody B&B dla analizowanych przypadków wynosi poniżej godziny, to dla 10-cio miesięcznego harmonogramu nie udało się osiągnąć rozwiązań, w czasie akceptowal-

nym przez decydenta. Warto podkreślić, że prezentowane instancje I8, I9 i I10, stanowią jak dotąd rozpatrywane przykłady o największych rozmiarach przestrzeni rozwiązań –  $\mathcal{S}$ . Natomiast, są to wciąż małe instancje, które zwykle nie są analizowane w przedsiębiorstwach kolejowych. Prócz ograniczeń dotyczących analizowanego horyzontu czasowego, drugim ważnym aspektem jest wielkość floty i liczba zadań przewozowych. W praktyce gospodarczej, przedsiębiorstwa zarządzają flotą liczącą od kilkunastu lokomotyw [158]. Natomiast w analizowanych dotychczas instancjach, rozważano maksymalnie 4 lokomotywy, dla których to rozwiązanie optymalne osiągnięto co najwyżej dla 9-cio miesięcznego harmonogramu.

Podsumowując, wyniki eksperymentów numerycznych przeprowadzonych przy użyciu skonstruowanych metod dokładnych, tj. algorytmu przeglądu zupełnego – BF oraz metody podziału i ograniczeń – B&B, bazujących na opracowanym modelu matematycznym, potwierdzają ich złożoność wykładniczą  $O((n!)^T)$  i są nieefektywne obliczeniowo. Pozwalają jedynie na rozwiązanie rozpatrywanego problemu wyłącznie dla małych instancji problemu planowania eksploatacji taboru kolejowego przy uwzględnieniu wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych. Zatem zakres zastosowania tych metod nie jest możliwy dla praktycznych przypadków, spotykanych w przedsiębiorstwach transportu kolejowego. Zarówno BF i B&B są bardzo czułe na wielkość danych, co przekłada się na istotne zmiany czasu ich działania, w tym przypadku wykładniczy wzrost czasu wykonywania algorytmu jest skorelowany ze wzrostem rozmiaru danych wejściowych. Warto podkreślić, że algorytm B&B znacznie przyspiesza (nawet o 50 000 razy) proces znajdowania rozwiązania optymalnego dla wszystkich analizowanych przypadków, niż BF. Dla teoretycznych przykładów rozważanego problemu planowania eksploatacji taboru kolejowego, przy uwzględnieniu wielopoziomowych przeglądów, ustalono następujące przypadki zastosowania zaprojektowanych metod. Algorytm BF jest rekomendowany dla floty homogenicznej. Natomiast możliwość użycia B&B, wyklucza sens zastosowania BF, ponieważ generuje rozwiązanie optymalne w znacznie krótszym czasie. Ponadto B&B jest rekomendowany przede wszystkim dla floty heterogenicznej, dla której to czasy działania były najlepsze, maksymalnie do godziny. Niniejsza analiza pozwoliła na eksperymentalną weryfikację rozwiązania rozpatrywanego problemu metodami dokładnymi, a także poznania maksymalnych rozmiarów instancji analizowanych przypadków, dla których osiągnięcie rozwiązania optymalnego jest akceptowalne przez decydenta (do kilkudziesięciu godzin). W niniejszej części rozprawy wykazano, że zaproponowane algorytmy dokładne, tj. BF i B&B, dla modeli decyzyjnych planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych, dostarczają rozwiązania optymalne dla małych instancji problemu (udowodniono H2).

### 4.3. Badanie metod przybliżonych

#### Studium przypadku - porównanie metod dokładnych i przybliżonych

W celu sprawdzenia efektywności zaproponowanych algorytmów przybliżonych (Rozdział 3.5) dla modeli decyzyjnych planowania eksploatacji taboru, przeprowadzono następujące eksperymenty numeryczne dla różnych studium przypadku. Na początku dokonano obliczeń dla małych instancji badanego problemu, tych samych dla których przeprowadzono analizę metod dokładnych tj. instancji od I1 do I10 (patrz Rozdział 4.2). Porównanie rozwiązań dostarczanych zarówno przez metody dokładne i przybliżone, pozwoli na weryfikację jakości generowanych wyników dla metod przybliżonych. Przypomnijmy, że rozważano dwie grupy zadań przewozowych  $j \in J$ , dla których ustalono następujące średnie dzienne przebiegi  $w_j \in \{400, 800, 1200\}$  km oraz  $w_j \in \{500, 700, 900, 1100\}$  km. Niniejsze zadania odnoszą się do średnich przebiegów na miesiąc (tj. 30 dni), które wynoszą kolejno dla  $n = 3$  tj.  $\{12000, 24000, 36000\}$  km, dla  $n = 4$  tj.  $\{15000, 21000, 27000, 33000\}$  km. Eksperymenty zostały przeprowadzone zarówno dla zbiorów taboru homogenicznego oraz heterogenicznego, bazujących na pojazdach Škoda 31E (seria 181), E6ACTa Dragon 2 oraz Pesa Gama typu 111Ed (patrz Rozdział 4.1).

Ocena rozwiązań dostarczanych przez metody przybliżone i analiza tych wyników w odniesieniu do rozwiązania optymalnego (optimum), zostanie przeprowadzona na podstawie błędu względnego  $\delta_A$ , wyrażonego w procentach. Błąd względny to stosunek błędu bezwzględnego do wyniku pomiaru. Jest obliczany w następujący sposób:  $\delta_A(I) = (Q^A(I) - Q^*(I))/Q^*(I) \times 100\%$ , gdzie  $Q^A(I)$  jest wartością kryterium otrzymaną przez algorytm  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  dla instancji  $I$  oraz  $Q^*(I)$  to optymalne rozwiązanie dla tej instancji. Wartości błędu względnego  $\delta_A$  dla taboru homogenicznego (instancje od I1 do I6) przedstawiono w Tabeli 4.8, natomiast dla floty heterogenicznej (instancje od I7 do I10) zaprezentowano w Tabeli 4.9. Dodatkowo w tabelach ujęto średnią wartość błędu  $\bar{\delta}_A$  dla każdego z algorytmów, stanowiąca wartość średniej arytmetycznej błędu względnego z serii pomiarów dla każdej z metod.

Analizując wyniki dla taboru homogenicznego (patrz Tabela 4.8), widać że najlepszy spośród metod przybliżonych to algorytm SA (obie wersje tj. SA60, SA600), który dostarcza rozwiązania z nieznacznym błędem względnym (średnio 0.04%). Niewiele gorszy okazał się algorytm GA, którego rezultaty działania są obciążone średnią wartością błędu 0.06% – wersja GA600 oraz 0.07% – wersja GA60. Rozwiązania najdalej od optymalnych, dostarczały dwa algorytmy heurystyczne tj. BH oraz BM2MH. Ich średnia wartość błędu dla serii pomiarów floty homogenicznej wynosi 0.64%. Jednakże w wybranych przypadkach, błąd względny dla obydwu metod był znacznie wyższy. Przykładem może być instancja I1, rozpatrywana dla pojazdów Škoda 31E, gdzie dla harmonogramu 12-stu miesięcy i 3-ech pojazdów, wartość błędu względnego wynosiła ponad 4%. Rozpatrując typ floty, dla których przeprowadzono badanie, okazuje się że dla floty złożonej z pojazdów



Tabela 4.8: Wartość błędu względnego  $\delta_A$  i jego średnia  $\bar{\delta}_A$  (dla badanych instancji) w procentach uzyskane przez algorytmy przybliżone w odniesieniu do rozwiązania optymalnego  $Q^*$  (w dniach) dla taboru homogenicznego

$n$	$T$	$Q^*$	$\delta(BH)$	$\delta(BM2MH)$	$\delta(NEH)$	$\delta(SA60)$	$\delta(SA600)$	$\delta(GA60)$	$\delta(GA600)$
Škoda 31E – instancja I1									
3	9	738	0.38	0.37	0.03	0.05	0.05	0.03	0.03
	10	822	0.18	0.18	0.26	0.08	0.05	0.11	0.09
	11	885	3.97	3.74	1.13	0.06	0.03	0.11	0.10
	12	967	4.15	4.14	0.12	0.06	0.05	0.12	0.10
Škoda 31E – instancja I2									
4	5	545	0.39	0.44	0.37	0.05	0.05	0.05	0.02
	6	652	0.33	0.38	0.33	0.04	0.04	0.02	0.02
	7	763	0.44	0.61	0.26	0.02	0.02	0.21	0.15
E6ACTa Dragon 2 – instancja I3									
3	9	816	0.31	0.31	0.28	0.03	0.03	0.03	0.03
	10	909	0.33	0.33	0.30	0.06	0.06	0.07	0.08
	11	996	0.01	0.01	0.19	0.04	0.04	0.04	0.04
	12	1089	0.03	0.03	0.21	0.00	0.00	0.01	0.01
E6ACTa Dragon 2 – instancja I4									
4	5	606	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06
	6	726	0.00	0.00	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00
	7	848	0.78	0.78	0.30	0.06	0.04	0.27	0.27
Pesa Gama typu 111Ed – instancja I5									
3	9	814	0.06	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03
	10	906	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
	11	994	0.23	0.21	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
	12	1087	0.39	0.38	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Pesa Gama typu 111Ed – instancja I6									
4	5	606	0.12	0.12	0.12	0.06	0.06	0.06	0.06
	6	724	0.83	0.85	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	7	845	0.40	0.41	0.18	0.06	0.06	0.06	0.06
Średnia wartość błędu $\bar{\delta}_A$			0.64	0.64	0.22	0.04	0.04	0.07	0.06

E6ACTa Dragon 2 uzyskano najwięcej rozwiązań optymalnych dostarczanych przez metody przybliżone. Interesującym przykładem jest harmonogram dla 6-ciu miesięcy oraz 4-ech pojazdów, gdzie prócz algorytmu NEH, otrzymano rozwiązania optymalne dla wszystkich analizowanych metod. Natomiast dla instancji I1 i I2, które dotyczą pojazdów Škoda, heurystyki i metaheurystyki dostarczają wyniki, które mają najwyższą wartość błędu względnego, w porównaniu z innymi zestawami floty homogenicznej.

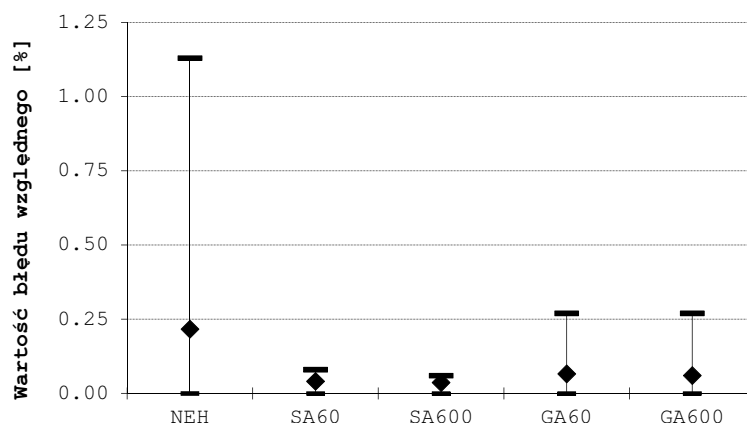
Oceniając metody przybliżone w odniesieniu do średniej wartości błędu dla taboru heterogenicznego (patrz Tabela 4.9), warto zwrócić uwagę na podobne tendencje, jak dla floty homogenicznej. W tym przypadku również algorytmy metaheurystyczne są najlepsze. Średnia arytmetyczna błędu względnego dla metody SA600 wynosi 0.02%, a dla SA60 to 0.03%. Podobnie jak dla SA, dłuższej działająca wersja algorytmu GA jest nieco lepsza tj.  $\delta(GA600) = 0.05\%$ , niż ta o krótszym warunku zatrzymania tj.  $\delta(GA60) = 0.08\%$ .

Tabela 4.9: Wartość błędu względnego  $\delta_A$  i jego średnia  $\bar{\delta}_A$  (dla badanych instancji) w procentach uzyskane przez algorytmy przybliżone w odniesieniu do rozwiązania optymalnego  $Q^*$  (w dniach) dla taboru heterogenicznego

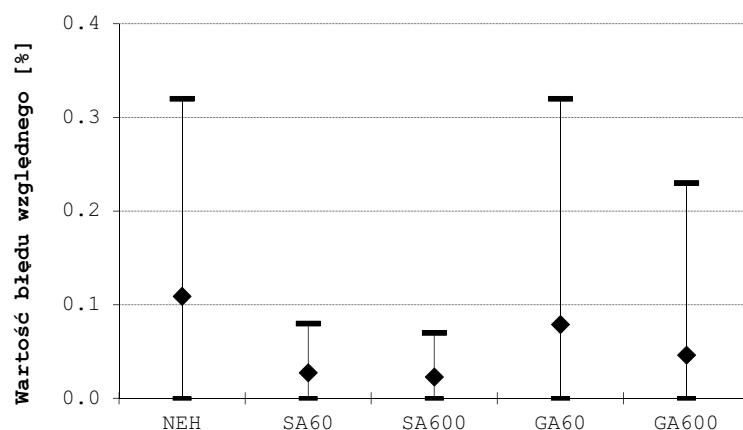
$n$	$T$	$Q^*$	$\delta(BH)$	$\delta(BM2MH)$	$\delta(NEH)$	$\delta(SA60)$	$\delta(SA600)$	$\delta(GA60)$	$\delta(GA600)$
Instancja I7									
3	9	800	1.39	0.23	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	10	891	1.46	0.31	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
	11	978	3.41	0.27	0.23	0.05	0.05	0.06	0.06
	12	1 068	3.10	0.05	0.02	0.01	0.01	0.23	0.23
Instancja I8									
4	5	582	1.35	0.71	0.02	0.00	0.00	0.32	0.02
	6	694	1.15	0.25	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05
	7	812	1.55	0.02	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05
	8	932	1.50	0.05	0.21	0.00	0.00	0.01	0.01
	9	1 046	1.31	0.24	0.22	0.02	0.00	0.00	0.00
Instancja I9									
4	5	597	1.15	0.19	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
	6	713	1.02	0.65	0.07	0.08	0.07	0.25	0.16
	7	832	1.35	0.32	0.30	0.06	0.06	0.08	0.06
	8	953	1.05	0.03	0.01	0.00	0.00	0.21	0.21
	9	1 070	0.93	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Instancja I10									
4	5	597	1.07	0.44	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00
	6	711	1.02	0.37	0.07	0.05	0.05	0.09	0.07
	7	832	1.35	0.32	0.32	0.06	0.06	0.11	0.06
	8	953	1.05	0.01	0.01	0.04	0.00	0.01	0.00
	9	1 070	0.93	0.01	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00
Średnia wartość wartość błędu $\bar{\delta}_A$			1.19	0.24	0.11	0.03	0.02	0.08	0.05

Najgorszym algorytmem w odniesieniu do badanych instancji (I7-I10), okazał się BH. Dla większości przypadków rozwiązań dostarczanych przez tę metodę, wartość błędu względnego była powyżej 1%. Natomiast algorytm BM2MH w wielu przypadkach wygenerował rozwiązania bliskie optimum. Na przykład dla I8 i  $T=7$ , błąd względny wynosił jedynie 0.02%, a dla I10 oraz  $T=8$  i  $T=9$ , błąd kształtował się na poziomie 0.01%. Analizując skład floty złożonej z różnych pojazdów, najwyższą wartość błędu względnego odnotowano dla Instancji I7, gdzie  $n=3$ . Rozpatrując większy skład i mniej proporcjonalny pod względem typu taboru, jest większa szansa na otrzymanie rozwiązań optymalnych bądź suboptymalnych przy zastosowaniu metaheurystyk. Przykład może stanowić instancja I9 i harmonogram na 9 miesięcy, czy też instancja I10 i harmonogram dla 5-ciu miesięcy.

Dodatkowo wyznaczono zależności pomiędzy minimalnymi, średnimi i maksymalnymi błędami względnymi metod przybliżonych w odniesieniu do analizowanej floty, które zaprezentowano na Rysunku 4.6 dla taboru homogenicznego i na Rysunku 4.7 dla taboru heterogenicznego. Pominięto wyniki dla BH i BM2MH, ponieważ ich błędy względne są znacznie większe niż w przypadku innych metod, co może zmniejszyć czytelność pre-



Rysunek 4.6: Minimalne, średnie i maksymalne wartości błędów względnego  $\delta_A$  algorytmów przybliżonych w odniesieniu do rozwiązania optymalnego  $Q^*$  dla taboru homogenicznego



Rysunek 4.7: Minimalne, średnie i maksymalne wartości błędów względnego  $\delta_A$  algorytmów przybliżonych w odniesieniu do rozwiązania optymalnego  $Q^*$  dla taboru heterogenicznego

zentowanych wykresów. Na początku zwróćmy uwagę, że dla wszystkich ujętych metod osiągnięto co najmniej jedno rozwiązanie optymalne, ponieważ każda z nich osiąga zerową wartość błędów (patrz Rysunek 4.6, 4.7). Najwyższą odnotowaną wartość błędów dla badanych instancji ma algorytm NEH, jedyna heurystyka analizowana w tym zestawieniu. Również NEH ma najwyższe średnie wartości błędów względnych, w porównaniu z metaheurystykami. Niniejsze zestawienie również potwierdza to, że najlepsze rozwiązania dostarczają algorytmy symulowanego wyżarzania – SA. Warto podkreślić, że metaheurystyki, generują wyniki bardzo bliskie optimum. Analizując dotychczasowe wyniki, dla floty homogenicznej można przewidywać błędy do 0.5% (patrz Rysunek 4.6), natomiast dla składów heterogenicznych, błędy względne nie powinny przekraczać wartości 0.4% (patrz Rysunek 4.7).

Zaproponowane metody przybliżone, to algorytmy których czas działania ograniczony jest przez wielomian zależny od rozmiaru danych wejściowych. Zatem algorytmy heurystyczne i metaheurystyczne działają bardzo krótko, nawet dla znacznych rozmiarów

instancji problemu. Natomiast dostarczane przez nie rozwiązania, są obarczone błędem, przez co kosztem dużej efektywności obliczeniowej jest brak optymalnego rozwiązania. Dla rozpatrywanych instancji przedstawimy jedynie czasy działania algorytmu NEH (patrz Tabela 4.10). W tym zestawieniu nie uwzględniono heurystyk BH oraz BM2MH, ponieważ ich czasy generowania rozwiązań dla tak małych instancji były poniżej 4 milisekund. Dla decydenta są to znikome czasy oczekiwania na harmonogram, dlatego też zrezygnowano z ich analizy. Z kolei algorytmy metaheurystyczne mają określony warunek zatrzymania, którym jest kryterium czasowe. W związku z tym, niezależnie od rozpatrywanej instancji, czas oczekiwania na rozwiązanie dostarczane przez SA60 i GA60, to 60 sekund, a dla SA600 i GA600, to jest 600 sekund. Analizując średnie czasy działania NEH<sup>5</sup>, widać korelację dodatnią między czasem generowania rozwiązania a rozmiarem danych wejściowych. Należy zwrócić uwagę, że Tabela 4.10 prezentuje wyniki wyrażone w milisekundach, co oznacza że czas oczekiwania na harmonogram eksploatacji taboru kolejowego jest znikomy. Porównując czasy działania NEH, do czasów działania algorytmów BF czy B&B, dla tych samych instancji, różnice są pokaźne. Dysproporcja między NEH a B&B (który był znacznie szybszy niż BF) rośnie. Dynamika tego wzrostu jest uzależniona od wielkości danych wejściowych. Znając złożoność obliczeniową obydwu metod, można wywnioskować że różnice w czasach ich działania będą rosły w sposób wykładniczy wraz ze wzrostem rozmiaru instancji rozpatrywanego problemu.

Tabela 4.10: Średnie czasy działania algorytmu NEH dla rozpatrywanych instancji (w milisekundach)

$n$	$T$	I1	I3	I5	I7	$n$	$T$	I2	I4	I6	I8	I9	I10
3	9	6	3	2	7	4	5	4	2	1	5	4	4
	10	8	4	3	8		6	7	3	3	6	13	6
	11	22	7	5	8		7	10	3	4	17	17	9
	12	22	8	15	12		8	-	-	-	17	17	10
							9	-	-	-	24	18	11

Prezentowana analiza wartości błędów względnych wskazuje na wysoką jakość dostarczanych rozwiązań przez metody przybliżone dla badanych instancji. Zaprojektowane metaheurystyki, szczególnie SA, okazały się najlepszymi algorytmami, które generują wyniki z nieznacznym średnim błędem względnym (poniżej 0.09%). Heurystyka NEH, również w wielu przypadkach generowała rozwiązania bliskie optimum, szczególnie dla floty heterogenicznej. Najgorsze wyniki odnotowano dla dwóch kolejnych heurystyk, tj. BH i BM2MH, których wartość błędu względnego nie przekroczyła 4.14%. Nie stwierdzono korelacji między zmianą rozmiaru danych wejściowych a wartością błędu względnego dla badanych metod. Jednakże, jakość dostarczanych rozwiązań przez algorytmy heurystyczne, szczególnie BH i BM2MH, zależy od wartości parametrów danych wejściowych m.in.

<sup>5</sup> Mając na uwadze zmienną wydajność środowiska systemu operacyjnego, w którym są przeprowadzane eksperymenty numeryczne, dla precyzyjnego określenia podano średnie czasy trwania obliczeń.

liczby zadań  $j$ , średnich przebiegów zadań –  $w_j$ , cykli przeglądowo – naprawczych lokomotyw. Świadczą o tym duże spadki i wzrosty wartości błędów względnych dla tych heurystyk, w zależności od rozpatrywanych przypadków. Jakość dostarczanych rozwiązań dla analizowanych instancji przy zastosowaniu metod przybliżonych jest akceptowalna, szczególnie dla wyników generowanych przez algorytmy metaheurystyczne. Kolejnym ważnym aspektem jest efektywność czasowa zaproponowanych metod przybliżonych. W rozpatrywanych instancjach czas oczekiwania na rozwiązanie był znany *a posteriori* (odnośnie metaheurystyk), bądź był znikomy i wynosił maksymalnie kilkadziesiąt milisekund (odnośnie heurystyk). Podsumowując, dla zbadanych małych instancji problemu algorytmy heurystyczne i metaheurystyczne dostarczają rozwiązania dążące do optimum w czasie wielomianowym. Dlatego też, w dalszej części tego Rozdziału przetestujemy działanie tych metod dla dużych instancji rozpatrywanego problemu, które stanowią odwzorowanie rzeczywistych sytuacji decyzyjnych spotykanych w praktyce gospodarczej.

### **Studium przypadku dla planowania eksploatacji homogenicznego taboru kolejowego**

W niniejszej części rozprawy zbadano jakość rozwiązań dostarczanych przez modele decyzyjne oparte na algorytmach przybliżonych (Rozdział 3.5) dla wybranych studiów przypadku, bazujących na rzeczywistych procesach w przedsiębiorstwie kolejowym. Mimo niskich wartości błędów względnych dla rozwiązań dostarczanych przez proponowane metody przybliżone, należy mieć na uwadze że te wyniki są obciążone błędem. Jest to koszt stosowania tych metod, które charakteryzują się dużą efektywnością obliczeniową, pozwalającą na osiągnięcie satysfakcjonujących dla decydenta rezultatów, w akceptowalnym przez niego czasie, szczególnie dla dużych instancji problemu. Natomiast jednoznacznie można ocenić która z metod działa lepiej bądź gorzej, na podstawie wartości kryterium. W rozpatrywanym problemie, celem funkcji kryterialnej jest maksymalizacja liczby dni dostępności taboru. Dlatego też, im wyższe kryterium, tym lepsze rozwiązanie i jednocześnie metoda, która je dostarcza. Dla wybranych studiów przypadku, przedstawiono również zasadność zastosowania algorytmów przybliżonych w procesie optymalizacji harmonogramów eksploatacji taboru z wielopoziomowymi przeglądami w przedsiębiorstwach kolejowych.

Eksperymenty przeprowadzono dla trzech grup instancji składających się z jednego typu i serii pojazdów (homogenicznej grupy). Niniejsza sytuacja decyzyjna odzwierciedla warunki, kiedy to przedsiębiorstwa kolejowe nabywają (np. w drodze zakupu, kredytu, leasingu) zestaw pojazdów kolejowych tego samego typu np. [129, 140, 163], bądź po przeprowadzeniu modernizacji tej floty (przeгляд poziomu P5) np. [86, 133, 135, 161], ustalają harmonogramy eksploatacji pojazdów. Rozpatrywano następujące rodzaje lokomotyw:

Škoda 31E (seria 181), E6ACTa Dragon 2 i Pesa Gama typu 111Ed, których to specyfikacje oraz cykle przeglądowo-naprawcze opisano w Rozdziale 4.1.

Tabela 4.11: Zwiększenie dostępności  $\Delta(A)$  uzyskane przez algorytmy  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  w odniesieniu do  $Q(S^{FA})$  dla instancji opartych na Škoda 31E (seria 181)

$n$	$T^{(y)}$ [lata]	FA $f(S^{FA})$	BH $\Delta(BH)$	BM2MH $\Delta(BM2MH)$	NEH $\Delta(NEH)$	SA60 $\Delta(SA60)$	SA600 $\Delta(SA600)$	GA60 $\Delta(GA60)$	GA600 $\Delta(GA600)$
10	5	15501	-12729	5	82	98	119	82	84
	6	18476	180	187	268	298	318	282	285
	8	24437	-43	-29	47	240	268	108	111
	9	27554	11	64	133	208	260	177	197
	16	48598	179	207	246	309	319	266	280
	17	51702	-250	-220	-135	204	295	182	199
	24	72681	-6	28	96	198	395	314	332
	25	75884	-42	-16	224	212	251	151	212
20	5	31002	-5	11	165	208	218	136	146
	6	36952	360	374	535	475	588	533	538
	8	48874	-86	-58	95	447	492	209	226
	9	55108	22	129	266	172	517	330	334
	16	97197	359	414	493	542	598	398	440
	17	103403	-499	-439	-270	211	513	265	288
	24	145362	-12	56	193	456	726	614	637
	25	151767	-83	-32	447	161	539	280	323
40	5	62003	-9	21	329	302	456	234	241
	6	73903	719	747	1070	602	737	1032	1059
	8	97748	-171	-115	189	756	857	293	365
	9	110215	43	257	532	400	443	541	606
	16	194393	717	828	985	793	1104	627	808
	17	206806	-998	-878	-540	230	671	326	481
	24	290724	-23	112	385	659	945	1003	1190
	25	303534	-166	-64	894	138	436	114	501

Przeanalizujemy następujące scenariusze dla  $n \in \{10, 20, 40\}$  lokomotyw. Niech  $T \in \{60, 72, 96, 108, 192, 204, 288, 300\}$  będzie zbiorem kolejnych miesięcy okresu planowania eksploatacji taboru, który można odnieść do  $T^{(y)} \in \{5, 5+1, 8, 8+1, 16, 16+1, 24, 24+1\}$  w latach. Wybór horyzontów czasowych planów eksploatacji jest podyktowany praktycznymi przesłankami związanymi z funkcjonowaniem przedsiębiorstw kolejowych oraz wynikają z najkrótszych pełnych cykli przeglądowo-naprawczych rozpatrywanego taboru, tj. Skody 31E i Pesy 111Ed. Celem dodatkowego roku jest uwzględnienie działań konserwacyjnych dla najwyższego poziomu tych pojazdów, bazujący na  $TBM_k^f$ , aby zapobiec zniekształceniu analizy. Rozważane zadania przewozowe  $j \in J$  charakteryzują się rzeczywistymi średnimi dziennymi przebiegami  $w_j \in \{400, 500, 600, 700, 800\}$  km, które odnoszą się do średniego przebiegu na miesiąc (około 30 dni) z zakresu  $\{12000, \dots, 24000\}$  km. Ponadto zadania dzielą się na  $G = \lceil n/2 \rceil$  grup, które łączy ten sam przebieg  $w_j$  w taki sposób, że wartości są proporcjonalnie rozłożone zgodnie z  $G$ , np. dla  $G = 5$  mamy  $(w_1 = w_2, w_3 = w_4, w_5 = w_6, w_7 = w_8, w_9 = w_{10}) = (400, 500, 600, 700, 800)$  itd.

Wszystkie instancje rozwiązano algorytmami przybliżonymi (Rozdział 3.5), których to ustawienia opisano w Rozdziale 4.1. Przypomnijmy, że wyniki modeli zostaną porównane z ustalonym przydziałem zadań do pojazdów (FA) w każdym okresie  $t \in \{1, \dots, T\}$  w następujący sposób:  $\Delta(A) = Q(S^A) - Q(S^{FA})$ , gdzie  $Q(S^A)$  to wartości kryterium dla harmonogramu dostarczonego przez algorytm  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  oraz  $Q(S^{FA})$  to stałe przypisanie zadań bez optymalizacji tj. FA. Wartość ujemna otrzymanych rozwiązań, oznacza mniejszą liczbę dni dostępności taboru dla planu dostarczonego przez dany algorytm  $A$  niż w przypadku planu bez optymalizacji FA. Im większa liczba dni dostępności taboru dla harmonogramu, tym lepiej oceniana metoda dostarczająca niniejszy harmonogram. Otrzymane rozwiązania zaokrąglono do liczb całkowitych. Wyniki eksperymentów dla instancji Skoda 31E, Dragon 2 i Pesa 111Ed przedstawiono kolejno w Tabelach 4.11, 4.12 i 4.13.

Tabela 4.12: Zwiększenie dostępności  $\Delta(A)$  uzyskane przez algorytmy  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  w odniesieniu do  $Q(S^{FA})$  dla instancji opartych na E6ACTa Dragon 2

$n$	$T^{(y)}$ [lata]	FA $f(S^{FA})$	BH $\Delta(BH)$	BM2MH $\Delta(BM2MH)$	NEH $\Delta(NEH)$	SA60 $\Delta(SA60)$	SA600 $\Delta(SA600)$	GA60 $\Delta(GA60)$	GA600 $\Delta(GA600)$
10	5	17671	225	226	227	230	232	227	227
	6	21083	-304	-304	261	71	142	138	138
	8	28077	-72	-76	-62	86	87	0	0
	9	31374	88	59	216	168	226	187	189
	16	55723	88	91	174	38	229	156	173
	17	59204	223	224	236	36	241	95	114
	24	83337	-358	-360	278	78	96	0	7
	25	86687	-82	-79	-117	84	225	136	219
20	5	35341	450	451	453	461	462	453	454
	6	42167	-608	-608	522	67	284	274	277
	8	56154	-144	-152	-124	161	171	0	0
	9	62748	176	118	432	374	430	371	387
	16	111447	176	182	347	80	121	307	327
	17	118407	446	448	472	71	71	201	204
	24	166674	-717	-720	557	1	208	0	52
	25	173374	-165	-158	-233	178	446	285	348
40	5	70682	900	902	906	914	920	900	903
	6	84333	-1215	-1215	1044	0	127	408	548
	8	112308	-288	-303	-247	130	333	0	0
	9	125495	351	236	863	650	693	755	776
	16	222893	352	364	694	165	169	601	610
	17	236814	892	895	944	0	145	495	566
	24	333347	-1433	-1439	1113	3	39	0	6
	25	346748	-329	-315	-466	357	357	509	646

Na początku zwróćmy uwagę, że w 24-letnim horyzoncie czasowym dla  $n = 10$  lokomotyw i związanych z nimi obciążeń, nawet bez żadnej optymalizacji, mamy  $Q(S^{FA}) = 72681$  dni całkowitej dostępności dla Škody 31E,  $Q(S^{FA}) = 83337$  dni dla Dragon 2 i  $Q(S^{FA}) = 84884$  dni dla Pesa 111Ed, co daje kolejno około 303, 347 i 354 dni w roku na lokomotywę. Przewaga lokomotyw Dragon 2 i Pesa 111Ed nad starszym pojaz-

Tabela 4.13: Zwiększenie dostępności  $\Delta(A)$  uzyskane przez algorytmy  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  w odniesieniu do  $Q(S^{FA})$  dla instancji opartych na Pesa Gama 111Ed

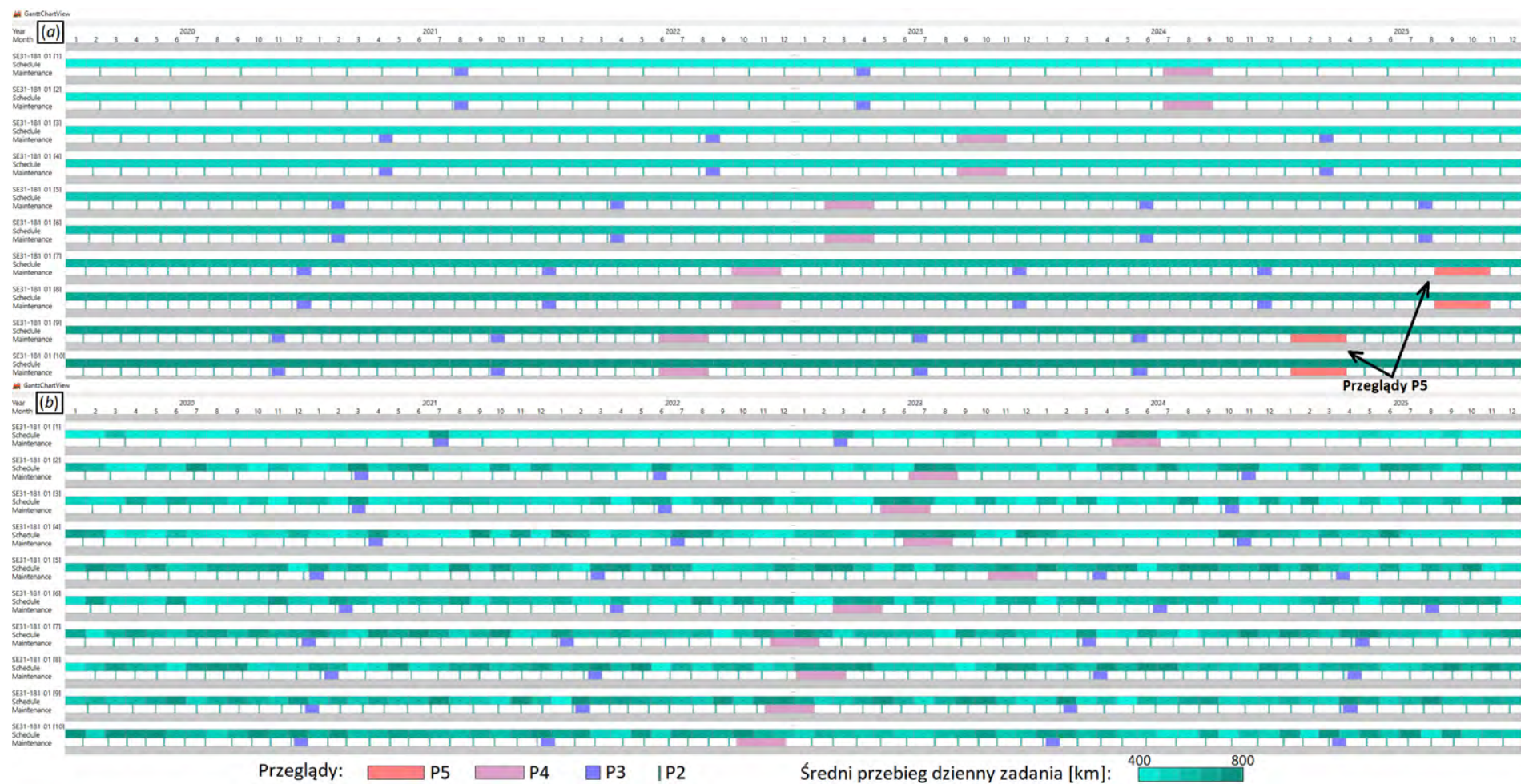
$n$	$T^{(y)}$ [lata]	FA $f(S^{FA})$	BH $\Delta(BH)$	BM2MH $\Delta(BM2MH)$	NEH $\Delta(NEH)$	SA60 $\Delta(SA60)$	SA600 $\Delta(SA600)$	GA60 $\Delta(GA60)$	GA600 $\Delta(GA600)$
10	5	17992	76	77	85	87	87	85	87
	6	21555	-77	-75	37	6	6	6	8
	8	28691	-1	0	9	14	14	14	14
	9	32125	188	190	191	199	199	199	197
	16	56651	-5	-4	60	41	98	97	99
	17	60274	-4	-4	-3	16	18	12	36
	24	84884	-368	-368	260	65	66	61	63
	25	88138	6	6	91	67	107	101	101
20	5	35984	152	153	170	175	176	172	172
	6	43111	-153	-150	75	9	11	11	29
	8	57381	-3	0	19	31	32	24	28
	9	64251	376	379	382	394	397	392	393
	16	113302	-9	-8	121	55	155	152	154
	17	120548	-8	-8	-6	31	33	18	21
	24	169768	-736	-735	520	47	132	117	118
	25	176276	11	12	181	131	194	191	196
40	5	71967	303	306	339	347	351	340	342
	6	86221	-306	-299	149	24	24	13	22
	8	114762	-5	0	37	60	62	50	50
	9	128501	752	758	763	794	794	777	778
	16	226603	-18	-15	241	69	131	269	276
	17	241096	-16	-15	-11	53	62	13	15
	24	339536	-1472	-1470	1039	83	141	205	223
	25	352552	22	24	362	236	265	344	353

dem jest niezaprzeczalna, szczególnie w odniesieniu do ich wysokiej niezawodności i dostępności (ponad 95%). Jednakże, choć konstrukcja 31E jest przestarzała, to gotowość tej lokomotywy wciąż jest na dobrym poziomie (83%). Warto podkreślić, że dla innych horyzontów czasowych np. 16 lat, dostępność wymienionych lokomotyw niemalże pozostaje bez zmian.

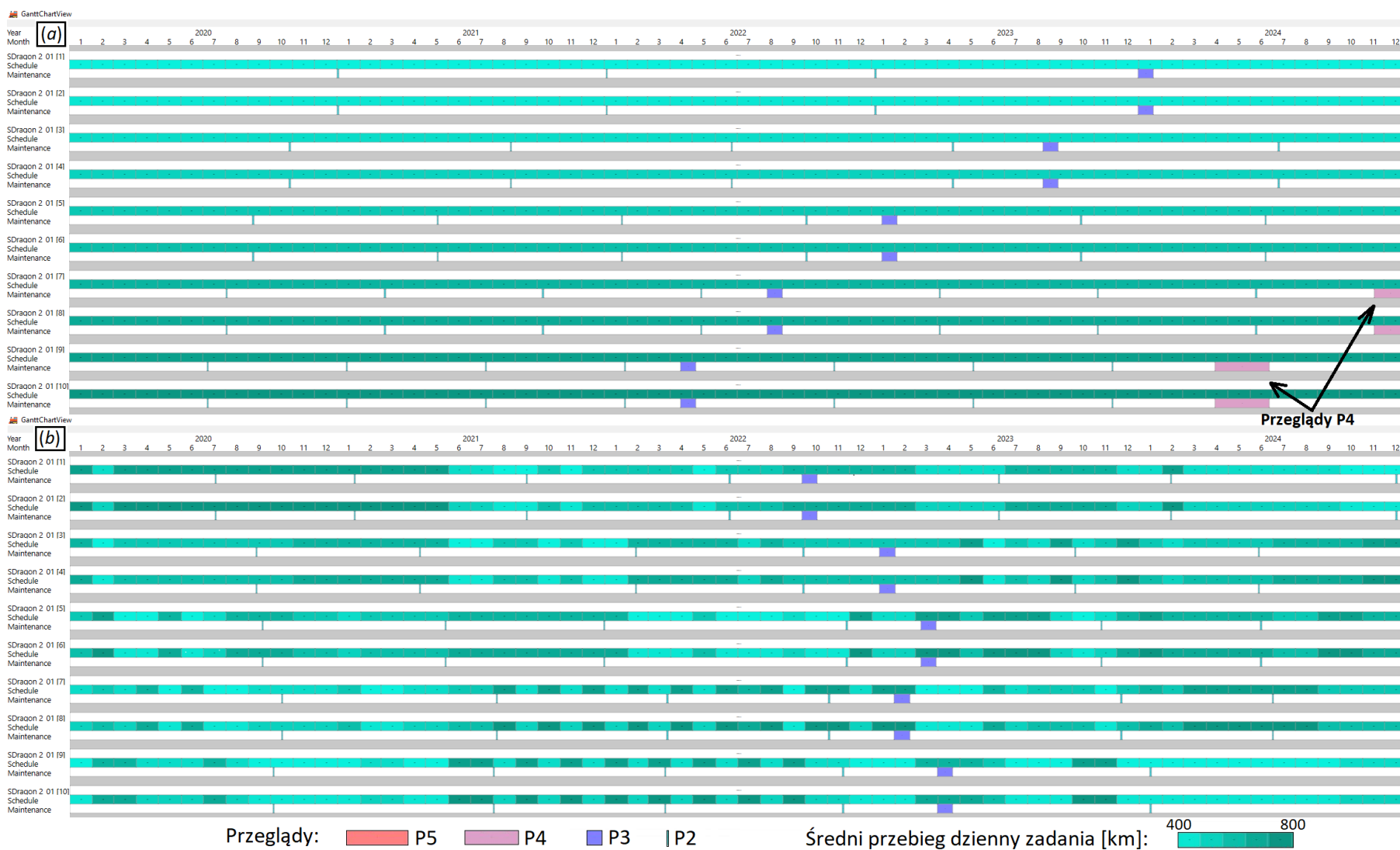
Wyniki eksperymentów dla różnych grup pojazdów tego samego typu (patrz Tabele 4.11, 4.12, 4.13) pokazują, że dla znakomitej większości przypadków odnotowano wzrost dostępności floty dla planów ich eksploatacji przy użyciu zaproponowanych algorytmów optymalizacji. Należy podkreślić, że dla badanych instancji uzyskano nawet kilkadziesiąt dni dodatkowej dostępności na lokomotywę. Na przykład w 6-letnim horyzoncie czasowym i  $n = 40$ , dostępność dla lokomotyw Škoda 31E i Dragon 2 wynosi kolejno 1070 i 1044 dni przy zastosowaniu algorytmu NEH (patrz Tabele 4.11, 4.12). To oznacza, że dla floty 40 lokomotyw zyskano dla każdego pojazdu średnio 27 dni dodatkowej dostępności eksploatacyjnej.

Analizując powstałe harmonogramy w wyniku optymalizacji, można zaobserwować później zaplanowane przeglądy niż dotychczas, których może pojawić się mniej dla rozpatrywanego horyzontu czasowego, co przekłada się na realny wzrost dostępności taboru.





Rysunek 4.8: Porównanie planów eksploatacji dziesięciu lokomotyw Škoda 31E seria 181 dla sześciu lat, gdzie (a) to harmonogram bez optymalizacji (FA), (b) harmonogram po optymalizacji (SA600)

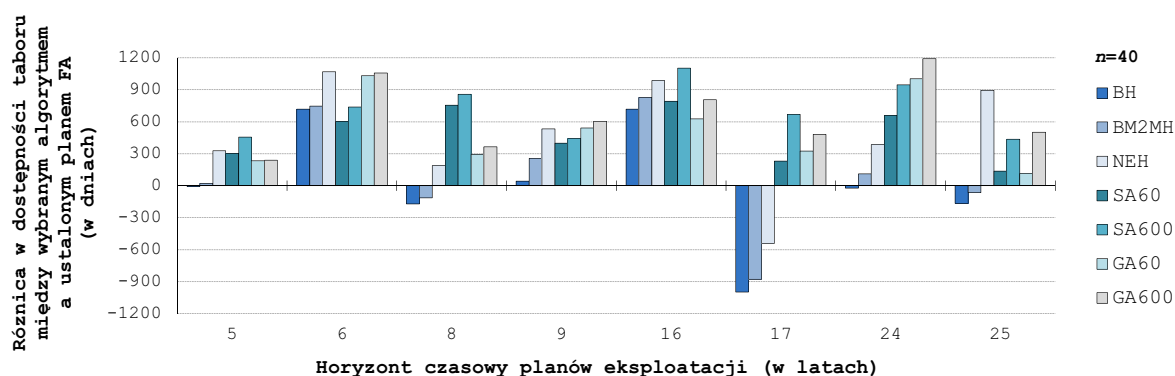


Rysunek 4.9: Porównanie planów eksploatacji dziesięciu lokomotyw Dragona 2 dla pięciu lat, gdzie (a) to harmonogram bez optymalizacji (FA), (b) harmonogram po optymalizacji (NEH)

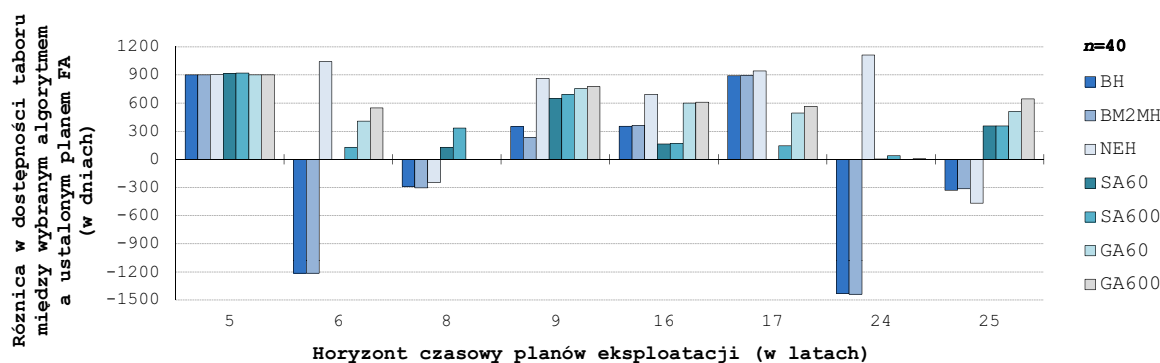
Jest to widoczne szczególnie w sytuacjach, gdzie przeglądy wysokiego poziomu (w tym przypadku od P3 do P5) zostają zaplanowane w możliwym najpóźniejszym terminie. W związku z tym, nowe harmonogramy mogą nie obejmować tychże przeglądów. Jednym z przykładów to instancja dotycząca dziesięciu lokomotyw Škoda 31E i planu na sześć lat. Harmonogram bez optymalizacji (FA) zawiera  $P5 = 4$ , natomiast ten sam harmonogram po optymalizacji (przy użyciu algorytmu SA600) ma  $P5 = 0$  (patrz Rysunek 4.8). Inny przykład instancji to dziesięć lokomotyw Dragon 2, gdzie odnotowano spadek czterech przeglądów poziomu P4 dla 5-cio letniego harmonogramu przy zastosowaniu algorytmu NEH (patrz Rysunek 4.9). Z perspektywy przedsiębiorstwa, które ponosi koszty przeglądów i napraw okresowych, jest to znacząca różnica w planowanych wydatkach. Przypomnijmy, że orientacyjna cena wykonania przeglądu P4 to około 1 mln zł [162]. W związku z nowymi zoptymalizowanymi harmonogramami, przedsiębiorstwo nie tylko zyskuje znaczącą dostępność rozpatrywanego taboru. W tym przypadku dla floty Škoda 31E dostępność wzrosła o 318 dni, a dla lokomotyw Dragon 2 odnotowano 227 dodatkowych dni gotowości operacyjnej. Jednocześnie przedsiębiorstwo może osiągnąć realne oszczędności, nawet w postaci kilku milionów zł, związane z ograniczeniem liczby przeglądów wysokiego poziomu. Ponadto warto zauważyć, że dla instancji dotyczącej pojazdów Dragon 2 termin zakończenia przeglądów jest poza okresem symulacji (podobnie jak dla wielu innych instancji). W tym przypadku wykonanie dwóch przeglądów poziomu P4 dla harmonogramu bez optymalizacji jest planowane na 30 stycznia 2025 roku. Dla harmonogramów, gdzie istniało ryzyko pojawienia się przeglądów na koniec rozpatrywanego horyzontu czasowego, zwiększano zakres planów o kolejny rok. Takie działanie miało na celu zapobieganie zniekształceniom analizy.

Dla lepszej wizualizacji otrzymanych rezultatów dotyczących floty homogenicznej, wybrano scenariusz  $n=40$  wszystkich rozpatrywanych typów lokomotyw, które prezentują następujące Rysunki 4.10, 4.11, 4.12. Porównując rozwiązania dla poszczególnych metod, okazuje się że algorytmy metaheurystyczne (SA i GA) są lepsze niż algorytmy heurystyczne (BH, BM2MH, NEH) w odniesieniu do badanego kryterium. Warto zauważyć, że dla SA60, SA600, GA60 i GA600 brak przypadków zmniejszenia dostępności floty w porównaniu z podejściem referencyjnym FA. Natomiast pogorszenie dotychczasowej dostępności odnotowano jedynie dla zoptymalizowanych planów przy użyciu algorytmów heurystycznych (patrz Rysunki 4.10, 4.11, 4.12). Wyniki dla nich stanowią ujemne wartości w Tabelach 4.11, 4.12, 4.13. Przykładem najgorszych rozwiązań dla 10 lokomotyw Dragon 2 dla 8-letniego harmonogramu, to strata 72, 76 oraz 62 dni przy zastosowaniu kolejno BH, BM2MH i NEH. Warto przypomnieć, że metody BH i BM2MH przy konstruowaniu rozwiązania nie uwzględniają okresu optymalizacji, przez co w zależności od rozpatrywanego horyzontu czasowego, niniejsze algorytmy mogą zaplanować więcej przeglądów niż zakładano. To przekłada się na mniejszą dostępność taboru dla różnych rozpatrywanych przypadków i kwalifikuje te metody jako najgorsze. Jednakże algorytm

NEH wyróżnia się na tle innych zaproponowanych metod. Wyniki badań potwierdzają, że jest jedną z najskuteczniejszych heurystyk. Działanie tegoż algorytmu jest na tyle dobre, że w wybranych przypadkach dostarcza on lepsze rozwiązania niż algorytmy metaheurystyczne. Dowodem mogą być następujące instancje:  $n = 40$  lokomotyw Škoda 31E i  $T = 6$  dla których  $Q(S^*)=1070$  dni;  $n = 10$  lokomotyw Dragon 2 i  $T = 24$  dla których  $Q(S^*)=278$  dni czy  $n = 20$  lokomotyw Pesa i  $T = 24$  dla których  $Q(S^*)=520$  dni (patrz Tabele 4.11, 4.12, 4.13). W związku z tym, że NEH generuje bardzo dobre wyniki, a przy tym jest algorytmem deterministycznym, zostanie porównany w ramach najlepszych algorytmów, to jest z metaheurystykami.

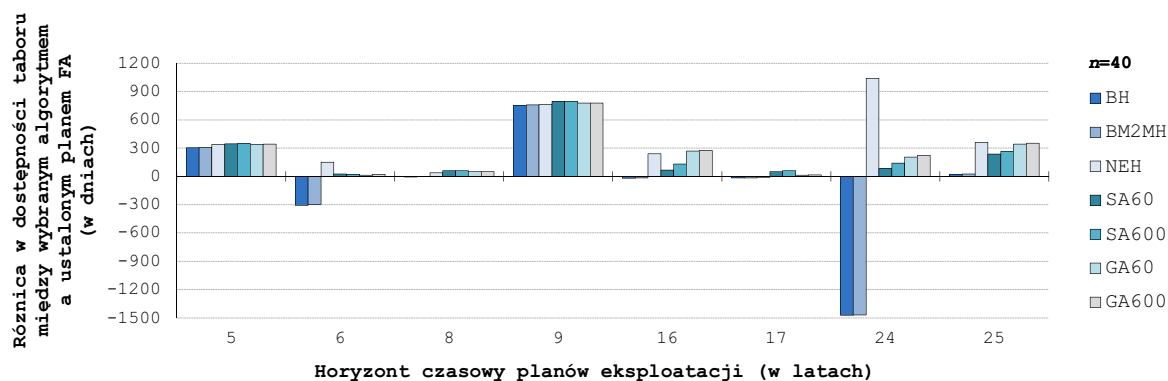


Rysunek 4.10: Wyniki eksperymentów dla 40 lokomotyw Škoda 31E. Zwiększenie dostępności  $\Delta(A)$  uzyskane przez algorytmy  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  w odniesieniu do  $Q(S^{FA})$



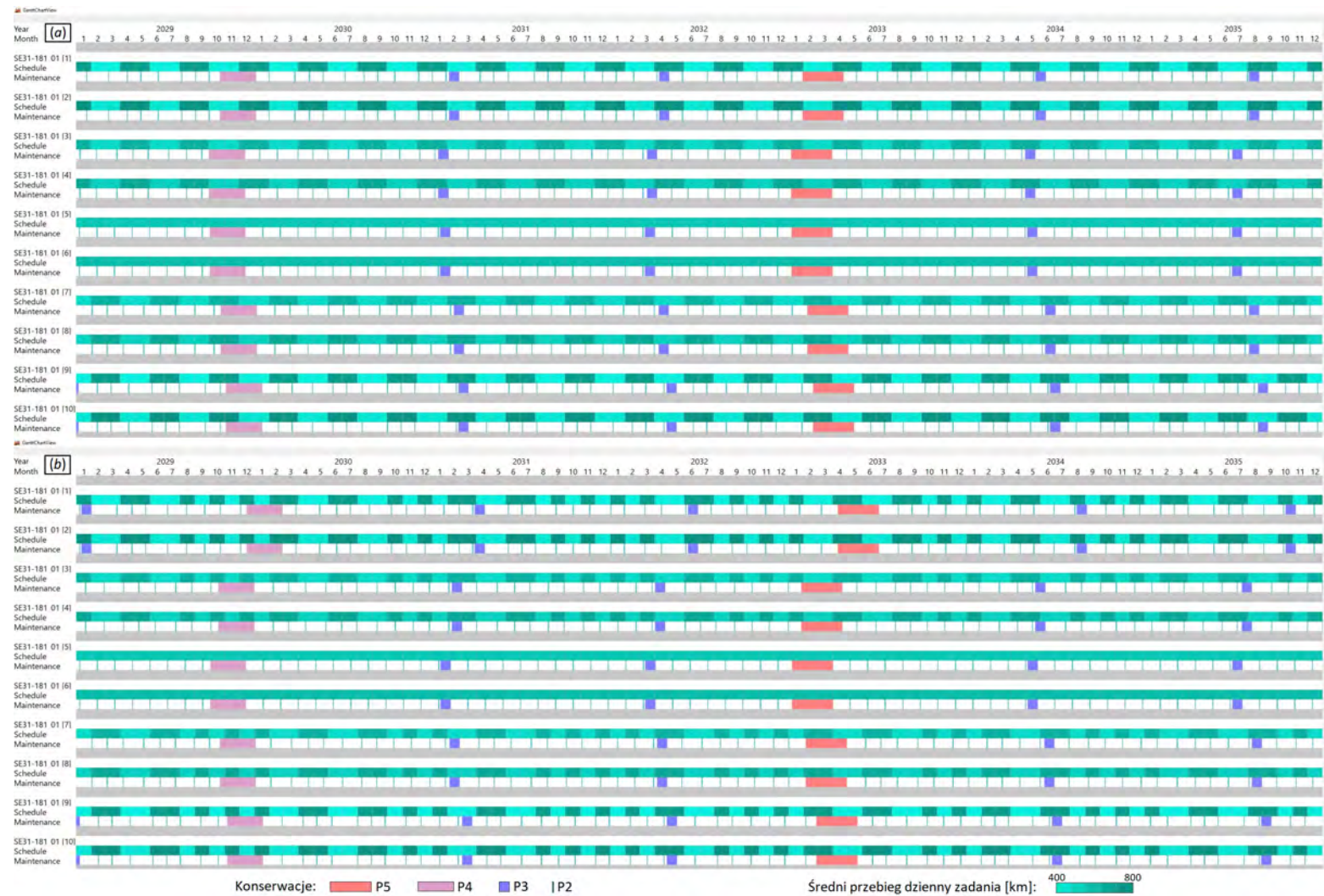
Rysunek 4.11: Wyniki eksperymentów dla 40 lokomotyw E6ACTa Dragon 2. Zwiększenie dostępności  $\Delta(A)$  uzyskane przez algorytmy  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  w odniesieniu do  $Q(S^{FA})$

Warto podkreślić, że oceniane najgorzej metody tj. intuicyjne heurystyki BH i BM2MH mogą dawać lepsze rozwiązania niż podejście referencyjne FA. Jednym z przykładów to 9-letnie harmonogramy dla każdej analizowanej instancji, gdzie zyskano dodatkową dostępność taboru przy zastosowaniu BH oraz BM2MH w optymalizacji planów. Okazuje się, że niemal dla połowy rozpatrywanych przypadków BH i BM2MH generują od kilku do kilkudziesięciu dni dodatkowej dostępności na lokomotywę. Potwierdza to



Rysunek 4.12: Wyniki eksperymentów dla 40 lokomotyw Pesa Gama 111Ed. Zwiększenie dostępności  $\Delta(A)$  uzyskane przez algorytmy  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  w odniesieniu do  $Q(S^{FA})$

między innymi harmonogram na 5 lat, dla 10 lokomotyw Dragon 2, gdzie przy zastosowaniu BH osiągnięto 225 dni, a BM2MH 226 dni dodatkowej dostępności dla całej floty. Kolejne przykłady są widoczne choćby dla 6-cio letniego planu i  $n=40$  lokomotyw Skoda, gdzie dla BH zyskano 719 dni, a dla BM2MH to 747 dni (patrz Rysunek 4.10, Tabela 4.11). Natomiast dla lokomotyw Pesa, dla takiego samego rozmiaru floty i harmonogramu, odnotowano wzrost dostępności dla BH w wymiarze 303 dni oraz dla BM2MH 306 dni (patrz Rysunek 4.12, Tabela 4.13). Porównując rezultaty tych dwóch metod, algorytm BM2MH jest nieco lepszy od BH, jest to widoczne przede wszystkim dla instancji opartych na Škoda (Rysunek 4.10, Tabela 4.11). Natomiast dla dwóch kolejnych typów lokomotyw, Dragon 2 i Pesa, algorytmy te dają zbliżone wyniki (Tabele 4.12, 4.13). Należy zauważyć, że istnieje wysokie prawdopodobieństwo zaplanowania przeglądów w tym samym czasie dla całości taboru w harmonogramach, gdzie zastosowano zarówno BH i BM2MH. Jest to wynik sposobu ich działania, ponieważ obie metody opierają się na równomiernym bilansowaniu obciążenia pojazdów zadaniami transportowymi, gdzie BH bierze pod uwagę bieżący przebieg lokomotyw, a BM2MH uwzględnia pozostały przebieg do kolejnego przeglądu o najwyższym poziomie. Dla wszystkich badanych instancji, gdzie zastosowano obie heurystyki zaobserwowano, że dla znakomitej większości przypadków terminy przeglądów tego samego poziomu pokrywały się w planach eksploatacji taboru. Natomiast dla BM2MH, takich sytuacji było mniej niż dla BH. Przykład mogą stanowić 16-letnie plany dla 10 lokomotyw Škoda (patrz Rysunek 4.13), gdzie dla siedmiu ostatnich lat można zaobserwować rozbieżności między terminami przeglądów tego samego poziomu. Dla pierwszych dwóch lokomotyw termin wykonania przeglądów jest opóźniony (nawet o 3 miesiące dla poziomu P3) dla planu stosującego BM2MH w porównaniu z BH. Pomimo, że heurystyki BH i BM2MH należą do najgorzej działających zaproponowanych algorytmów optymalizacji harmonogramów eksploatacji taboru, to wyniki eksperymentów świadczą o tym, że warto jest je zastosować, niż pozostając przy podejściu referencyjnym FA tj. braku optymalizacji.



Rysunek 4.13: Porównanie planów eksploatacji dziesięciu lokomotyw Škoda 31E seria 181 dla 7 ostatnich lat z 16-letniego harmonogramu. Harmonogram po optymalizacji dla algorytmów: (a) BH, (b) BM2MH

Wyniki badań dla instancji opartych na taborze homogenicznym potwierdzają, że do najlepszych zaproponowanych metod należą metaheurystyki tj. SA i GA oraz heurystyka NEH. W planach eksploatacji taboru gdzie zastosowano niniejsze algorytmy, osiągnięto dla wybranych przypadków największą liczbę dni dostępności pojazdów. Potwierdzają to między innymi harmonogramy dla 16 lat i  $n = 40$ , gdzie w wyniku działania SA600 zyskano 1104 dni dla lokomotyw Škoda 31E, GA600 pozwolił na osiągnięcie 276 dni dla Pesa 111Ed, a przy użyciu NEH otrzymano 694 dni dodatkowej dostępności dla Dragon 2 (patrz Tabele 4.11, 4.12, 4.13). Należy podkreślić, że warunek zatrzymania algorytmów metaheurystycznych, czyli czas trwania obliczeń jest istotny z perspektywy otrzymanych wyników. Zarówno algorytm SA i GA, którego czas wykonania był dłuższy tj. dziesięć minut (SA600, GA600), we wszystkich badanych przypadkach zwracają lepsze wyniki niż te same algorytmy o czasie symulacji jednej minuty (SA60, GA60). Dłuższe działanie algorytmów, pozwala na przejrzenie większej przestrzeni poszukiwań, którą tworzy zbiór możliwych rozwiązań problemu. W przypadku prezentowanych metaheurystyk, wyniki wszystkich eksperymentów obliczeniowych wskazują, że dłuższy czas obliczeń z 60 na 600 sekund dla SA i GA poprawia wartość kryterium, w wybranych przypadkach o niemalże 450 dni.

Tabela 4.14: Średni czas trwania obliczeń (w sekundach) algorytmu NEH dla lokomotyw Škoda 31E, Dragon 2 i Pesa Gama 111Ed

$n$	$T^{(y)}$ [lata]	Škoda 31E	Dragon 2	Pesa Gama 111Ed
10	5	3	1	1
	6	4	1	1
	8	9	2	2
	9	13	2	3
	16	36	7	8
	17	35	8	8
	24	131	17	16
	25	220	18	19
20	5	16	6	6
	6	17	8	8
	8	32	14	13
	9	39	17	17
	16	129	53	51
	17	147	58	58
	24	298	120	115
	25	342	128	126
40	5	119	44	46
	6	181	62	66
	8	319	113	113
	9	390	139	145
	16	1397	435	573
	17	1338	489	925
	24	3159	1016	1034
	25	3525	1150	1134

Średnie czasy wykonania obliczeń algorytmu NEH dla badanych instancji zaprezentowano w Tabeli 4.14. Najdłuższe czasy można zaobserwować dla lokomotyw Škoda, która dla takich samych rozmiarów problemu, ma najwięcej przeglądów  $M$ . Wynika to z cyklu przeglądowo-naprawczego, który jest znacznie krótszy niż dla pojazdów Pesa i Dragon 2 (patrz Tabele 4.1, 4.3, 4.2). Mając na uwadze, że złożoność obliczeniowa NEH to  $O(T^2n^2 + TMKn^3)$  czyli de facto decyduje  $O(TMKn^3)$ , to czas obliczeń zależy przede wszystkim od liczby przeglądów  $M$ , których najwięcej w tym przypadku ma Škoda. Można zauważyć w Tabeli 4.14, że dla stałego  $T$ , między  $n$  a czasami obliczeń istnieje korelacja, która podąża za asymptotycznym wzrostem  $O(n^3)$ . Zastosowanie niniejszej metody w przypadku dużych instancji problemu, wiąże się z długim czasem oczekiwania na rozwiązanie. Przykładem może być harmonogram na 25 lat i 40 pojazdów Škoda 31E, gdzie na wynik należy odczekać prawie godzinę. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów, można dla takiej grupy instancji oszacować czasy działania NEH. Jednakże, dla innych danych wejściowych, czasy generowania rozwiązań przez tę metodę, mogą się bardzo różnić.

Analiza wyników eksperymentów numerycznych przeprowadzonych dla taboru homogenicznego wskazuje, że wśród zaproponowanych algorytmów dla modeli decyzyjnych planowania eksploatacji taboru, do najlepszych należą metaheurystyki SA600 i GA600 oraz heurystyka NEH. Z perspektywy otrzymanych wyników, czas trwania obliczeń zarówno dla SA i GA okazał się być kluczowy. Dłuższe działanie tych metod, pozwoliło na przejrzanie większej przestrzeni rozwiązań, w efekcie generując lepsze jakościowo wyniki. Warunek zatrzymania algorytmów metaheurystycznych był na tyle istotny, że te same metody tj. SA60 i GA60, ale działające krócej, dla większości przypadków pogarszały kryterium w porównaniu z heurystyką NEH. Należy podkreślić, że ustawienie harmonogramu początkowego  $S^*$  dla GA jest generowane przy użyciu SA z warunkiem zatrzymania 10 sekund. Algorytm GA działa w zupełnie inny sposób niż SA, ale rozwiązanie początkowe dla GA, może determinować pojawiające się podobne trendy w wynikach dla wybranych instancji. Rezultaty działania NEH potwierdzają, że jest ona bezkonkurencyjną heurystyką. Dla większości badanych instancji taboru homogenicznego, jest to również lepsza metoda niż SA60 i GA60. Rozpatrując efektywność czasową, należy uwzględnić że czas wykonania obliczeń przez NEH jest determinowany rozmiarem danych wejściowych. W rozpatrywanych przypadkach, zwrócono uwagę że przy stałym  $T$ , między  $n$  a czasami obliczeń istnieje korelacja, która podąża za asymptotycznym wzrostem  $O(n^3)$ . Możemy na tej podstawie jedynie szacować czas działania NEH, nie będzie on znany *a posteriori*, tak jak w przypadku metaheurystyk. Nawiązując do najgorzej działających metod tj. BH i BM2MH, prócz najniżej ocenianych wyników, to ich zasadniczą wadą jest planowanie przeglądów i napraw okresowych w zbliżonych terminach. W związku z tym, w zadanych okresach większość floty kolejowej może znajdować się na planowanym przeglądzie. Natomiast jakość dostarczanych przez BH i BM2MH rozwiązań świadczy o tym, że dla



wybranych instancji warto je zastosować, niż pozostając przy braku optymalizacji tj. podejściu FA. Czasy działania BH i BM2MH pominięto, ponieważ nie przekraczały one 25 milisekund w ramach rozpatrywanych instancji. Z perspektywy decydenta, są to znikome czasy oczekiwania na harmonogram, dlatego też ich nie uwzględniono. Podsumowując, dla zbadanych instancji taboru homogenicznego, jakość dostarczanych rozwiązań przez algorytmy heurystyczne (dla wybranych instancji) i metaheurystyczne (dla większości instancji) jest na dobrym poziomie. Rezultaty eksperymentów pokazały, że w każdym analizowanym przypadku, dla znakomitej większości metod przybliżonych, odnotowano wzrost dostępności floty, nawet kilkadziesiąt dni na lokomotywę. Dlatego też, zgodnie z twierdzeniem "no free lunch" (NFL)<sup>6</sup>, żaden pojedynczy algorytm nie jest uniwersalnie najlepszym algorytmem dla wszystkich rozpatrywanych problemów (w tym przypadku instancji). W związku z tym wydaje się, by dobrym podejściem było zastosowanie grupy zaprojektowanych algorytmów przybliżonych i wybranie lepszego rozwiązania dla rozważanego problemu planowania eksploatacji taboru homogenicznego z wielopoziomowymi przeglądami.

### Studium przypadku dla planowania eksploatacji heterogenicznego taboru kolejowego

W ostatniej części eksperymentów numerycznych analizowano rezultaty metod przybliżonych (Rozdział 3.5) dla mieszanych składów taboru kolejowego, złożonych z różnych typów lokomotyw, bazujących na pojazdach Škoda 31E (seria 181), E6ACTa Dragon 2 i Pesa Gama typu 111Ed (patrz Rozdział 4.1). Rozpatrywano trzy scenariusze, gdzie brano pod uwagę wszystkie wymienione typy lokomotyw jednocześnie, o udziale 50%, 25% i 25%. W zależności od scenariusza, połowę składu stanowi Škoda, Dragon 2 bądź Pesa Gama. Zaproponowane studium przypadku odzwierciedla warunki, kiedy to przedsiębiorstwa kolejowe nabywają (np. w drodze zakupu, kredytu, leasingu) zestaw pojazdów kolejowych różnego typu np. [129, 133, 134], bądź po przeprowadzeniu modernizacji floty (przeгляд poziomu P5) [86, 133, 135, 161], planując harmonogramy eksploatacji tych pojazdów.

Rozważmy następujące grupy  $n \in \{20, 40, 60\}$  lokomotyw, dla których to zbadano okresy  $T \in \{60, 72, 96, 108, 192, 204, 288, 300\}$ , stanowiące  $T^{(y)} \in \{5, 5 + 1, 8, 8 + 1, 16, 16 + 1, 24, 24 + 1\}$  lat. Uzasadnienie wyboru horyzontów czasowych dla harmonogramów stanowią przesłanki związane z funkcjonowaniem przedsiębiorstw kolejowych oraz wynikają z najkrótszych pełnych cykli przeglądowo-naprawczych analizowanych pojazdów. W tym przypadku jest to Škoda 31E i Pesa 111Ed. Celem dodatkowego roku jest uwzględnienie działań konserwacyjnych związanych z najwyższym poziomem prze-

---

<sup>6</sup> Koncepcja NFL Davida Wolperta i Williama Macready'ego prezentuje powiązania pomiędzy efektywnymi algorytmami optymalizacyjnymi a problemami, które rozwiązują [183]. Udowodniono, że dowolne dwa algorytmy są równoważne, gdy ich wydajność jest uśredniona dla wszystkich możliwych problemów.

glądów tych pojazdów, bazującym na  $TBM_k^f$ , aby zapobiec zniekształceniu analizy. Brano pod uwagę te same zadania przewozowe  $j \in J$ , jak dla floty homogenicznej. Przypomnijmy, że zadania charakteryzowały się rzeczywistymi średnimi dziennymi przebiegami  $w_j \in \{400, 500, 600, 700, 800\}$  km, które odnoszą się do średniego przebiegu na miesiąc (około 30 dni) z zakresu  $\{12000, \dots, 24000\}$  km. Dodatkowo dzielą się one na  $G = \lceil n/2 \rceil$  grup, które łączy to samo  $w_j$  tak, że wartości są proporcjonalnie rozłożone zgodnie z  $G$ , np. dla  $G = 5$  mamy  $(w_1 = w_2, w_3 = w_4, w_5 = w_6, w_7 = w_8, w_9 = w_{10}) = (400, 500, 600, 700, 800)$  itd.

Wyniki metod przybliżonych, konsekwentnie zostaną porównane z ustalonym przydziałem zadań do pojazdów (FA) w każdym okresie  $t \in \{1, \dots, T\}$ , według następującego wzoru:  $\Delta(A) = Q(S^A) - Q(S^{FA})$ , gdzie  $Q(S^A)$  jest wartością kryterium dla harmonogramu dostarczonym przez algorytm  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  oraz  $Q(S^{FA})$  jest stałym przydziałem zadań do pojazdów (FA) w każdym miesiącu w  $T$ . Z praktycznego punktu widzenia FA zakłada, że zadania o najwyższej wartości  $w_j$  są domyślnie przydzielone kolejno do pojazdów Dragon 2 i Pesa Gama, które mają dłuższe cykle przeglądowo-naprawcze niż Škoda 31E.

Rezultaty eksperymentów obliczeniowych dla poszczególnych scenariuszy, gdzie połowę składu taboru stanowi Škoda 31E seria 181 prezentuje Tabela 4.15, dla E6ACTa Dragon 2 patrz Tabela 4.16, natomiast dla lokomotywy Pesa Gama typu 111Ed pokazuje Tabela 4.17. Otrzymane rozwiązania podano w przybliżeniu do liczb całkowitych. Dla przejrzystej identyfikacji poszczególnych grup taboru heterogenicznego, wprowadzono następujące oznaczenia wywodzące się od przeważającego typu taboru w grupie:

- SDP – dla floty 50% lokomotyw Škoda 31E (seria 181), 25% lokomotyw E6ACTa Dragon 2 oraz 25% lokomotyw Pesa Gama 111Ed,
- DSP – dla 50% lokomotyw E6ACTa Dragon 2, 25% lokomotyw Škoda 31E (seria 181) oraz 25% lokomotyw Pesa Gama 111Ed,
- PSD – 50% lokomotyw Pesa Gama 111Ed, 25% lokomotyw E6ACTa Dragon 2 oraz 25% lokomotyw Škoda 31E (seria 181).

Na początku, warto zauważyć że w 24-letnim horyzoncie czasowym dla  $n = 20$  lokomotyw i związanych z nimi obciążeń, nawet bez żadnej optymalizacji, mamy  $Q(S^{FA}) = 158526$  dni całkowitej dostępności dla floty SDP,  $Q(S^{FA}) = 163250$  dni dla grupy DSP i  $Q(S^{FA}) = 164070$  dni dla PSD, co daje kolejno około 330, 340 i 341 dni w roku na lokomotywę. Rozpatrywanie razem taboru różnych typów, nawet bez optymalizacji, umożliwia osiągnięcie większej dostępności floty, niż w przypadku analizowania tej samej grupy w oddzielnych zestawach np. według typów lokomotyw. Oszacowano na podstawie wyników dotyczących floty homogenicznej (patrz Tabele 4.11, 4.12, 4.13), że dla takiego samego składu floty (ten sam  $T$ ,  $n$  i udział poszczególnych typów lokomotyw), średnia dostępność lokomotyw określona na podstawie indywidualnych wartości według typu wy-

Tabela 4.15: Zwiększenie dostępności  $\Delta(A)$  uzyskane przez algorytmy  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  w odniesieniu do  $Q(S^{FA})$  dla instancji opartych na heterogenicznej grupie taboru złożonej z 50% lokomotyw Škoda 31E (seria 181), 25% lokomotyw E6ACTa Dragon 2 oraz 25% lokomotyw Pesa Gama 111Ed, grupa SDP

$n$	$T^{(y)}$ [lata]	FA $f(S^{FA})$	BH $\Delta(BH)$	BM2MH $\Delta(BM2MH)$	NEH $\Delta(NEH)$	SA60 $\Delta(SA60)$	SA600 $\Delta(SA600)$	GA60 $\Delta(GA60)$	GA600 $\Delta(GA600)$
20	5	33498	-9	-48	309	249	263	248	248
	6	40324	-534	-46	29	12	16	25	26
	8	53537	-785	-288	406	34	66	7	8
	9	60180	-729	63	78	284	312	76	76
	16	105980	-955	-377	695	61	73	319	329
	17	112796	-1483	-403	-2	21	25	14	15
	24	158526	-2077	-215	571	188	190	98	102
	25	165275	-2022	-246	243	89	97	148	151
40	5	66997	-17	-97	617	353	613	421	437
	6	80648	-1068	-92	58	15	19	716	720
	8	107073	-1570	-576	812	17	17	9	12
	9	120359	-1457	125	156	529	632	129	134
	16	211961	-1911	-754	1390	139	157	210	592
	17	225592	-2967	-807	-5	109	14	15	16
	24	317051	-4154	-430	1141	214	221	118	158
	25	330549	-4045	-492	485	195	211	265	267
60	5	100505	107	136	1289	966	1305	709	739
	6	119695	309	1451	1869	1473	1631	1307	1359
	8	159395	-430	3003	3419	1423	1890	117	342
	9	179114	321	2087	2285	2004	2496	561	728
	16	315934	215	3948	5784	2321	11969	893	11469
	17	336396	-99	2037	5418	1096	2342	118	247
	24	472522	-1641	3047	7344	1031	2437	428	945
	25	492481	-1404	4216	7052	676	2306	727	791

nosiłaby kolejno 327, 338 i 339 dni w roku na lokomotywę. Sztucznie utworzone grupy SDP, DSP i PSD, tracą na każdej lokomotywie po kolei 3, 2 i 2 dni rocznie. Przedsiębiorstwa kolejowe, są tego świadome, dlatego też w ramach możliwości układają harmonogramy dla heterogenicznego taboru, który jest w ich posiadaniu i ma on realizować zadania przewozowe. Jest to podejście ekonomicznie uzasadnione.

Wyniki eksperymentów dla floty heterogenicznej (patrz Tabele 4.15, 4.16, 4.17) pokazują, że dla znakomitej większości przypadków odnotowano wzrost dostępności floty dla planów ich eksploatacji przy użyciu zaproponowanych algorytmów przybliżonych. Dla badanych instancji uzyskano nawet kilkadziesiąt dni dodatkowej dostępności na lokomotywę. Potwierdza to między innymi 5-letni harmonogram i  $n = 20$ , gdzie przy zastosowaniu algorytmu SA600 zyskano około 22 dni dodatkowej gotowości operacyjnej na lokomotywę dla grupy DSP (Tabela 4.16). Z kolei dla  $T = 6$  i floty liczącej 40 lokomotyw, dla NEH dostępność wzrosła o ponad 27 dni na lokomotywę w grupie PSD (Tabela 4.17). Natomiast dla takiego samego okresu i metody, ale dla  $n = 60$  i odnotowano ponad 31 dodatkowych dni dostępności na pojazd z grupy SDP (Tabela 4.15).

Tabela 4.16: Zwiększenie dostępności  $\Delta(A)$  uzyskane przez algorytmy  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  w odniesieniu do  $Q(S^{FA})$  dla instancji opartych na heterogenicznej grupie taboru złożonej z 50% lokomotyw E6ACTa Dragon 2, 25% lokomotyw Škoda 31E (seria 181) oraz 25% lokomotyw Pesa Gama 111Ed, grupa DSP

$n$	$T^{(y)}$ [lata]	FA $f(S^{FA})$	BH $\Delta(BH)$	BM2MH $\Delta(BM2MH)$	NEH $\Delta(NEH)$	SA60 $\Delta(SA60)$	SA600 $\Delta(SA600)$	GA60 $\Delta(GA60)$	GA600 $\Delta(GA600)$
20	5	34495	194	444	453	445	448	417	422
	6	41299	-449	-50	344	316	316	249	272
	8	55114	-563	179	199	48	173	42	98
	9	61881	-499	-33	186	309	328	305	328
	16	109058	-521	443	588	86	166	68	127
	17	116190	-898	-545	515	22	47	12	21
	24	163250	-1659	-163	476	88	187	22	32
	25	169954	-1331	-310	406	141	177	97	104
40	5	68940	438	937	956	894	911	706	716
	6	82366	-665	133	922	628	653	478	482
	8	109743	-641	842	883	333	469	112	223
	9	122667	97	97	1466	1300	1442	809	866
	16	217337	-263	1665	1955	307	623	117	217
	17	231261	-676	31	2150	221	426	58	67
	24	324865	-1684	1308	2586	393	587	365	366
	25	338403	-1157	885	2317	389	836	147	177
60	5	103474	593	1342	1371	807	1278	852	914
	6	123972	-1421	-224	959	658	756	280	762
	8	164565	-912	1312	1373	334	623	114	228
	9	183909	236	1635	2291	1673	1972	1231	1256
	16	326164	-553	2339	2774	252	562	321	330
	17	346544	392	392	3571	192	533	119	319
	24	487805	-3034	1454	3371	185	495	108	255
	25	507980	-2110	952	3100	1362	1704	720	834

W celu lepszego odzwierciedlenia otrzymanych rezultatów dotyczących floty heterogenicznej, na Rysunkach 4.14, 4.15, 4.16, zaprezentowano wyniki poszczególnych metod dla floty liczącej 40 pojazdów dla wszystkich analizowanych grup. Porównując rezultaty działania zaprojektowanych algorytmów, niniejsza wizualizacja pokazuje, że NEH klasyfikuje się jako najlepsza metoda, a BH jako ta o najgorszych wynikach. Dla badanej floty heterogenicznej, niniejsze heurystyki osiągnęły skrajne wartości. Starta dostępności floty jest szczególnie widoczna dla grupy SDP, gdzie w przewadze są lokomotywy Škoda 31E (patrz Rysunek 4.14). Natomiast przy zastosowaniu algorytmu NEH dla harmonogramów eksploatacji grupy PSD, gdzie dominują lokomotywy Pesa Gama 111Ed, można osiągnąć wysoki poziom dostępności operacyjnej floty (patrz Rysunek 4.16). Na prezentowanych wykresach wyróżnia się również ostatnia heurystyka tj. BM2MH, która generuje również dobre wyniki, szczególnie w odniesieniu do grupy DSP, gdzie w większości są lokomotywy Dragon 2 (patrz Rysunek 4.15).

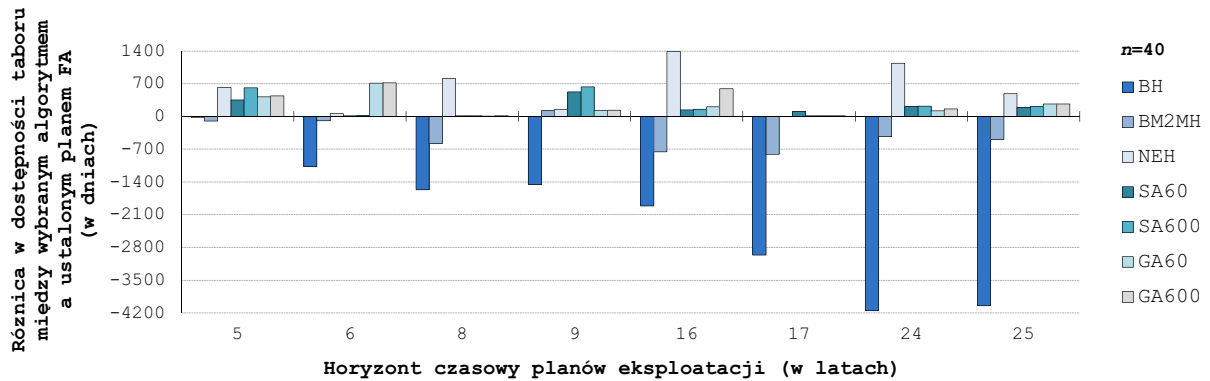
Analiza wyników poszczególnych instancji dla wszystkich rozpatrywanych grup, potwierdza jednoznacznie przewagę algorytmu NEH nad innymi proponowanymi metodami

Tabela 4.17: Zwiększenie dostępności  $\Delta(A)$  uzyskane przez algorytmy  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  w odniesieniu do  $Q(S^{FA})$  dla instancji opartych na heterogenicznej grupie taboru złożonej z 50% lokomotyw Pesa Gamma 111Ed, 25% lokomotyw E6ACTa Dragon 2 oraz 25% lokomotyw Škoda 31E (seria 181), grupa PSD

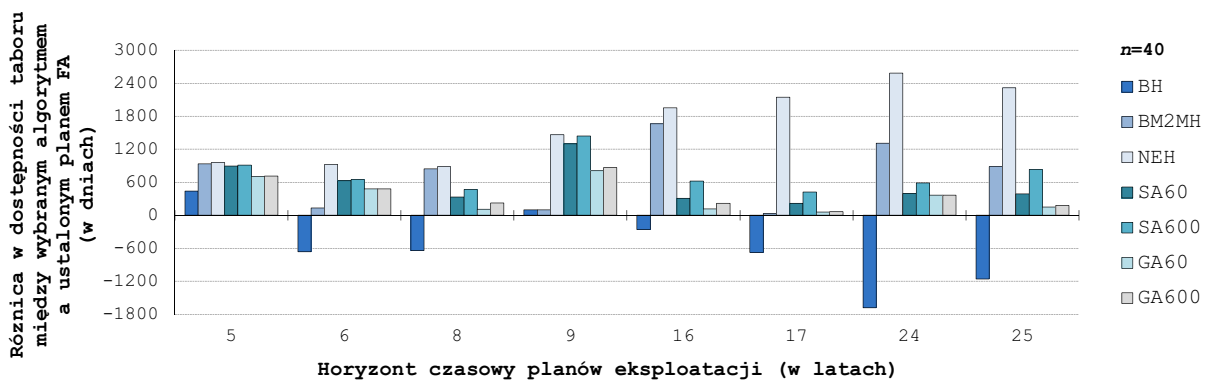
$n$	$T^{(y)}$ [lata]	FA $f(S^{FA})$	BH $\Delta(BH)$	BM2MH $\Delta(BM2MH)$	NEH $\Delta(NEH)$	SA60 $\Delta(SA60)$	SA600 $\Delta(SA600)$	GA60 $\Delta(GA60)$	GA600 $\Delta(GA600)$
20	5	34652	122	374	383	370	378	359	364
	6	41642	-444	-42	293	337	417	250	275
	8	55510	-621	123	139	109	118	95	104
	9	62319	-494	-35	150	301	307	48	51
	16	109625	-675	261	431	277	282	140	143
	17	116755	-1046	-427	311	47	47	309	452
	24	164070	-1718	-214	595	67	158	298	320
	25	170787	-1402	-278	793	413	415	112	115
40	5	69338	208	712	731	513	706	458	465
	6	82776	-379	424	1095	687	788	575	607
	8	110051	-273	1214	1247	552	752	139	199
	9	123492	158	1077	1447	1322	1465	695	704
	16	217928	-29	1843	2184	741	1072	212	442
	17	232056	-639	600	2076	622	829	318	581
	24	326066	-1362	-1362	3264	354	795	198	410
	25	339542	-773	1476	3617	560	1152	412	474
60	5	103889	430	1187	1215	890	1118	732	800
	6	124492	-896	308	1315	608	752	277	331
	8	165524	-857	1374	1423	411	637	178	265
	9	185384	90	1469	2024	1466	1810	811	893
	16	327403	-554	2254	2765	535	941	166	192
	17	348168	-1043	816	3030	372	800	250	287
	24	489807	-2751	1762	4187	588	994	428	497
	25	509823	-1670	1703	4915	2018	3709	1329	1562

optymalizacji. W planach eksploatacji taboru heterogenicznego, gdzie zastosowano niniejszą heurystykę, osiągnięto dla większości przypadków największą liczbę dni dostępności pojazdów. Przykład może stanowić instancja dla 60 lokomotyw z grupy PSD, gdzie dla wszystkich badanych okresów, tj.  $T^{(y)} \in \{5, 6, 8, 9, 16, 17, 24, 25\}$  lat, NEH generuje najlepsze wyniki spośród analizowanych metod przybliżonych (Tabela 4.17). Następnym przykładem, w ramach grupy DSP (Tabela 4.16), zarówno dla  $n = 40$  i  $n = 60$ , dla wszystkich analizowanych okresów  $T$ , metoda NEH działa najlepiej. W dotychczasowych eksperymentach numerycznych, nie zdarzyło się by jedna metoda była najlepsza dla całego zestawu instancji. Widocznie wybrane przykłady taboru heterogenicznego sprzyjają w ustaleniu harmonogramów cząstkowych, które są wysoko oceniane, i determinują ostateczne rozwiązanie końcowe. Natomiast metaheurystyki SA i GA, w wyznaczonym czasie 60 i 600 sekund, nie są w stanie poprawić losowego harmonogramu początkowego w taki sposób, by dostarczać lepsze rozwiązania od uzyskanego przez NEH.

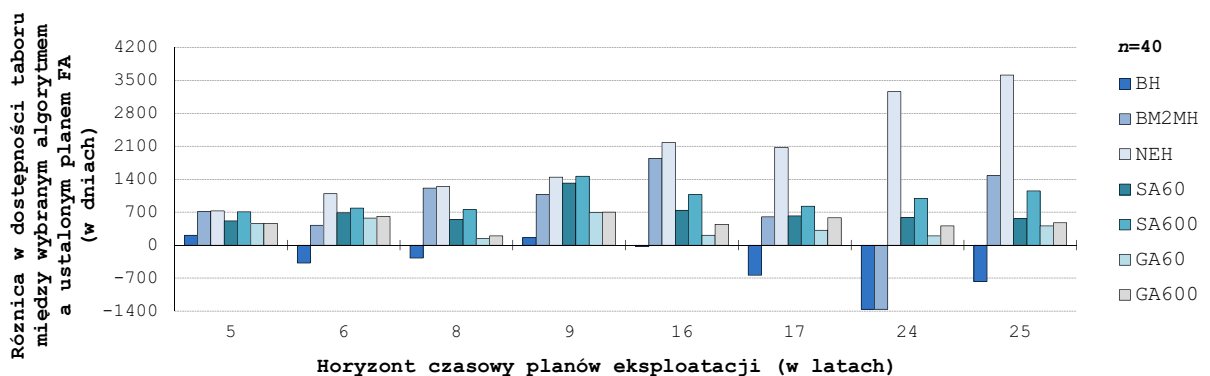
Największą dostępność dla floty heterogenicznej, prócz algorytmu NEH, pozwala osiągnąć SA. Wersja SA600, podobnie jak dla floty homogenicznej, we wszystkich badanych



Rysunek 4.14: Wyniki eksperymentów dla 40 lokomotyw, w tym 50% lokomotyw Škoda 31E (seria 181), 25% lokomotyw E6ACTa Dragon 2 oraz 25% lokomotyw Pesa Gama 111Ed. Zwiększenie dostępności  $\Delta(A)$  uzyskane przez algorytmy  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  w odniesieniu do  $Q(S^{FA})$



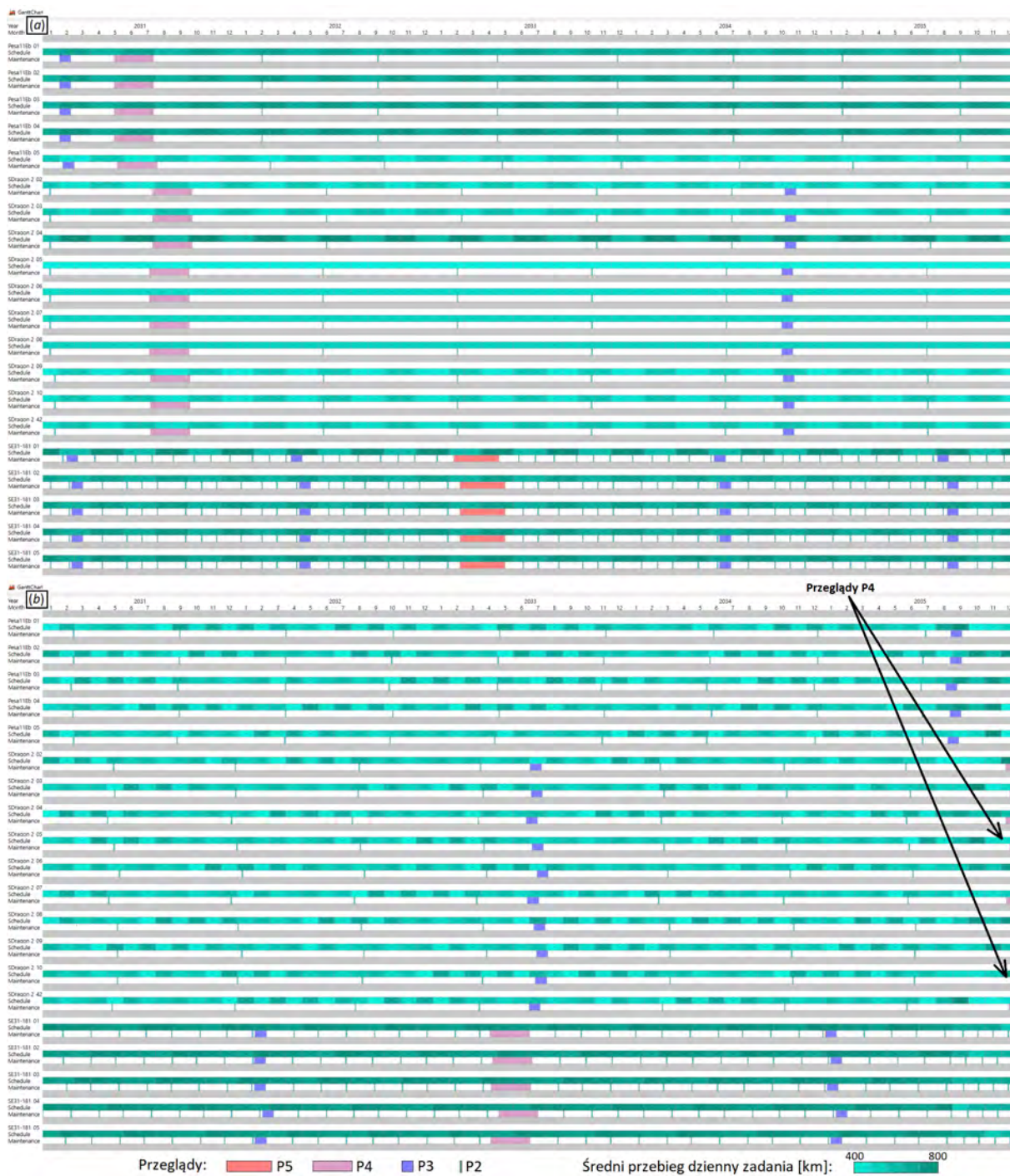
Rysunek 4.15: Wyniki eksperymentów dla 40 lokomotyw, w tym 50% lokomotyw E6ACTa Dragon 2, 25% lokomotyw Škoda 31E (seria 181) oraz 25% lokomotyw Pesa Gama 111Ed. Zwiększenie dostępności  $\Delta(A)$  uzyskane przez algorytmy  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  w odniesieniu do  $Q(S^{FA})$



Rysunek 4.16: Wyniki eksperymentów dla 40 lokomotyw, w tym 50% lokomotyw Pesa Gama 111Ed, 25% lokomotyw E6ACTa Dragon 2 oraz 25% lokomotyw Škoda 31E (seria 181). Zwiększenie dostępności  $\Delta(A)$  uzyskane przez algorytmy  $A \in \{BH, BM2MH, NEH, SA60s, SA600s, GA60s, GA600s\}$  w odniesieniu do  $Q(S^{FA})$

przypadkach zwraca lepsze wyniki niż SA60. W harmonogramach eksploatacji taboru, gdzie zastosowano niniejsze algorytmy, osiągnięto dla wybranych przypadków największą liczbę dni dostępności pojazdów. Potwierdzają to między innymi harmonogramy dla 9 lat i  $n = 20$ , gdzie w wyniku działania SA60 zyskano 284 dni, a dla SA600, 312 dni dodatkowej dostępności w ramach grupy SDP (Tabela 4.15). Inne metody w tym przypadku, generowały co najwyżej kilkadziesiąt dni gotowości operacyjnej w analizowanym harmonogramie. Inny przykład może stanowić instancja dla  $T = 6$  i 20-stu lokomotyw, gdzie przy zastosowaniu SA60 osiągnięto 337 dni, a dla SA600 417 dni wzrostu gotowości operacyjnej floty z grupy PSD (Tabela 4.17).

W poszukiwaniu najlepszych metod, spośród zaproponowanych algorytmów, równie dobre wyniki generuje GA600 oraz BH2MH. GA600 szczególnie dobrze działa dla instancji 20 i 40 lokomotyw, niezależnie od grupy, a także w ramach całej grupy SDP, np. dla 40 lokomotyw i  $T = 6$ , pozwala na uzyskanie dodatkowej dostępności w wymiarze 720 dni. Dla tego samego przykładu, GA60 generuje 716 dni, co klasyfikuje ten wynik do drugiego najlepszego w ramach analizowanej instancji. Jednakże algorytm GA60 działa znacznie gorzej, niż heurystyka BH2MH. Świadczą o tym wyniki, na przykład dla grupy DSP, gdzie dla znakomitej większości rozpatrywanych przypadków BH2MH wygenerował drugie najlepsze rozwiązanie, zaraz po NEH (patrz Tabela 4.16). Działanie algorytmu BH2MH jest równie dobre dla dużych instancji problemu, gdzie jest rozpatrywana flota 60 pojazdów dla taboru heterogenicznego (patrz Tabele 4.15, 4.16, 4.17). Mimo bardzo dobrych rezultatów, to podobnie jak w przypadku floty homogenicznej, BH2MH ustala zbliżone terminy przeglądów tego samego poziomu w harmonogramie. Przykładem może być instancja, dla 16-letniego planu i 20 lokomotyw w grupie DSP (patrz Rysunek 4.17, (b)). Zaprezentowane 5 ostatnich lat harmonogramu pokazuje, że dla wszystkich lokomotyw przeglądy poziomu P3 i P4 zaplanowano niemalże w tym samym czasie. Dotyczy to również przeglądów P4, których termin zakończenia jest poza okresem symulacji. Porównując harmonogramy optymalizacji dla BH2MH a BH dla tej samej instancji (Rysunek 4.17), widać że dla BH zaplanowano więcej przeglądów poziomu P3 i P4 oraz pojawiły się P5. Sposób działania obydwu metod, polegający na równomiernym bilansowaniu obciążenia pojazdów zadaniami transportowymi, powoduje zbieżności terminów planowanych przeglądów w ramach jednego typu taboru. Jednakże warunek przypisania zadań, który dla BH jest określony bilansowaniem bieżącego przebiegu pojazdów, w efekcie daje najgorsze rozwiązania dla wszystkich instancji. Natomiast dla BH2MH przypisanie zadań wiąże się z bilansowaniem pozostałego przebiegu pojazdów, do przeglądu o najwyższym poziomie dla danej floty. Dla heterogenicznego taboru, takie działanie algorytmu w rezultacie pozwala na uzyskanie dodatkowej dostępności dla większości rozpatrywanych instancji. Przykład może stanowić instancja, dla której harmonogramy zaprezentowano na Rysunku 4.17, gdzie BH generuje straty w wysokości 521 dni, a przy BH2MH można zyskać 443 dni dodatkowej dostępności dla rozpatrywanych lokomotyw (patrz Tabela 4.16).



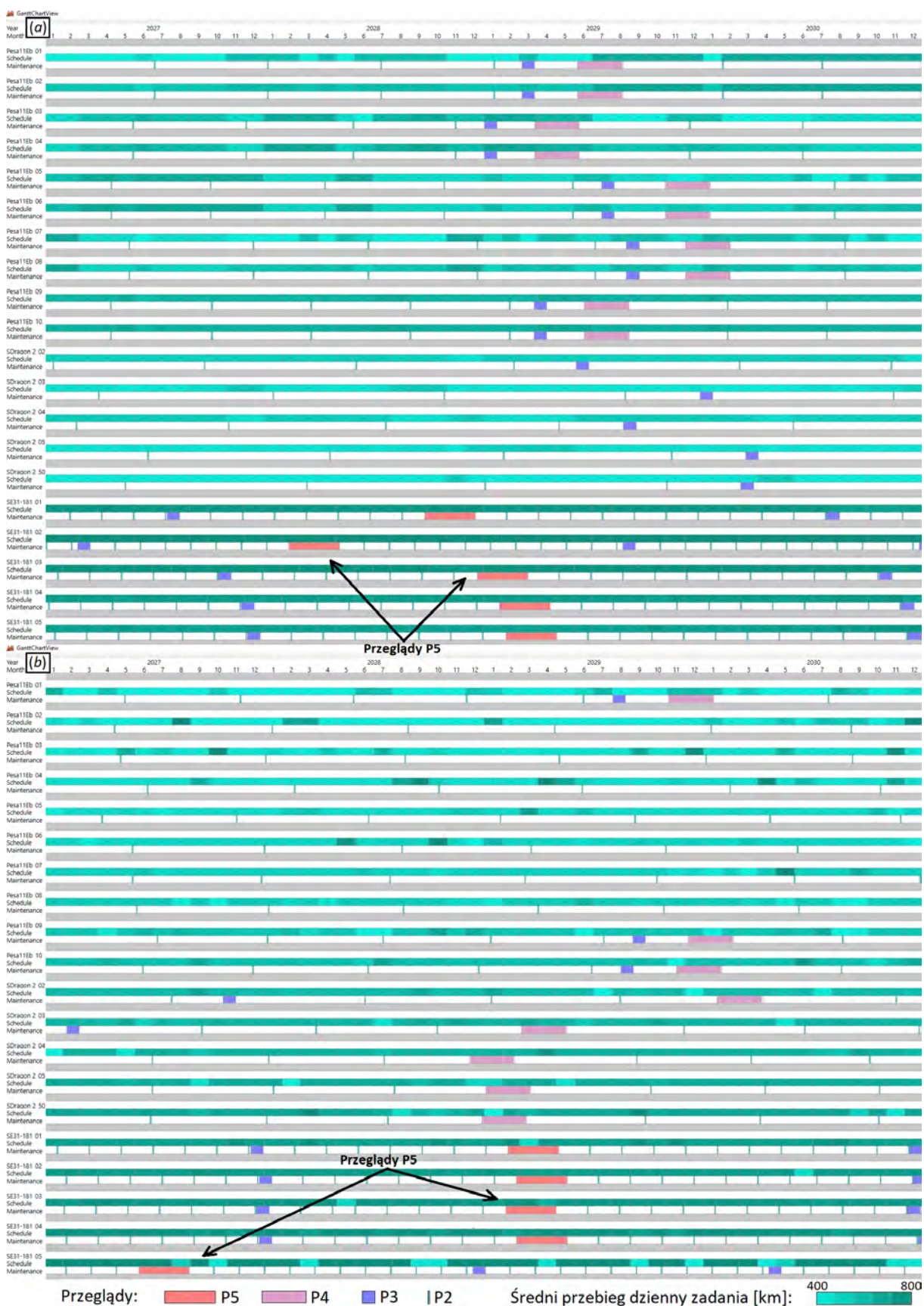
Rysunek 4.17: Porównanie planów eksploatacji dwudziestu lokomotyw w grupie taboru złożonego z 50% lokomotyw E6ACTa Dragon 2, 25% lokomotyw Škoda 31E (seria 181) oraz 25% lokomotyw Pesa Gama 111Ed (grupa DSP). Harmonogram po optymalizacji dla 5 ostatnich z 16 lat, dla algorytmów: (a) BH, (b) BM2MH

W celu porównania dwóch najlepiej działających metod przybliżonych tj. NEH i SA600, przeprowadzono analizę harmonogramów powstałych na bazie tych algorytmów. Przedsiębiorstwo transportu kolejowego dzierżawi 20 lokomotyw różnego typu, o składzie odpowiadającym grupie PSD, gdzie przeważają pojazdy Pesa Gama 111Ed. Cykle przeglądowo-naprawcze, przebiegi oraz zadania przewozowe są takie same, jakie rozważano

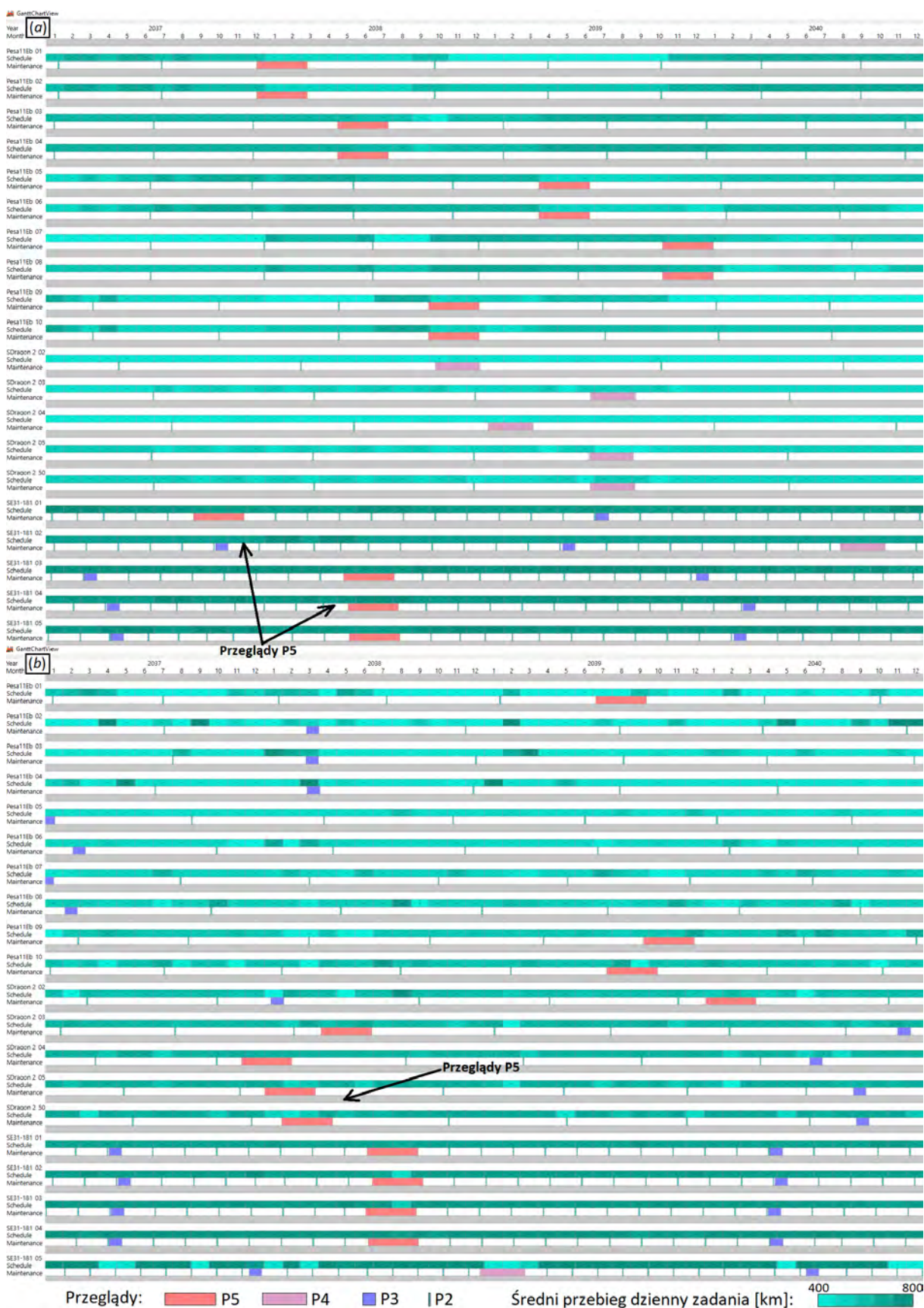


dla floty heterogenicznej. W ramach umowy dzierżawy, przedsiębiorstwo jest zobowiązane do wykonywania przeglądów i napraw okresowych poziomu P1, P2 i P3 we własnym zakresie. Natomiast wydierżawiający musi zapewnić wykonanie czynności utrzymaniowych poziomu P4 i P5. Umowa dzierżawy jest zawarta na 25 lat, z możliwością zmiany warunków za zgodą obu stron oraz z 3-miesięcznym okresem wypowiedzenia (przykład takiej umowy [138]). Przedsiębiorstwo przy zastosowaniu dwóch proponowanych w niniejszej pracy algorytmów dla modeli decyzyjnych, wygenerowały harmonogramy eksploatacji dzierżawionych lokomotyw na cały okres zgodny z umową. Na Rysunkach 4.18, 4.19 zaprezentowano powstałe harmonogramy (wybranych 4-letnich okresów) w środowisku do symulacji. Niestety z przyczyn technicznych, nie można pokazać całych harmonogramów, ponieważ byłyby nieczytelne. Dla przejrzystości, powstałe harmonogramy nie prezentują przeglądów P1. Analizując i porównując harmonogramy w wyniku zastosowania metod NEH i SA600, można zaobserwować że dla NEH przeglądów poziomu P3 jest znacznie więcej, dokładnie 113, niż dla harmonogramu SA600 tj. 103. Natomiast przeglądów poziomu P4 i P5 dla tego przypadku, więcej zaplanowano dla planów w wyniku działania SA600, gdzie  $P4=50$  i  $P5=26$ . Dla NEH jest to kolejno 40 i 20 przeglądów. Rozpatrując terminy przeglądów, najwcześniejszy termin (tj. 7.06.2027 r.) planowanego P5 odnotowano w harmonogramie SA600 dla lokomotywy Škoda (patrz Rysunek 4.18). Jednakże analiza kolejnych przeglądów P5 wskazuje, że następne cztery przeglądy P5, są ustalone wcześniej w harmonogramie NEH. Z perspektywy przedsiębiorstwa, które ponosi koszty przeglądów i napraw okresowych do P3, zdecydowanie lepszy wydaje się być harmonogram przy użyciu SA600. Dla wydierżawiającego, ekonomicznie uzasadniony byłby harmonogram powstały na bazie heurystyki NEH. Ponadto, jeżeli koszty wszystkich przeglądów dzierżawionych lokomotyw ponosiłoby przedsiębiorstwo, w przypadku innej umowy, warte rozważenia byłaby wymiana bądź usunięcie lokomotyw Škoda z floty dzierżawionych pojazdów, przed terminem ich grupowych przeglądów P5. Metoda SA600 pozwala opóźnić ten termin do około stycznia 2029 roku, a dla NEH takie działania należałoby przyspieszyć do sierpnia 2028 roku (Rysunek 4.18).

W kolejnych okresach 25 – letnich harmonogramów, tj. od 2037 do 2040 roku (patrz Rysunek 4.19), zwrócono uwagę na sposób planowania przeglądów. W harmonogramie NEH, znakomita większość przeglądów jest ustalana dla kilku pojazdów jednocześnie np. P5, P4 i P3. Dla SA600 zdarzają się takie przeglądy, np. P5 i P3, ale są to mniej spotykane sytuacje dla całego harmonogramu, szczególnie w odniesieniu do P5. Nakładanie się tych terminów, jest utrudnieniem szczególnie dla przeglądów wysokiego poziomu, a ten stan występuje znacznie częściej dla metody NEH niż SA600. Dlatego też wykluczenie większych grup lokomotyw, które w tym czasie muszą przejść przegląd w warsztacie, to kolejny ważny aspekt, przemawiający na korzyść metody SA600. Dodatkowo przeglądy P5 dla pojazdów Škoda i Pesa Gama są w większości planowane wcześniej w harmonogramie NEH (patrz Rysunek 4.19).



Rysunek 4.18: Porównanie planów eksploatacji dwudziestu lokomotyw w grupie taboru złożonego z 50% lokomotyw Pesa Gama 111Ed, 25% lokomotyw E6ACTa Dragon 2 oraz 25% lokomotyw Škoda 31E (seria 181), (grupa PSD). Harmonogram po optymalizacji dla 4 z 25 lat, dla algorytmów: (a) NEH, (b) SA600



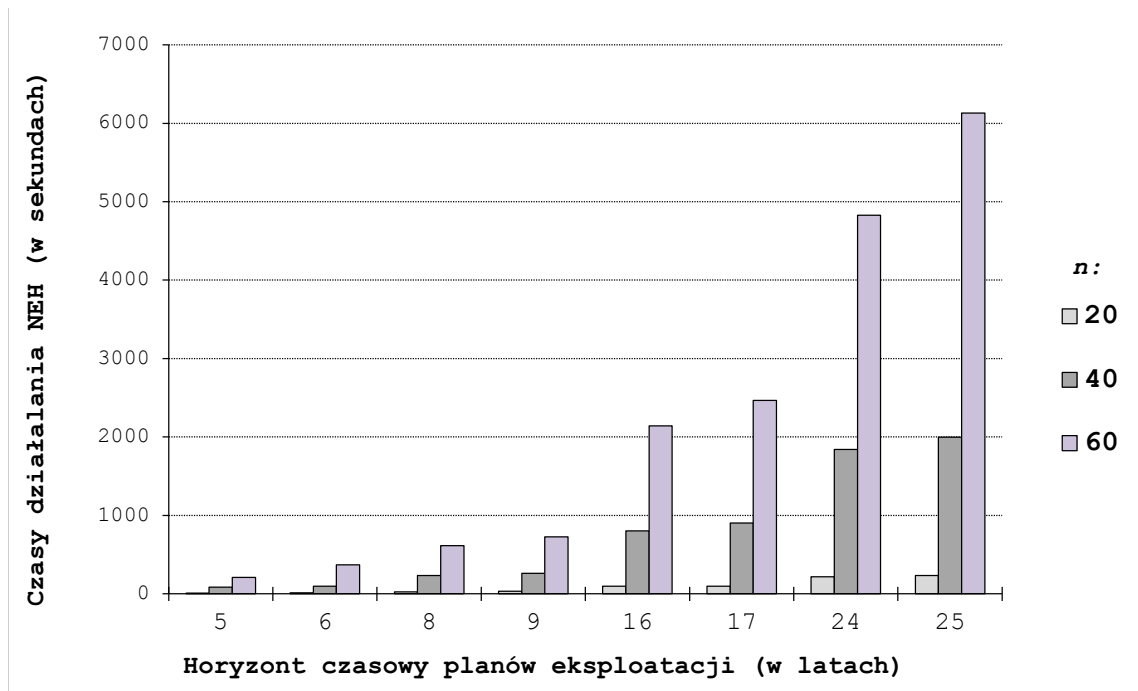
Rysunek 4.19: Porównanie planów eksploatacji dwudziestu lokomotyw w grupie taboru złożonego z 50% lokomotyw E6ACTa Dragon 2, 25% lokomotyw Škoda 31E (seria 181) oraz 25% lokomotyw Pesa Gama 111Ed (grupa DSP). Harmonogram po optymalizacji dla 5 ostatnich z 16 lat, dla algorytmów: (a) BH, (b) BM2MH

Natomiast przewaga tej heurystyki nad SA600, dla analizowanej instancji, polega na braku przeglądów P5 dla Dragon 2. W harmonogramie na bazie SA600, każdy z tych pojazdów ma zaplanowany jeden przegląd P5. Analizując wartość kryterium dla przygotowanych harmonogramów, dla NEH dostępność taboru zwiększyła się o 793 dni, a dla SA600 to 415 dni. Algorytm NEH dla rozpatrywanej instancji generuje lepsze rozwiązanie, choć ma wady w postaci nakładających się terminów przeglądów dla różnych lokomotyw i wcześniej wykonywanych przeglądów P5 dla większości floty. Przedsiębiorstwo stosując zaprojektowane metody, osiągnie znaczącą gotowość operacyjną lokomotyw. Dodatkowo, po przeprowadzeniu eksperymentów symulacyjnych dla wybranych przypadków, decydent może zweryfikować takie informacje jak m.in.:

- do kiedy eksploatacja floty przebiega bez konieczności wykonania przeglądów danego poziomu i ponoszenia w związku z tym dodatkowych kosztów,
- w jakim okresie warto sprzedać bądź zmienić u dzierżawcy, leasingodawcy określone pojazdy, by uniknąć przeglądów wysokiego poziomu,
- jaki typ pojazdów zaangażować spośród dostępnej floty do określonych zadań transportowych, by zminimalizować liczbę przeglądów i napraw okresowych.

Wybór najlepszego algorytmu w ramach rzeczywistych przypadków, jest determinowany wieloma przesłankami, w tym określoną sytuacją decyzyjną, a także celami, możliwościami i warunkami funkcjonowania przedsiębiorstwa.

Nawiązując do czasów działania metod przybliżonych dla floty heterogenicznej, rozpatrywano wyłącznie NEH. Heurystyki BH i B2MH pominięto, ponieważ ich czas rozwiązania dużych instancji był poniżej 4 minut, jest to mniej w porównaniu z praktyką gospodarczą. Natomiast czasy wykonania obliczeń dla metaheurystyk są znane *a posteriori*. Czasy działania NEH dla instancji pojazdów z grupy SDP (patrz Rysunek 4.20) potwierdzają jego złożoność obliczeniową  $O(T^2n^2 + TMKn^3)$ . Należy zauważyć, że nawet jeśli składowa  $TMKn^3$  wyznacza czasy działania, to nie są one zwiększane proporcjonalnie w zależności od horyzontu czasowego  $T$ . Na przykład, zwiększenie  $T$  z 8 do 16 lat powoduje, że czasy działania nie rosną 2-krotnie, lecz 4-krotnie (bliska zależność kwadratowa). Wynika to ze współczynnika  $O(MK)$  złożoności obliczeniowej pakietu symulacyjnego RRR, który zależy od liczby wykonywanych przeglądów  $M$  i zwykle rośnie wraz z  $T$ , biorąc udział w obliczeniu wartości kryterium (Rozdział 3.5.1), co przekłada się na kwadratową zależność pomiędzy  $T$  a czasami obliczeń NEH. Ponadto, dla stałego  $T$ , zależność między  $n$  a czasami obliczeń wydaje się podążać za asymptotycznym wzrostem  $O(n^3)$ . Pominięto kolejne analizy dla grup DSP i PSD, ponieważ wyniki eksperymentów wskazały ten sam trend co dla SDP, dotyczący wzrostu czasu obliczeń algorytmu NEH względem danych wejściowych.



Rysunek 4.20: Średni czas trwania obliczeń (w sekundach) algorytmu NEH dla heterogenicznej grupy taboru złożonej z 50% lokomotyw Škoda 31E (seria 181), 25% lokomotyw E6ACTa Dragon 2 oraz 25% lokomotyw Pesa Gama 111Ed, grupa SDP

Rezultaty przeprowadzonych badań dotyczących taboru heterogenicznego wskazują, że wśród zaproponowanych algorytmów dla opracowanych modeli, do najlepszych należą heurystyka NEH oraz metaheurystyki SA600 i SA60. Największą dostępność floty pozwala osiągnąć NEH, który podobnie jak inne heurystyki tj. BH i BM2MH, ma wadę w postaci wyznaczania zbliżonych terminów przeglądów tego samego poziomu w harmonogramie. Z kolei algorytm GA600 generował dla badanych instancji gorsze wyniki od SA60. Jest to spowodowane brakiem możliwości poprawy harmonogramu początkowego w ciągu 600 sekund w taki sposób, by dostarczyć lepsze rozwiązania od uzyskanego przez SA w krótszym czasie tj. 60 sekund. Należy zauważyć, że jakość dostarczanych rozwiązań przez heurystykę BM2MH jest lepsza od rozwiązań wygenerowanych przez GA60. Przypomnijmy, że ta sama heurystyka dla badań dotyczących taboru homogenicznego, została zaklasyfikowana do najgorzej działających metod. Natomiast brak zmiany w tej klasyfikacji odnotowano dla najniżej ocenianego algorytmu, którym jest BH. Pomimo, że BH jest najgorszą zaproponowaną metodą przybliżoną, to jakość dostarczanych przez nią rozwiązań dla wybranych instancji problemu, skłania do jej zastosowania. Optymalizacja harmonogramów eksploatacji taboru jest lepsza przy zastosowaniu nawet BH, niż pozostając przy braku optymalizacji tj. podejściu FA. Warto podkreślić, że czasy działania zarówno dla BH i BM2MH wynosiły poniżej 4 minut, jest to mniej w porównaniu z praktyką gospodarczą. Zaś czasy obliczeń dla algorytmu NEH, potwierdziły jego złożoność obliczeniową. Niniejsze badania potwierdzają zgodnie z twierdzeniem "no free lunch" (NFL) [183], że żaden

z proponowanych algorytmów nie jest uniwersalnie najlepszy dla wszystkich rozpatrywanych instancji problemu planowania eksploatacji taboru kolejowego z wielopoziomowymi przeglądami. Dlatego też, uzasadnionym podejściem jest zastosowanie grupy skonstruowanych metod i po wykonaniu eksperymentów numerycznych, wybranie lepszego rozwiązania dla rozważanego problemu. Zaproponowany sposób postępowania w procesie rozwiązania rzeczywistej instancji problemu jest pragmatyczne i rekomendowane przedsiębiorstwom kolejowym.

#### 4.4. Wnioski końcowe z eksperymentów

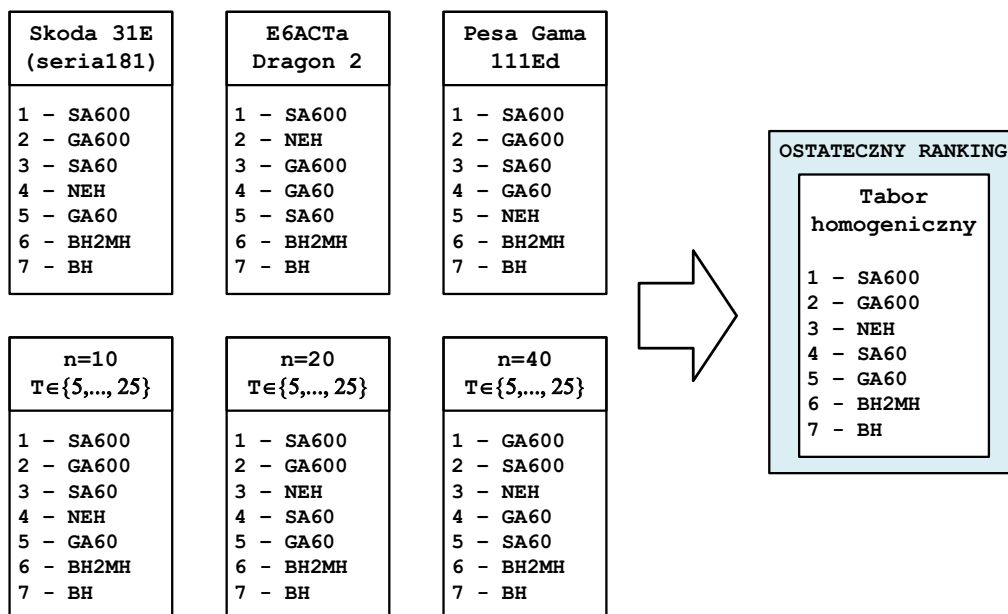
Celem niniejszego rozdziału była weryfikacja możliwości obliczeniowych i jakości dostarczanych rozwiązań przez zaproponowane modele decyzyjne, oparte na metodach dokładnych (Rozdział 3.4) i przybliżonych (Rozdział 3.5) dla problemu planowania eksploatacji taboru kolejowego, przy uwzględnieniu wielopoziomowych przeglądów.

Przeprowadzone eksperymenty numeryczne dla metod dokładnych tj. BF i B&B potwierdziły (Rozdział 4.2), że rozpatrywany problem należy do klasy problemów NP-trudnych, co zostało już wykazane teoretycznie w Rozdziale 3.3. Czas znalezienia optymalnego rozwiązania, zarówno przez BF i B&B, rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem rozmiaru danych wejściowych problemu. Dlatego też, zastosowanie metod dokładnych jest możliwe wyłącznie dla małych rozmiarów instancji np. dla kilku lokomotyw oraz do rocznego horyzontu planowania.

Do najistotniejszych rezultatów w tej części pracy należy uwzględnić akceptowalną jakość dostarczanych rozwiązań przez metody przybliżone tj. BH, BM2MH, NEH, SA60, SA600, GA60, GA600 (Rozdział 4.3). Analiza wartości błędów względnych dla małych rozmiarów instancji wykazała, że szczególnie metaheurystyki oraz heurystyka NEH dostarczają rozwiązania bliskie rozwiązaniom optymalnym w czasie wielomianowym (wartość błędu względnego poniżej 1%). Natomiast dla pozostałych heurystyk tj. BH i BM2MH wartość błędu względnego dla badanych instancji wynosiła poniżej 5%.

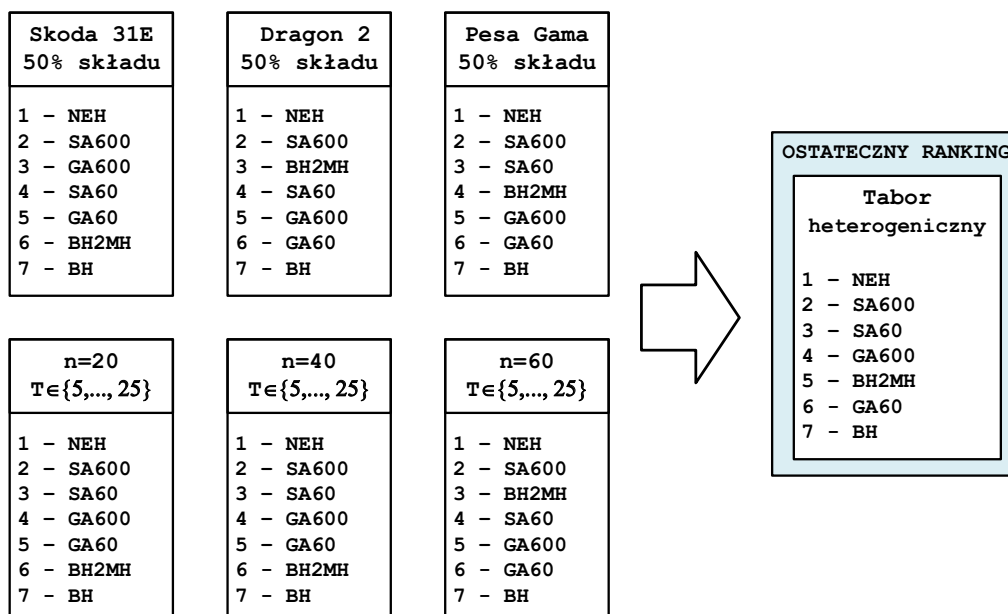
Weryfikacja metod przybliżonych dla rzeczywistych (dużych) instancji problemu została przeprowadzona dla floty homogenicznej i heterogenicznej. W Rozdziałach 4.3, 4.3 wykazano, że zaproponowane algorytmy heurystyczne i metaheurystyczne dla modeli decyzyjnych planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych, pozwalają na zwiększenie dostępności pojazdów kolejowych w odniesieniu do planów, gdzie zastosowano stałe przypisanie zadań do pojazdów (tj. FA). Podsumowując, dla zbadanych dużych instancji problemu niniejsze algorytmy generują rozwiązania dążące do optimum w czasie wielomianowym (udowodniono H3).

## RANKING ALGORYTMÓW DLA WYBRANYCH GRUP INSTANCJI



Rysunek 4.21: Ranking algorytmów dla wybranych grup instancji taboru homogenicznego

## RANKING ALGORYTMÓW DLA WYBRANYCH GRUP INSTANCJI



Rysunek 4.22: Ranking algorytmów dla wybranych grup instancji taboru heterogenicznego

Jednakże, żadna z metod przybliżonych nie generuje najlepszych rozwiązań dla wszystkich rozpatrywanych przypadków, trudno podjąć jednoznaczną decyzję o wyborze najlepszego algorytmu. Dlatego też, przeprowadzono porównanie metod w ramach rozpatrywanych dotychczas pogrupowanych instancji (patrz Rysunek 4.21, Rysunek 4.22). Na podstawie wyników eksperymentów zamieszczonych w Tabelach 4.11, 4.12, 4.13, 4.15, 4.16, 4.17, dokonano następującej analizy. W ramach każdego zestawu instancji, metodom

przypisuje się numery od 1 do 7 (gdzie 1 oznacza najlepszy) na podstawie następującej reguły. Najpierw porównujemy ich wartość kryterium, porządkując od najwyższej do najniższej. Jeśli te wartości są takie same dla danych algorytmów, to brany jest pod uwagę czas rozwiązania określonej instancji. Wyżej w rankingu plasuje się ta metoda, której czas obliczeń jest krótszy. Ogólny ranking dla badanej grupy instancji, jest ustalany na podstawie sumy wszystkich przypisanych numerów 1-7 do metod dla każdej pojedynczej instancji. Im mniejsza suma przypisanych numerów, tym lepsza metoda. Zarówno dla floty homogenicznej i heterogenicznej, rozpatrywano grupy instancji według przeważającego typu taboru w zestawie lokomotyw oraz wielkość floty (patrz Rysunek 4.21, Rysunek 4.22). Ostateczny ranking dla floty homogenicznej i heterogenicznej jest ustalany analogicznie, jak dla grupy instancji. Otóż na podstawie sumy przypisanych numerów od 1 do 7 dla rankingów grupy instancji, ustalany jest ostateczny ranking. Analizując powstałe rankingi, można wskazać ogólnie najlepszą i najgorszą metodę, w ramach proponowanych w niniejszej pracy. Dla problemów planowania eksploatacji taboru homogenicznego rekomenduje się algorytmy metaheurystyczne SA600 i GA600. Natomiast w przypadku, układania harmonogramów dla zestawu floty o różnym typie, poleca się zastosowanie heurystyki NEH oraz metaheurystyki SA600. Najgorzej działającą metodą dla wszystkich rozpatrywanych przypadków jest heurystyka BH.

Podsumowując, wszystkie zaproponowane metody przybliżone dla modeli decyzyjnych planowania eksploatacji taboru kolejowego z uwzględnieniem wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych, dostarczają rozwiązań o dobrej jakości przy akceptowalnym czasie działania (z perspektywy decydenta). Rekomenduje się optymalizację harmonogramów eksploatacji taboru wraz z przeglądami, nawet przy zastosowaniu najgorzej działających algorytmach, niż pozostając przy braku optymalizacji (podejście FA). Przeprowadzone eksperymenty numeryczne potwierdzają, że zastosowanie zaproponowanych metod pozwala zwiększyć techniczną dostępność taboru kolejowego w przedsiębiorstwie kolejowym, poprzez planowanie eksploatacji uwzględniając przeglądy i naprawy kresowe. Dotychczasowe badania potwierdziły, zgodnie z twierdzeniem ”*no free lunch*” – NFL [183], że żadna z proponowanych metod nie jest uniwersalnie najlepsza dla wszystkich rozpatrywanych instancji problemu. Dlatego też, pragmatyczne podejście zaleca stosowanie grupy skonstruowanych algorytmów w eksperymentach numerycznych dla określonej instancji, i wybranie lepszego wyniku dla rozpatrywanego problemu. Zastosowanie grupy metod w procesie optymalizacji harmonogramów eksploatacji taboru kolejowego z wielopoziomowymi przeglądami, nie tylko poprawi w akceptowalnym czasie jakość dostarczanych rozwiązań dla planów eksploatacji taboru kolejowego, jednocześnie spełniając legislacyjne wymogi bezpieczeństwa transportu kolejowego. Również umożliwi przedsiębiorstwu świadome planowanie działań operacyjnych (np. dotyczących bieżących i nowych zleceń transportowych), a także strategicznych (np. wybór typu i wielkości floty, ustalenie horyzontu czasowego umów dzierżawy taboru kolejowego).



## Podsumowanie pracy

Niniejsza rozprawa dotyczy opracowania nowych modeli decyzyjnych, bazujących na metodach badań operacyjnych, wspomagających planowanie eksploatacji taboru kolejowego przy uwzględnieniu przeglądów i napraw okresowych. Przedstawione w pracy modele decyzyjne stanowią połączenie teoretycznego odwzorowania rzeczywistego problemu optymalizacji w formie modelu matematycznego wraz z metodą rozwiązania tegoż problemu w postaci algorytmu. Poprzez ich zastosowanie w procesie planowania eksploatacji taboru kolejowego możliwe jest zwiększenie technicznej dostępności pojazdów. Postawiony cel pracy został w pełni zrealizowany, a wszystkie hipotezy badawcze zostały udowodnione.

Wykazano, że rozważany problem planowania eksploatacji taboru kolejowego przy uwzględnieniu wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych należy do klasy problemów silnie NP-trudnych – udowodniono **H1** (Rozdział 3.3). Ma to istotne znaczenie praktyczne, ponieważ zgodnie z obecną wiedzą w obszarze badań operacyjnych, nie istnieją algorytmy pozwalające na znalezienie rozwiązania optymalnego w czasie wielomianowym lub nawet pseudowielomianowym.

Następnie dla badanego problemu skonstruowano modele decyzyjne zawierające algorytmy dokładne, w szczególności B&B (Rozdział 3.4). Niewątpliwą ich zaletą jest osiągnięcie rozwiązania optymalnego dla planu eksploatacji taboru kolejowego, czyli najlepszego planu z perspektywy maksymalizacji dostępności floty, lecz jedynie dla małych instancji problemu, tj. do kilku lokomotyw oraz do rocznego horyzontu planowania – udowodniono **H2** (Rozdział 4.2). Natomiast zastosowanie algorytmów dokładnych dla większych instancji problemu, jest wykluczone z powodu ich złożoności wykładniczej, która implikuje znaczący wzrost czasu działania powodując, że są wówczas nieużyteczne.

W związku z tym, dla praktycznych przypadków rozpatrywanego problemu pokrywających duże rozmiary instancji (tj. od kilkunastu lokomotyw, ponad roczny horyzont planowania) opracowano modele decyzyjne oparte o skonstruowane algorytmy heurystyczne (m.in. NEH) oraz metaheurystyczne (tj. SA, GA), patrz Rozdział 3.5. Przy ich zastosowaniu możliwe jest osiągnięcie wysokiego poziomu dostępności pojazdów kolejowych, czyli rozwiązań dążących do optimum w czasie wielomianowym (Rozdział 4.3) – udowodniono **H3**. Natomiast te same modele decyzyjne, dla małych rozmiarów instancji, generowały rozwiązania o podobnej jakości w czasie wielomianowym, gdzie wartość błędu względnego

wynosiła poniżej 1% w odniesieniu do optimum. Ostatecznie można stwierdzić, że zaproponowane algorytmy przybliżone dla modeli decyzyjnych planowania eksploatacji taboru, dostarczają rozwiązań o dobrej jakości w czasie działania akceptowalnym przez decydenta.

Prezentowane w pracy modele decyzyjne, bazując na metodach badań operacyjnych, pozwoliły na zwiększenie technicznej dostępności pojazdów kolejowych poprzez planowanie ich eksploatacji, jednocześnie uwzględniając plan przeglądów i napraw kresowych tegoż taboru – udowodniona **hipoteza główna**, tym samym **cel pracy** został zrealizowany.

Eksperymenty obliczeniowe przeprowadzone w ramach niniejszych badań również potwierdzają zgodnie z twierdzeniem „no free lunch” (NFL) [183], że żaden z proponowanych algorytmów nie jest uniwersalnie najlepszy dla wszystkich rozpatrywanych instancji problemu planowania eksploatacji taboru kolejowego z wielopoziomowymi przeglądami. Dlatego też, uzasadnionym podejściem jest zastosowanie grupy zaproponowanych metod i po wykonaniu eksperymentów numerycznych, wybranie lepszego rozwiązania dla rozważanego problemu decyzyjnego.

Uzyskane rezultaty stanowią istotny wkład do problematyki wspomaganie decyzji w zakresie procesu planowania eksploatacji pojazdów w przedsiębiorstwie kolejowym, zarówno z perspektywy teoretycznej, jak i praktycznej. Wkładem teoretycznym jest opracowanie nowych modeli decyzyjnych, w tym sformułowanie problemu, zbudowanie modelu matematycznego, skonstruowanie algorytmów dokładnych i przybliżonych dla rozpatrywanego problemu z uwzględnieniem wielopoziomowych przeglądów i napraw okresowych taboru kolejowego. Ponadto określono złożoność obliczeniową problemu. Wkład praktyczny stanowią opracowane modele decyzyjne zawierające algorytmy dokładne i przybliżone, będące gotowymi narzędziami rozwiązania badanego problemu w przedsiębiorstwie kolejowym.

# Bibliografia

- [1] D. R. 2020, *Costs for operating trains of DSB in 2020, by type of cost*, 2021. <https://tinyurl.com/3pshwbnv> [dostęp: 2021-09-03].
- [2] U. S. E. P. Agency, EPANET, 2022. <https://www.epa.gov/water-research/epanet> [dostęp: 10.05.2022].
- [3] A. Alexandrov, D. Bannikov, and N. Sirina, *Agent-based modeling of service maintenance and repair of rolling stock*, In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science **403** (2019), 012193.
- [4] A. Alfieri, R. Groot, L. Kroon, and A. Schrijver, *Efficient circulation of railway rolling stock*, Transportation Science **40** (2006), 378–391.
- [5] A. Alrabghi and A. Tiwari, *State of the art in simulation-based optimisation for maintenance systems*, Computers & Industrial Engineering **82** (2015), 167–182.
- [6] J. B. Barney and D. N. Clark, *Resource - based theory: Creating and sustaining competitive advantage*, Oxford University Press, New York, 2007.
- [7] V. D. Blondel and J. N. Tsitsiklis, *A survey of computational complexity results in systems and control*, Automatica **36** (2000), 1249–1274.
- [8] C. Blum, J. Puchinger, G. R. Raidl, and A. Roli, *Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey*, Applied Soft Computing **11** (2011), 4135–4151.
- [9] C. Blum and A. Roli, *Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison*, ACM Computing Surveys **35** (2003), 268–308.
- [10] R. Borndörfer, M. Reuther, T. Schlechte, K. Waas, and S. Weider, *Integrated optimization of rolling stock rotations for intercity railways*, Transportation Science **50** (2016), 863–877.
- [11] P. Bossaerts and C. Murawski, *Computational complexity and human decision-making*, Trends in Cognitive Sciences **21** (2017), 917–929.
- [12] C. A. Brebbia, J. C. F. Telles, and L. C. Wrobel, *Approximate Methods. In: Boundary Element Techniques*, Springer, Berlin, 1984.
- [13] G. Budai, D. Huisman, and R. Dekker, *Scheduling preventive railway maintenance activities*, Journal of the Operational Research Society **57(9)** (2006), 1035–1044.
- [14] G. Budai-Balke, *Thesis*, Operations research models for scheduling railway infrastructure maintenance, No. 456, 2009.
- [15] E. K. Burke, M. Gendreau, M. Hyde, G. Kendall, G. Ochoa, E. Ozcan, and R. Qu, *Hyper-heuristics: A survey of the state of the art*, Journal of the Operational Research Society **64** (2013), 1695–1724.
- [16] V. Cacchiani, A. Caprara, L. Galli, L. Kroon, G. Maróti, and P. Toth, *Railway rolling stock planning: Robustness against large disruptions*, Transportation Science **46(2)** (2012), 217–232.
- [17] V. Cacchiani, A. Caprara, and P. Toth, *Solving a real-world train-unit assignment problem*, Mathematical programming **124** (2010), 207–231.
- [18] L. Cadarso and Á. Marín, *Integration of timetable planning and rolling stock in rapid transit networks*, Annals of operations research **199** (2012), 113–135.

- [19] L. Cadarso and Á. Marín, *Improving robustness of rolling stock circulations in rapid transit networks*, *Computers & Operations Research* **51** (2014), 146–159.
- [20] D. Canca and E. Barrena, *The integrated rolling stock circulation and depot location problem in railway rapid transit systems*, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **109** (2018), 115–138.
- [21] D. Canca, M. Sabido, and E. Barrena, *A rolling stock circulation model for railway rapid transit system*, *Transportation Research Procedia* **3** (2014), 680–689.
- [22] J. Carretero, J. M. Pérez, F. García-Carballeira, A. Calderón, J. Fernández, J. D. García, A. Lozano, L. Cardona, N. Cotaina, and P. Prete, *Applying RCM in large scale systems: a case study with railway networks*, *Reliability engineering & system safety* **82** (2003), 257–273.
- [23] Y. H. Cheng and H. L. Tsao, *Rolling stock maintenance strategy selection, spares parts' estimation, and replacements' interval calculation*, *International Journal of Production Economics* **128** (2010), 404–412.
- [24] A. B. Chojnacki, *Badania operacyjne przy niepełnej informacji*, *Zeszyty Naukowe Warszawskiej Wyższej Szkoły Informatyki* **1** (2006), 25–41.
- [25] J. W. Chung, S. M. Oh, and I. C. Choi, *A hybrid genetic algorithm for train sequencing in the Korean railway*, *Omega* **37** (2009), 555–565.
- [26] O. Ciech Cargo, *Dokumentacja Systemu Utrzymania dla lokomotywy spalinowej typu 6D*, 2015. <https://ciech.logintrade.net> [dostęp: 12.03.2020].
- [27] J. F. Cordeau, G. Desaulniers, N. Lingaya, F. Soumis, and J. Desrosiers, *Simultaneous locomotive and car assignment at VIA Rail Canada*, *Transportation Research Part B: Methodological* **35** (2001), 767–787.
- [28] J. F. Cordeau, F. Soumis, and J. Desrosiers, *A Benders decomposition approach for the locomotive and car assignment problem*, *Transportation science* **34** (2000), 133–149.
- [29] J. F. Cordeau, F. Soumis, and J. Desrosiers, *Simultaneous assignment of locomotives and cars to passenger trains*, *Operations research* **49** (2001), 531–548.
- [30] Council of the European Union, European Parliament, *Commission Implementing Regulation (EU) 2019/779 of May 2019 laying down detailed provisions on a system certification of entities in charge of maintenance of vehicles pursuant to Directive (EU) 2016/798 of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Regulation (EU) No 445/2011*, *Official Journal of the European Union* **L 139** (2019), 360.
- [31] M. Dunford, H. Louri, and M. Rosenstock, *Competition, competitiveness, and enterprise policies*, *MPRA Paper* **29971** (2001), 109–146.
- [32] M. Dzikowska and M. Gorynia, *Teoretyczne aspekty konkurencyjności przedsiębiorstwa - w kierunku koncepcji eklektycznej*, *Gospodarka Narodowa. The Polish Journal of Economics* **255.4** (2012), 1–30.
- [33] D. N. Effendi, W. Anggraini, A. Jatmiko, H. Rahmayanti, I. Z. Ichsan, and M. M. Rahman, *Bibliometric analysis of scientific literacy using vos viewer: Analysis of science education*, *Journal of Physics: Conference Series* **1796** (2021), 012096.
- [34] E. Eisenschmidt, S. Reimig, L. Schirmers, and S. Stern, *The rail sector's changing maintenance game*, 2017. McKinsey Global Institute, Report, <https://tinyurl.com/47ukmmuw> [dostęp: 2020-12-14].
- [35] E. Eisenschmidt, S. Reimig, L. Schirmers, and S. Stern, *The rail sector's changing maintenance game*, 2017. McKinsey & Company.
- [36] A. Erguido, A. C. Márquez, E. Castellano, J. L. Flores, and J. G. Fernández, *Reliability-based advanced maintenance modelling to enhance rolling stock manufacturers' objectives*, *Computers & Industrial Engineering* **144** (2020), 106436.

- [37] EuroStat, *Railway passenger transport statistics - quarterly and annual data*, 2019. <https://tinyurl.com/frbnfaxu> [dostęp: 2021-10-08].
- [38] EuroStat, *Passengers transported*, 2020. <https://tinyurl.com/tjeufn2e> [dostęp: 2021-02-08].
- [39] EuroStat, *Railway freight transport statistics*, 2020. <https://tinyurl.com/2v9skvad> [dostęp: 2021-09-08].
- [40] EuroStat, *Passenger railway vehicles*, 2022. <https://tinyurl.com/5488btju> [dostęp: 2021-09-08].
- [41] A. W. Evans and A. D. Morrison, *Incorporating accident risk and disruption in economic models of public transport*, *Journal of Transport Economics and Policy* **31** (1997), 117–146.
- [42] S. Frisch, P. Hungerländer, A. Jellen, B. Primas, S. Steininger, and D. Weinberger, *Solving a real-world locomotive scheduling problem with maintenance constraints*, *Transportation Research Part B: Methodological* **150** (2021), 386–409.
- [43] S. Frisch, P. Hungerländer, A. Jellen, B. Primas, S. Steininger, and D. Weinberger, *Solving a real-world Locomotive Scheduling Problem with Maintenance Constraints*, *Transportation Research Part B: Methodological* **150** (2021), 386–409.
- [44] S. Frisch, P. Hungerländer, A. Jellen, and D. Weinberger, *A Mixed Integer Linear Program for Optimizing the Utilization of Locomotives with Maintenance Constraints*, *Operations Research Proceedings* (2019), 103–109.
- [45] Y. Gao, M. Schmidt, L. Yang, and Z. Gao, *A branch-and-price approach for trip sequence planning of high-speed train units*, *Omega* **92** (2020), 102150.
- [46] M. R. Garey and D. S. Johnson, *Computers and intractability: A guide to the theory of np-completeness*, Freeman, San Francisco, 1979.
- [47] D. Gattuso and A. Restuccia, *A tool for railway transport cost evaluation*, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* **11** (2014), 549–558.
- [48] K. Ghoseiri, F. Szidarovszky, and M. J. Asgharpour, *A multi-objective train scheduling model and solution*, *Transportation research part B: Methodological* **38** (2004), 927–952.
- [49] G. L. Giacco, D. Carillo, A. D’Ariano, D. Pacciarelli, and Á. G. Marín, *Short-term rail rolling stock rostering and maintenance scheduling*, *Transportation Research Procedia* **3** (2014), 651–659.
- [50] G. L. Giacco, A. D’Ariano, and D. Pacciarelli, *Rolling stock rostering optimization under maintenance constraints*, *Journal of Intelligent Transportation Systems* **18** (2014), 95–105.
- [51] M. Givoni, C. Brand, and P. Watkiss, *Are railways climate friendly?*, *Built Environment* **35** (2009), 70–86.
- [52] M. Gagolewski, *Programowanie w języku R. analiza danych, obliczenia, symulacje*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, 2016.
- [53] J. W. Goossens, S. van Hoesel, and L. Kroon, *On solving multi-type railway line planning problems*, *European Journal of Operational Research* **168** (2006), 403–424.
- [54] M. F. Gorman, *An application of genetic and tabu searches to the freight railroad operating plan problem*, *Annals of Operations Research* **78** (1998), 51–69.
- [55] W. Grabowski, *Programowanie matematyczne*, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 1982.
- [56] P. Hanczar and A. Zandi, *A novel model and solution algorithm to improve crew scheduling in railway transportation: A real world case study*, *Computers & Industrial Engineering* **154** (2021), 107132.
- [57] J. Heil, K. Hoffmann, and U. Buscher, *Railway crew scheduling: Models, methods and applications*, *European Journal of Operational Research* **283** (2020), 405–425.
- [58] I. Heppner and R. Rudek, *Improve railway vehicle availability by scheduling under preventive maintenance policies*, 48th international conference on computers & industrial engineering 2018 (CIE48), 2018, pp. 2325–2332.

- [59] A. Higgins, *Scheduling of railway track maintenance activities and crews*, Journal of the Operational Research Society **49**(10) (1998), 1026–1033.
- [60] J. H. Holland, *Adaption in natural and artificial systems*, The University of Michigan Press, Ann Harbor, MI, 1975.
- [61] S. P. Hong, K. M. Kim, K. Lee, and B. H. Park, *A pragmatic algorithm for the train-set routing: the case of Korea high-speed railway*, Omega **37** (2009), 637–645.
- [62] D. Huisman, L. G. Kroon, R. M. Lentink, and M. J. Vromans, *Operations research in passenger railway transportation*, Statistica Neerlandica **59** (2005), 467–497.
- [63] IBISWorld, *Statista – Rail maintenance businesses in the U.S. 2017-2020*, 2020. <https://tinyurl.com/ygkrx52e> [dostęp: 2021-02-13].
- [64] IGI-Global, *Publisher of timely knowledge*, 2017. <https://tinyurl.com/tv7jtuz> [dostęp: 2021-03-02].
- [65] P. J. Kalczynski and J. Kamburowski, *On the NEH heuristic for minimizing the makespan in permutation flowshops*, Omega **35** (2007), 53–60.
- [66] P. J. Kalczynski and J. Kamburowski, *An improved NEH heuristic to minimize makespan in permutation flow shops*, Computers & Operations Research **35** (2008), 3001–3008.
- [67] L. Kang, Y. Xiao, H. Sun, J. Wu, S. Luo, and N. Buhigiro, *Decisions on train rescheduling and locomotive assignment during the COVID-19 outbreak: A case of the Beijing-Tianjin intercity railway*, Decision Support Systems (2021), 113600.
- [68] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, *Optimization by simulated annealing*, Science **220** (1983), 671–680.
- [69] K. Kobzacy and D. Murthy, *Complex system maintenance handbook*, Springer, Berlin, 2008.
- [70] KowiEU, *Fotografia lokomotywy Škoda 31E seria 181*. <https://tinyurl.com/y3rc7249> [dostęp: 2021-12-12].
- [71] Y. C. Lai, D. C. Fan, and K. L. Huang, *Optimizing rolling stock assignment and maintenance plan for passenger railway operations*, Computers & Industrial Engineering **85** (2015), 284–295.
- [72] R. Lenart-Gansiniec, *Systematyczny przegląd literatury w naukach społecznych*, Wydawnictwo Naukowe Scholar, Warszawa, 2021.
- [73] T. Lidén, *Railway infrastructure maintenance - A survey of planning problems and conducted research*, Transportation Research Procedia **10** (2015), 574–583.
- [74] T. Lidén and M. Joborn, *Dimensioning windows for railway infrastructure maintenance: Cost efficiency versus traffic impact*, Journal of Rail Transport Planning & Management **6** (2016), 32–47.
- [75] B. Lin and R. Lin, *An approach to the high-level maintenance planning for EMU trains based on simulated annealing*, arXiv preprint (2017), 1704.02752.
- [76] B. Lin, J. Wu, R. Lin, J. Wang, H. Wang, and X. Zhang, *Optimization of high-level preventive maintenance scheduling for high-speed trains*, Reliability Engineering & System Safety **183** (2019), 261–275.
- [77] Z. Lin and R. S. Kwan, *A branch-and-price approach for solving the train unit scheduling problem*, Transportation Research Part B: Methodological **94** (2016), 97–120.
- [78] V. Lingaitis and G. Sinkevičius, *Passenger transport by railway: evaluation of economic and social Phenomenon*, Procedia – Social and Behavioral Sciences **110** (2014), 549–559.
- [79] N. Lingaya, J. F. Cordeau, G. Desaulniers, J. Desrosiers, and F. Soumis, *Operational car assignment at VIA Rail Canada*, Transportation Research Part B: Methodological **36** (2002), 755–778.
- [80] X. Luan, J. Miao, L. Meng, F. Corman, and G. Lodewijks, *Integrated optimization on train scheduling and preventive maintenance time slots planning*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies **80** (2017), 329–359.

- [81] R. Macedo, R. Benmansour, A. Artiba, N. Mladenović, and D. Urošević, *Scheduling preventive railway maintenance activities with resource constraints*, *Electronic Notes in Discrete Mathematics* **58** (2017), 215–22.
- [82] G. Maróti and L. Kroon, *Maintenance routing for train units: The Transition Model*, *Transportation Science* **39** (2005), 518–525.
- [83] G. Maróti and L. Kroon, *Maintenance routing for train units: The Interchange Model*, *Computers & Operations Research* **34** (2007), 1121–1140.
- [84] G. Maróti and L. G. Kroon, *Maintenance routing for train units: The Scenario Model*, *Probability, Networks and Algorithms* **E 0414** (2004).
- [85] L. Mira, A. R. Andrade, and M. C. Gomes, *Maintenance scheduling within rolling stock planning in railway operations under uncertain maintenance durations*, *Journal of Rail Transport Planning & Management* **14** (2020), 100177.
- [86] money.pl, *Lokomotywy pkp intercitu mają średnio 33 lata. jest zgoda na unijne wsparcie modernizacji taboru*, 2021. <https://tinyurl.com/47ep6xb4> [dostęp: 20.09.2022].
- [87] M. Nawaz, J. E. E. Enscore, and I. A. Ham, *A heuristic algorithm for m-machine, n-jobs Flow-shop sequencing problem*, *Omega* **11** (1983), 91–95.
- [88] NEWAG, *NEWAG's DRAGON 2 - the First in Europe Six-Axle Loco with License to Operate*, 2018. <https://tinyurl.com/tn25r26> [dostęp: 2020-03-19].
- [89] R. P. Nicolai and R. Dekker, *Optimal maintenance of multi-component systems: a review*, *Complex system maintenance handbook*, 2008, pp. 263–286.
- [90] F. Nijland, K. Gkiotsalitis, and E. C. van Berkum, *Improving railway maintenance schedules by considering hindrance and capacity constraints*, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **126** (2021), 103108.
- [91] S. Nowosielski, *Procesy decyzyjne i procesy poznawcze w zarządzaniu przedsiębiorstwem*, *Przedsiębiorczość i Zarządzanie* **18** (2017), 139–152.
- [92] K. Odoliński and H. E. Boysen, *Railway line capacity utilisation and its impact on maintenance costs*, *Journal of Rail Transport Planning & Management* **9** (2019), 22–33.
- [93] U. S. B. of Labor Statistics, *Producer Price Index by Industry – Railroad Rolling Stock Manufacturing: Railway maintenance of way equipment and parts, parts for all railcars, and other railway vehicles*, 2021. <https://tinyurl.com/b8xr5kzw> [dostęp: 2021-09-03].
- [94] J. Ollila and O. Sormunen, *Optimizing locomotive maintenance times for vr group ltd. in finland*, *Impact* **2** (2018), 36–38.
- [95] G. Optimization, *Gurobi Optimizer*, 2022. <https://www.gurobi.com/products/gurobi-optimizer> [dostęp: 10.05.2022].
- [96] J. Oziomek and A. Rogowski, *Wybrane metody poszukiwania rozwiązania problemu synchronizacji interwałowej*, *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* **18** (2017), 616–620.
- [97] M. Peeters and L. Kroon, *Circulation of railway rolling stock: a branch-and-price approach*, *Computers & operations research* **35(2)** (2008), 538–556.
- [98] F. Peng, Y. Ouyang, and K. Somani, *Optimal routing and scheduling of periodic inspections in large-scale railroad networks*, *Journal of Rail Transport Planning & Management* **3(4)** (2013), 163–171.
- [99] PESA, *Gama Electric 111 Ed*, 2022. <https://tinyurl.com/bdfzujpv> [dostęp: 2022-05-05].
- [100] M. E. Porter, *Rodzaje strategii*, *Strategia konkurencji. Metody analizy sektorów i konkurentów*, 2006, pp. 60–61.
- [101] S. M. Rezvanizani, M. Valibeigloo, M. Asghari, J. Barabady, and U. Kumar, *Reliability centered maintenance for rolling stock: A case study in coaches wheel sets of passenger trains of Iranian*

- railway*, International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. IEEE (2008), 516–520.
- [102] P. Romanowicz, *Fotografia lokomotywy E6 ACTa Dragon 2*. <https://tinyurl.com/438tah56> [dostęp: 2021-12-12].
- [103] R. Roy, R. Stark, K. Tracht, S. Takata, and M. Mori, *Continuous maintenance and the future - Foundations and technological challenges*, *Cirp Annals* **65** (2016), 667–688.
- [104] I. Rudek and R. Rudek, *Heuristic workload scheduling algorithms for rolling stocks with mixed preventive maintenance policies*, Proceedings of the 25th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, 2021, pp. 297–302.
- [105] I. Rudek and R. Rudek, *Optimizing maintenance cost of uniform rolling stock by scheduling algorithms*, Lecture notes in networks and systems, 2022, pp. 1–10.
- [106] R. Rudek, *Computational complexity and solution algorithms for flowshop scheduling problems with the learning effect*, *Computers & Industrial Engineering* **61** (2011), 20–31.
- [107] R. Rudek, *Computational complexity and solution algorithms for a vector sequencing problem*, *Computers & Industrial Engineering* **98** (2016), 384–400.
- [108] R. Rudek and I. Heppner, *Efficient algorithms for discrete resource allocation problems under degeneratively proportional constraints*, *Expert Systems with Applications* **149** (2020), 113293.
- [109] V. Sangiorgio, A. M. Mangini, and I. Precchiazzi, *A new index to evaluate the safety performance level of railway transportation systems*, *Safety science* **131** (2020), 104921.
- [110] M. Satora and M. Szkoda, *Analiza wybranych uwarunkowań dotyczących systemu utrzymania pojazdów kolejowych*, *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* **19** (2018), 712–717.
- [111] A. Schöbel, *An eigenmodel for iterative line planning, timetabling and vehicle scheduling in public transportation*, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **74** (2017), 348–365.
- [112] P. Ślaska, *Dyscyplina badań operacyjnych*, 2021. <https://tinyurl.com/3pv4d236> [dostęp: 12.03.2021].
- [113] C. Sriskandarajah, A. K. S. Jardine, and C. K. Chan, *Maintenance scheduling of rolling stock using a genetic algorithm*, *Journal of the Operational Research Society* **49** (1998), 1130–1145.
- [114] British Standards Institution, *British standard glossary of maintenance management terms in terrotechnology*, BS3811:1984, 1984.
- [115] Deutsches Institut für Normung, *Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung*, DIN EN13306, 2017. Berlin.
- [116] Directorate General for Mobility and Transport (European Commission, *EU transport in figures. Statistical pocketbook 2020*, 2020. <https://tinyurl.com/68k45uk9> [dostęp: 2.12.2020].
- [117] Dziennik Ustaw, *Ustawa z dnia 6 czerwca 1997 r. Kodeks karny*, 2016. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu19970880553> [dostęp: 12.06.2021].
- [118] Encyclopedia Britannica, *Operations research*, 2021. <https://www.britannica.com/topic/operations-research> [dostęp: 2021-01-23].
- [119] Encyklopedia PWN, *Wersja online*, 2021. <https://encyklopedia.pwn.pl> [dostęp: 2021-01-25].
- [120] Euro Stat, *Transport equipment statistics*, 2022. <https://tinyurl.com/arxtjd76> [dostęp: 2022-08-21].
- [121] European Commission, *White paper - the future development of the common transport policy - a global approach to the construction of a community framework for sustainable mobility*, COM(92) 494 final, 1992. <https://tinyurl.com/3bxh2bs8> [dostęp: 2020-03-25].
- [122] European Commission, *White paper - european transport policy for 2010: time to decide*, COM(2001) 370 final, 2001. <https://tinyurl.com/3xn9bbv7> [dostęp: 2020-03-26].
- [123] European Commission, *Seventh monitoring report on the development of the rail market under*



- Article 15(4) of Directive 2012/34/EU of the European Parliament and of the Council*, 2021. <https://tinyurl.com/2zbzy6ey> [dostęp: 2021-08-21].
- [124] European Committee for Standardization, *Maintenance Terminology. European Standard, EN 13306:2001*, 2001. Brussels.
- [125] Europejski Trybunał Obrachunkowy, *Kolejowy transport towarowy w UE: wciąż nie na właściwym torze - sprawozdanie specjalne*, 2016. <https://tinyurl.com/55rwswwy> [dostęp: 10.02.2021].
- [126] Europejski Trybunał Obrachunkowy, *Udoskonalenie sektora transportu w UE - aktualne wyzwania. przegląd horyzontalny*, 2018. <https://tinyurl.com/xrhh5btc> [dostęp: 10.06.2021].
- [127] IBISWorld, *Statista - Rail maintenance services market employment in the U.S. 2017-2020*, 2020. <https://tinyurl.com/ygslodom> [dostęp: 2021-02-13].
- [128] IBM, *IBM Maximo for Transportation*, 2022. <https://tinyurl.com/amek4bt4> [dostęp: 13.09.2022].
- [129] ICC PKP Intercity, *PKP Intercity wzmocni flotę 20 nowymi lokomotywami elektrycznymi*, 2022. <https://tinyurl.com/5n8exp3s> [dostęp: 20.08.2022].
- [130] IRG Rail, *Ninth Annual Market Monitoring Working Document*, 2021. <https://tinyurl.com/4ks6kpte> [dostęp: 2021-08-21].
- [131] IRIS International Railway Industry Standard, *International Railway Industry Standard (IRIS) Guideline 3: 2013 MAINTENANCE*, 2013. <http://www.iris-rail.org> [dostęp: 2020-03-20].
- [132] JSW Logistic, *DSU lokomotywy spalinowej typu 6D, 6Da i 6D/P oraz 6Dh*, 2019. <https://tinyurl.com/2awsrjhx> [dostęp: 2022-08-25].
- [133] Kolejowy Portal, *Wymiana taboru w lotos kolej przynosi efekty*, 2020. <https://tinyurl.com/ymu5e4w7> [dostęp: 20.09.2022].
- [134] Kolejowy Portal, *Do 2025 r. przewoźnicy towarowi planują zakup 21 nowych lokomotyw*, 2021. <https://tinyurl.com/59jv4xp3> [dostęp: 20.09.2022].
- [135] Kolejowy Portal, *Ep09 przejdą naprawy P5 z modernizacją*, 2022. <https://tinyurl.com/4j9krdb5> [dostęp: 20.09.2022].
- [136] Komisja Europejska, *Biała księga - plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu - dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu*, KOM(2011) 144 wersja ostateczna, 2011. <https://tinyurl.com/4xrkszv8> [dostęp: 2020-03-26].
- [137] Kurier Kolejowy, *Dojrzała lokomotywa Skoda 181040 PKP Cargo International w firmowym płaszczu wróciła na tory*, 2022. <https://tinyurl.com/yez7f7nm> [dostęp: 2022-05-20].
- [138] Lotos Kolej, *Przykładowa umowa dzierżawy lokomotyw*, 2022. <https://www.lotoskolej.pl/repository/50432> [dostęp: 20.10.2022].
- [139] Najwyższa Izba Kontroli Departament Infrastruktury, *Informacja o wynikach kontroli NIK, Bezpieczeństwo przewozów kolejowych*, 2018. <https://www.nik.gov.pl/kontrole/P/17/031> [dostęp: 12.03.2021].
- [140] Nakolei, *Ceske drahy chcą kupić 50 lokomotyw*, 2020. <https://tinyurl.com/mphtphc> [dostęp: 20.08.2022].
- [141] Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 13 października 2017 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o transporcie kolejowym, Dz.U. 2017 poz. 2117, 2017.
- [142] Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 27 stycznia 2016 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych, Dz.U. 2016 poz. 226, 2016.
- [143] Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 23 stycznia 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie ogólnych warunków prowadzenia ruchu kolejowego i sygnalizacji, Dz.U. 2015 poz. 360, 2015.
- [144] Parlament Europejski, *Rezolucja Parlamentu Europejskiego z dnia 17 czerwca 2010 r. w sprawie*

- wdrożenia pierwszego pakietu dyrektyw kolejowych (2001/12/we, 2001/13/we oraz 2001/14/we), 2010. <https://tinyurl.com/yrzc6uux> [dostęp: 10.05.2020].
- [145] Parlament Europejski i Rada UE, *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/34/UE z dnia 21 listopada 2012 r. w sprawie utworzenia jednolitego europejskiego obszaru kolejowego*, 2012. <https://tinyurl.com/rvk6k6fa> [dostęp: 12.05.2021].
- [146] Parlament Europejski i Rada UE, *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2016/2370 z dnia 14 grudnia 2016r. zmieniająca dyrektywę 2012/34/UE w odniesieniu do otwarcia rynku krajowych kolejowych przewozów pasażerskich oraz zarządzania infrastrukturą kolejową*, 2016. <https://tinyurl.com/y4cxeavc> [dostęp: 10.05.2020].
- [147] Parlament Europejski i Rada UE, *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei Unii Europejskiej*, 2016. <https://tinyurl.com/ykz6zyk9> [dostęp: 10.05.2020].
- [148] Parlament Europejski i Rada UE, *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/798 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa kolei*, 2016. <https://tinyurl.com/kavy9jew> [dostęp: 12.04.2021].
- [149] Parlament Europejski i Rada UE, *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2016/798 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa kolei*, 2016. <https://tinyurl.com/uuyswera> [dostęp: 10.05.2020].
- [150] Parlament Europejski i Rada UE, *Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2016/2337 z dnia 14 grudnia 2016 r. uchylające rozporządzenie Rady (EWG) nr 1192-69 w sprawie wspólnych zasad normalizujących rachunkowość przedsiębiorstw kolejowych*, 2016. <https://tinyurl.com/53zrmtpe> [dostęp: 10.05.2020].
- [151] Parlament Europejski i Rada UE, *Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2016/2338 z dnia 14 grudnia 2016 r. zmieniające rozporządzenie WE nr 1370/2007 w odniesieniu do otwarcia rynku krajowych usług kolejowego transportu pasażerskiego*, 2016. <https://tinyurl.com/3sb7arxv> [dostęp: 10.05.2020].
- [152] Parlament Europejski i Rada UE, *Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2016/796 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie Agencji Kolejowej Unii Europejskiej i uchylania rozporządzenia WE nr 881/2004*, 2016. <https://tinyurl.com/2nx5x8xp> [dostęp: 10.05.2020].
- [153] Parlament Europejski i Rada UE, *An official website of the European Year of Rail*, 2020. [https://europa.eu/year-of-rail/index\\_en](https://europa.eu/year-of-rail/index_en) [dostęp: 8.03.2021].
- [154] Parlament Europejski i Rada UE, *Decyzja Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2020/2228 z dnia 23 grudnia 2020 r. w sprawie Europejskiego Roku Kolei (2021)*, 2020. <https://tinyurl.com/2tvkapf2> [dostęp: 10.02.2021].
- [155] Petrosoft.pl, *RailSoft*, 2022. <https://tinyurl.com/amek4bt4> [dostęp: 15.09.2022].
- [156] Polska Agencja Prasowa, *Do 63 wzrósł bilans ofiar śmiertelnych katastrofy kolejowej w pakistanie*, 2021. <https://tinyurl.com/dbnk8mmv> [dostęp: 2020-08-25].
- [157] Radio Pakistan, *Train accident kills over 40 passengers near ghotki*, 2021. <https://tinyurl.com/7uxurp8> [dostęp: 2020-08-25].
- [158] Rail Market, *Locomotive rental & leasing in europe*, 2022. <https://railmarket.com/eu/category/locomotive-rental-leasing> [dostęp: 10.11.2022].
- [159] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 28 lipca 2017 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych, Dz.U. 2017 poz. 1525, 2017.
- [160] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 października 2005 r. w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych, Dz.U. 2016 poz. 226, z późn. zm., 2017.

- [161] Rynek Kolejowy, *Olkol: Lokomotywy eu07 najlepiej nadają się do modernizacji*, 2020. <https://tinyurl.com/ycxefztt> [dostęp: 20.09.2022].
- [162] Rynek Kolejowy, *Olkol i PKP Intecity z umową na naprawy lokomotyw elektrycznych EP09*, 2021. <https://tinyurl.com/368ua74s> [dostęp: 18.10.2021].
- [163] Rynek Kolejowy, *Wielosystemowe dragony 2 dla pkp cargo jeżdżą już po czeskiej sieci*, 2022. <https://tinyurl.com/mr42myre> [dostęp: 20.08.2022].
- [164] SAP Community for Rail & Mobility, *SAP Transportation Management*, 2022. <https://tinyurl.com/mrn86uhc> [dostęp: 13.09.2022].
- [165] SCI Verkehr, *Statista – Rail vehicle market size on a global level in 2018*, 2020. <https://tinyurl.com/5e9f3kwn> [dostęp: 2021-02-15].
- [166] Urząd Transportu Kolejowego UTK, *Tabor kolejowy przewoźników towarowych - stan obecny i plany do 2023 r.*, 2018. <https://tinyurl.com/7wa8fkm8> [dostęp: 2019-06-10].
- [167] Urząd Transportu Kolejowego UTK, *Plany inwestycyjne przewoźników pasażerskich 2022-2030*, 2021. <https://tinyurl.com/y56pw8wb> [dostęp: 2022-03-10].
- [168] Urząd Transportu Kolejowego UTK, *Plany inwestycyjne przewoźników towarowych 2022-2030*, 2021. <https://tinyurl.com/23x6cb57> [dostęp: 2022-03-10].
- [169] Wikipedia, *Curinga train disaster*, 2019. [https://en.wikipedia.org/wiki/Curinga\\_train\\_disaster](https://en.wikipedia.org/wiki/Curinga_train_disaster) [dostęp: 2021-08-25].
- [170] Wikipedia, *Fablok 6D*, 2022. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Fablok\\_6D](https://pl.wikipedia.org/wiki/Fablok_6D) [dostęp: 2022-08-25].
- [171] Zduńskie Wieści Kolejowe, *Fotografia lokomotywy Pesa 111 Ed.* [https://zwk.org.pl/galeria/details.php?image\\_id=3741&mode=search](https://zwk.org.pl/galeria/details.php?image_id=3741&mode=search) [dostęp: 2022-01-12].
- [172] M. D. Toksari, *A branch and bound algorithm for minimizing makespan on a single machine with unequal release times under learning effect and deteriorating jobs*, *Computers & Operations Research* **38** (2011), 1361–1365.
- [173] S. Tréfond, A. Billonnet, S. Elloumi, H. Djellab, and O. Guyon, *Optimization and simulation for robust railway rolling-stock planning*, *Journal of Rail Transport Planning & Management* **7** (2017), 33–49.
- [174] N. Van Eck and L. Waltman, *Visualizing scientific landscapes*, 2006. <https://www.vosviewer.com> [dostęp: 13.02.2021].
- [175] N. Van Eck and L. Waltman, *Software survey: Vosviewer, a computer program for bibliometric mapping*, *Scientometrics* **84** (2010), 523–538.
- [176] D. R. Vieira and P. L. Loures, *Maintenance, repair and overhaul (MRO) fundamentals and strategies: An aeronautical industry overview*, *International Journal of Computer Applications* **135** (2016), 21–29.
- [177] T. G. Voutsinas and C. P. Pappis, *A branch and bound algorithm for single machine scheduling with deteriorating values of jobs*, *Mathematical and Computer Modelling* **52** (2010), 55–61.
- [178] J. C. Wagenaar, L. G. Kroon, and M. Schmidt, *Maintenance appointments in railway rolling stock rescheduling*, *Transportation Science* **51** (2017), 1138–1160.
- [179] Y. Wang, A. D’Ariano, J. Yin, L. Meng, T. Tang, and B. Ning, *Passenger demand oriented train scheduling and rolling stock circulation planning for an urban rail transit line*, *Transportation Research Part B: Methodological* **118** (2018), 193–227.
- [180] Wikipedia, *Newag Dragon*, 2022. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Newag\\_Dragon](https://pl.wikipedia.org/wiki/Newag_Dragon) [dostęp: 2022-05-05].
- [181] Wikipedia, *Pesa Gama*, 2022. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Pesa\\_Gama](https://pl.wikipedia.org/wiki/Pesa_Gama) [dostęp: 2022-05-05].
- [182] G. J. Woeginger, *Exact algorithms for NP-hard problems: A survey*, *Combinatorial optimization-eureka, you shrink!*, 2003, pp. 185–207.

- [183] D. H. Wolpert and W. G. Macready, *No free lunch theorems for optimization*, IEEE transactions on evolutionary computation **1** (1997), 67–82.
- [184] M. B. Wright, *Applying stochastic algorithms to a locomotive scheduling problem*, Journal of the Operational Research Society **40** (1989), 187–192.
- [185] R. Wüst, S. Bütikofer, S. Ess, C. Gomez, A. Steiner, M. Laumanns, and J. Szabo, *Maintenance timetable planning based on mesoscopic infrastructure and the transport service intention*, Journal of Rail Transport Planning & Management **11** (2019), 100146.
- [186] X. Xu, C. L. Li, and Z. Xu, *Integrated train timetabling and locomotive assignment*, Transportation Research Part B: Methodological **117** (2018), 573–593.
- [187] W. Yu, H. Hoogeveen, and J. K. Lenstra, *Minimizing makespan in a two-machine flow shop with delays and unit-time operations is NP-hard*, Journal of Scheduling **7** (2004), 333–348.
- [188] C. Zhang, Y. Gao, L. Yang, Z. Gao, and J. Qi, *Joint optimization of train scheduling and maintenance planning in a railway network: A heuristic algorithm using Lagrangian relaxation*, Transportation Research Part B: Methodological **134** (2020), 64–92.
- [189] P. Zhao, N. Tomii, N. Fukumura, and T. Sakaguchi, *An algorithm for train-set scheduling based on probabilistic local search*, WIT Transactions on The Built Environment **61** (2002), 817–826.
- [190] Q. Zhong, R. M. Lusby, J. Larsen, Y. Zhang, and Q. Peng, *Rolling stock scheduling with maintenance requirements at the Chinese High-Speed Railway*, Transportation Research Part B: Methodological **126** (2019), 24–44.
- [191] J. L. Zhou and Y. Lei, *Paths between latent and active errors: Analysis of 407 railway accidents/incidents causes in China*, Safety science **110** (2018), 47–58.
- [192] K. Ziarati, F. Soumis, J. Desrosiers, S. Gélinas, and A. Saintonge, *Locomotive assignment with heterogeneous consists at CN North America*, European journal of operational research **97** (1997), 281–292.
- [193] K. Ziarati, F. Soumis, J. Desrosiers, and M. M. Solomon, *A branch-first, cut-second approach for locomotive assignment*, Management Science **45** (1999), 1156–1168.