

Izabela Dziaduch

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
e-mail: izabela.dziaduch@ue.wroc.pl
ORCID: 0000-0001-8067-4707

Paweł Hanczar

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
e-mail: pawel.hanczar@ue.wroc.pl
ORCID: 0000-0002-5144-7975

**MODELE DECYZYJNE W SYSTEMACH
INFORMATYCZNYCH WSPARCIA LOGISTYKI
DLA TRANSPORTU KOLEJOWEGO**

**DECISION MODELS IN IT SYSTEMS SUPPORTING
LOGISTICS RAIL TRANSPORT**

DOI: 10.15611/ie.2018.4.03

JEL Classification: C61

Streszczenie: W artykule dokonano przeglądu modeli decyzyjnych pod kątem możliwości zastosowania ich w modułach systemów informatycznych wspomagających podejmowanie decyzji w zakresie planowania przewozów w transporcie kolejowym. Zidentyfikowano główne elementy procesu planowania w przedsiębiorstwach transportu kolejowego oraz dokonano syntetycznego przeglądu modułów w informatycznych narzędziach wspomagania działalności kolejowej. Ze względu na obszerność tematyki skoncentrowano się na prezentacji modeli decyzyjnych stosowanych w ramach procesu tworzenia planów, które mogą być zaimplementowane w formie modułów w systemach informatycznych. Scharakteryzowano modele decyzyjne wykorzystywane do rozwiązania trzech problemów: planowania przepływu wagonów, planowania cyrkulacji lokomotyw i planowania służb.

Słowa kluczowe: systemy informatyczne, modele decyzyjne, planowanie przewozów, transport kolejowy.

Summary: The possibility of applying decision models in the modules IT systems supporting decision making in the field of transport planning in rail transport are presented. In the first part the key stages of the planning process in rail transport enterprises were identified and a synthetic review of IT systems modules supporting railway operations were presented. The main focus of the research was put on the decision models which can be applied as a part of the planning process and can be implemented in IT systems modules in order to support the rail company's operations. In general, the decision models used to solve three group of problems were characterized: wagon flow planning, locomotive circulation planning and pairing planning.

Keywords: IT systems, decision models, transport planning, rail transport.

1. Wstęp

Przedsiębiorstwo wspomagane przez systemy informatyczne istotnie zwiększa swoją efektywność. Aktualnie rynek rozwiązań informatycznych ma do zaoferowania szeroki zakres systemów wspomagających funkcjonowanie przedsiębiorstwa kolejowego. Rdzeniem takich systemów jest moduł planowania, który w zaawansowanych systemach wspomagany jest przez algorytmy optymalizacyjne. Głównym celem procesu optymalizacji jest maksymalne wykorzystanie posiadanych zasobów (osobowych i taborowych) przy zachowaniu ograniczeń technicznych oraz czasowych wynikających z przepisów prawa bądź regulaminów wewnętrznych. Algorytmy optymalizacyjne pozwalają istotnie obniżyć koszty lub zwiększyć rentowność prowadzonych działań.

Celem artykułu jest przegląd modeli decyzyjnych pod kątem możliwości ich zastosowania w modułach systemów informatycznych wspomagających podejmowanie decyzji w zakresie planowania przewozów w transporcie kolejowym. W niniejszym tekście scharakteryzowano etapy planowania procesu przewozowego w pasażerskim i towarowym transporcie kolejowym. Opisano funkcjonalność systemów informatycznych wspomagających podejmowanie decyzji w obszarze planowania ruchu kolejowego oraz zaprezentowano modele decyzyjne wykorzystywane do rozwiązywania trzech problemów: planowania przepływu wagonów, planowania cyrkulacji lokomotyw i planowania służb, które mogą być zaimplementowane w formie modułów w systemach informatycznych.

2. Planowanie przewozów w transporcie kolejowym

Planowanie procesu przewozowego w transporcie kolejowym odbywa się etapowo. Etapy te różnią się w zależności od przedmiotu działalności przedsiębiorstwa kolejowego (przewozy towarowe i pasażerskie).

W ramach planowania przewozów towarowych w transporcie kolejowym można wyodrębnić pięć podstawowych etapów [Hanczar 2015]:

1. Planowanie rozkładów jazdy.
2. Planowanie przepływu wagonów.
3. Planowanie cyrkulacji lokomotyw.
4. Planowanie służb.
5. Przydział pracowników do zaplanowanych służb.

Planowanie przewozów pasażerskich w transporcie kolejowym dzieli się na cztery etapy [Dziaduch, Hanczar 2018]:

1. Planowanie rozkładów jazdy.
2. Planowanie obiegów taboru kolejowego.
3. Planowanie służb.
4. Przydział pracowników do zaplanowanych służb.

Planowanie rozkładu jazdy pociągów towarowych i pasażerskich obejmuje przygotowanie oferty przewozowej i fizyczną konstrukcję rozkładu jazdy. Oferta przewozowa przygotowana jest przez przewoźnika. W pierwszej kolejności przewoźnik określa potencjalną wielkość zapotrzebowania na przewóz oraz potrzeby przewozowe. Następnie ustala liczbę uruchamianych pociągów i porównuje je z możliwościami technicznymi infrastruktury oraz możliwościami własnymi, np. liczebnością i przeznaczeniem taboru, z koniecznością uzyskania odpowiednich zezwoleń na realizację przewozów oraz spełnienia innych wymagań prawnych. Złożenie wniosków o przydzielenie tras do rozkładu jazdy pociągów u zarządcy infrastruktury kończy etap przygotowania oferty przewozowej. Zarządca infrastruktury, po przeanalizowaniu i sprawdzeniu poprawności złożonych przez przewoźników kolejowych wniosków o przydzielenie tras, konstruuje rozkład jazdy pociągów [Gołębiowski, Jacyna 2013]. Konstrukcja rozkładu jazdy polega na sporządzeniu wykresu ruchu pociągów, który jest graficznym przedstawieniem trasy (jazdy i postoju) każdego pociągu jako funkcji czasu i odległości [PKP 2015]. Wyróżnia się dwa rozkłady jazdy: rozkłady roczne (przejazd odbywa się okresowo na jednej relacji) oraz rozkłady indywidualne (rozkład jazdy powstaje w celu zrealizowania jednego konkretnego przewozu).

Plan przepływu wagonów tworzony jest dla wagonów zarówno próżnych, jak i ładownych. W planie przepływu wagonów muszą zostać uwzględnione wymagania klientów odnośnie do terminów podstawienia wagonów próżnych do załadunku, serii i typu podstawianego wagonu oraz dostępności wagonów.

Plan cyrkulacji lokomotyw określa przydział lokomotyw do wszystkich przesunień wagonów (zarówno próżnych, jak i ładownych) w taki sposób, aby zasób ten był maksymalnie wykorzystany. Celem tego etapu jest takie zaplanowanie przejazdów poszczególnych lokomotyw, aby lokomotywy zawsze realizowały zlecenie przesunięcia wagonów zarówno próżnych, jak i ładownych. Przejazdy samych lokomotyw (bez wagonów) powinny się odbywać możliwie najrzadziej [Hanczar 2015].

Plan obiegu taboru kolejowego dla przewozów pasażerskich to uporządkowany zbiór segmentów¹ obsługiwanych kolejno tym samym składem, z uwzględnieniem czasów przejazdów wynikających z rozkładu jazdy. Istotą tego problemu jest to, że należy przydzielić do każdego obiegu pojazd go obsługujący; należy to uczynić w taki sposób, aby liczba taboru niezbędnego do jego obsługi była minimalna [Gołębiowski, Jacyna 2013].

Planowanie służb drużyn trakcyjnych (drużyn pociągowych i drużyn konduktorskich) polega na określeniu sekwencji segmentów, które będą realizowane przez daną obsadę personalną. Przy tworzeniu planu służb uwzględnić należy fakt, że służba musi się rozpoczynać i kończyć w miejscowości, w której stacjonuje personel (miejscowość ta nazywana jest potocznie gniazdem). Celem tego etapu jest dobór segmentów występujących w planie obiegu taboru kolejowego bądź w planie cyr-

¹ Segment to szlak kolejowy zawarty między dwiema stacjami, z określonym czasem przyjazdu i odjazdu taboru kolejowego.

kulacji lokomotyw tak, aby dany segment był realizowany tylko raz w jednej służbie oraz aby liczba służb i koszty utworzonych służb² były jak najniższe [Özdemir 2009]. Drużyna trakcyjna w trakcie służby wykonuje wiele zadań, zatem czas służby obejmuje m.in. czasy przejazdu taboru między stacjami segmentu, czas przerw między segmentami, czas na zapoznanie się z przepisami przed rozpoczęciem służby, czas przejazdu z gniazda do stacji początkowej segmentu, czas przejazdu ze stacji końcowej segmentu do gniazda i czas przejazdu między stacją końcową segmentu i stacją początkową innego segmentu. Planiści przy określaniu planu służb muszą uwzględniać przepisy Kodeksu pracy oraz przepisy wewnętrzne przewoźnika kolejowego [Dziaduch, Hanczar 2018].

Ostatnim elementem planowania procesu przewozowego jest przypisanie pracowników do zaplanowanych służb. Etap ten jest skomplikowany, gdyż istnieje wiele założeń, które ograniczają możliwość prowadzenia pociągów przez poszczególnych pracowników, jak np. kwalifikacje pracowników do prowadzenia danej serii lokomotywy czy możliwość prowadzenia pociągu na wybranej relacji, określana jako znajomość szlaku.

Planowanie procesu przewozowego w transporcie kolejowym przebiega zgodnie z opisanymi uprzednio etapami w przedstawionej kolejności według podejścia hierarchicznego, w którym plan wyższego poziomu stanowi ramy dla planów poziomów niższych [Hanczar 2015].

3. Systemy informatyczne wspomaganie decyzji w zakresie planowania przewozów kolejowych

Aktualnie rynek rozwiązań informatycznych ma do zaoferowania szeroki zakres systemów wspomagających podejmowanie decyzji w obszarze planowania ruchu kolejowego. Na polskim rynku występują systemy producentów zagranicznych (jak np. GoalRail, HASTUS-Rail, IVU.rail, Mtram, Trapeze), ale pojawia się też coraz więcej systemów polskiej produkcji (jak np. DPKRailways, ISOR RVD, APS ASO, RailSoft). Systemy te obejmują wszystkie aspekty planowania i działania w organizacjach kolejowych: od strategicznych i planowania długoterminowego przez zarządzanie operacyjne każdego dnia.

Uczestnicy rynku kolejowego mają możliwość dokonania wyboru podczas zakupu programowania: mogą wybrać produkt gotowy bądź utworzony na zamówienie. Dostępne na rynku systemy cechują się konstrukcją modułową, która umożliwia kilkietapowe wdrażanie oprogramowania. Daje to możliwość indywidualnego określenia zakresu informatyzacji przedsiębiorstwa.

² Koszty utworzonych służb obejmują przede wszystkim wynagrodzenie zasadnicze, koszty pobytu poza miejscem stacjonowania pracowników, koszty przejazdów drużyn trakcyjnych jako pasażerów z miejsca stacjonowania załogi do stacji początkowej segmentu lub ze stacji końcowej segmentu do miejsca stacjonowania załogi i koszty przejazdów drużyn trakcyjnych jako pasażerów między segmentami.

3.1. Cel wdrożenia systemów

Na każdym etapie zarządzania przewozami i konstruowania planu przewozów niezwykle istotne jest optymalne wykorzystanie posiadanych zasobów osobowych i taborowych. Wdrożenie systemu informatycznego wykonującego to zadanie pozwala przedsiębiorstwu obniżyć koszty i utrzymywać je na najniższym możliwym poziomie.

Cel ten można osiągnąć przede wszystkim przez optymalizację rozkładów jazdy pociągów, obiegów pociągów, służb i harmonogramów pracy. Przy budowie rozkładu jazdy pociągów system z jednej strony wspomaga pracę konstruktorów w kompleksowej obsłudze wniosków przewoźników kolejowych, co umożliwia m.in. opracowanie tras pociągów na wykresach ruchu w sieci kolejowej i zajętości torów [PKP 2015], z drugiej zaś – umożliwia przedsiębiorstwu kolejowemu tworzenie i porównanie wielu różnych scenariuszy rozkładu jazdy przy np. jak najlepszym wykorzystaniu czasu pracy i parametrów taboru kolejowego, a także weryfikację, czy nie występują konflikty z innymi usługami kolejowymi lub z konserwacją czy wyłączeniem torów [Trapeze 2018]. Podczas optymalizacji obiegów system automatycznie konstruuje pociągi wykonujące przewozy według rozkładu z maksymalnym wykorzystaniem posiadanego taboru przy zachowaniu podlegających korekcie warunków i ograniczeń. Natomiast przy budowie planu służb dla załóg pociągów system dokonuje, na bazie obiegów, edycji zadań pracowników z maksymalnym wykorzystaniem ich czasu pracy, minimalizacją przerw i zbędnych przejazdów przy zachowaniu podlegających korekcie ograniczeń i warunków prawnych. Z kolei podczas optymalizacji harmonogramów pracy system informatyczny ma za zadanie obsadzić wszystkie służby przy jak najlepszym wykorzystaniu dostępnych pracowników oraz z uwzględnieniem obowiązujących przepisów prawa pracy oraz wewnętrznych regulaminów przedsiębiorstwa [DPK System 2018].

3.2. Moduły systemów

Dostępne na rynku systemy informatyczne wspomagające pracę przedsiębiorstw kolejowych różnią się modułami, jakie wchodzi w ich skład. Systemy te swoim zasięgiem pokrywają wszystkie obszary funkcjonowania przedsiębiorstw, począwszy od zarządzania procesami logistyki kolejowej, przez zarządzanie procesami handlowymi i rozliczeniowymi, na zarządzaniu dokumentacją kolejową skończywszy. Przykładowa funkcjonalność systemu informatycznego wspomagającego działalność kolejową została przedstawiona na rys. 1.

Funkcjonalność systemu podzielono na pięć kategorii: dane podstawowe, planowanie, zarządzanie operacyjne, rozliczenia i inne. Taka funkcjonalność systemu wspiera realizację procesu transportowego związanego z pracą wykonywaną w działach przewozowych, eksploatacyjnych i administracyjnych przedsiębiorstw kolejowych. Optymalizacja wykorzystania zasobów jest możliwa, pod warunkiem że wszystkie dane zgromadzone w poszczególnych modułach systemu są przechowywane we wspólnej bazie danych.



Rys. 1. Przykładowa funkcjonalność systemu informatycznego wspomagającego podejmowanie decyzji w zakresie obsługi przewozów kolejowych.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Pertrosoft 2018; Ivu 2018; DPK System 2018; Trapez 2018].

Kategoria „dane podstawowe” składa się z czterech modułów. Kartoteka pojazdów kolejowych zawiera dane ewidencyjne, fabryczne i techniczne pojazdów kolejowych [Petrosoft 2018], niezbędne do planowania przydziału zadań transportowych. Ewidencjonowanie wszelkich danych o pracownikach i zawartych z nimi umowach zatrudnienia odbywa się w module „kartoteka pracowników”. W module tym znajduje się pełna historia zatrudnienia pracownika, a także weryfikacja ważności uprawnień. Moduł ten powinien umożliwiać zdefiniowanie dowolnej grupy pracowników według kryteriów, takich jak np. stanowisko pracy, czas pracy czy kwalifikacje. Dane z modułu „kartoteka pracowników” są niezbędne m.in. do planowania pracy personelu czy rozliczania czasu ich pracy [Kisielewski 2016]. Kartoteka infrastruktury zawiera dane ewidencyjne, fabryczne i techniczne infrastruktury kolejowej, mapę sieci kolejowej oraz dane aktualne na temat wyłączenia infrastruktury kolejowej z użytkowania. Moduł ten zawiera zatem niezbędne informacje do ułożenia planu jazdy pociągów. Ewidencja m.in. danych adresowych i handlowych kontrahentów, rodzaju i wartości świadczonych dla nich usług i rodzaju przewożonych ładunków odbywa się w module kartoteka kontrahentów. Moduł ten odgrywa istotną rolę przy rozliczaniu umowy przewozowej bądź tworzeniu raportów [Petrosoft 2018].

Kategoria „planowanie” obejmuje moduły planowania przewozów oraz planowania napraw i przeglądów pojazdów kolejowych. W skład modułu planowania przewozów wchodzi dwa podmoduły:

- planowanie rozkładu jazdy,

- planowanie zasobów osobowych i taborowych.

Moduł planowania rozkładu jazdy z reguły umożliwia: automatyczne generowanie rozkładów (różnych scenariuszy), tabelaryczną i topograficzną edycję rozkładu, wyznaczenie tras i obiegów pociągów, integrację z systemami zarządców infrastruktury i optymalizację obiegów pociągów. Moduł optymalizacji obiegu ma zapewnić maksymalne wykorzystanie posiadanego taboru przy jednoczesnym zapewnieniu minimalnego możliwego kosztu eksploatacji i spełnieniu innych warunków związanych z realizacją transportu. Przy planowaniu obiegów system dokonuje wstępnego przetworzenia danych, polegającego np. na podziale pociągów na grupy według typów taboru, generuje dzienne obiegi pociągów minimalizujące przestoje i dojazdy techniczne oraz łączy obiegi w cykle kilkudniowe.

Natomiast moduł planowania zasobów pozwala na harmonogramowanie pracy pojazdów, harmonogramowanie służb oraz przydział personelu i pojazdów do zaplanowanych zadań przy uwzględnieniu dostępności zasobów. Przy tworzeniu planu służb system definiuje zadania składające się na pracę załogi, które umożliwią obsługę pociągów, i przydziela obsadę do służby. System tworzy harmonogram pracy pojazdów przy uwzględnieniu m.in. warunków technicznych infrastruktury i rodzaju taboru. Następnie, na podstawie dostępności infrastruktury i pojazdów kolejowych, dokonuje przydziału pojazdów kolejowych do zaplanowanych obiegów. System powinien zaplanować najbardziej efektywny plan z punktu widzenia pracodawcy, biorąc pod uwagę wszystkie przepisy krajowe i wewnętrzne [Kisielewski 2016].

Moduł planowania napraw i przeglądów pojazdów ma za zadanie pomóc w zidentyfikowaniu terminów napraw i przeglądów, biorąc pod uwagę np. czas pracy pojazdu kolejowego i dokumentację techniczną pojazdów kolejowych, co wiąże się z wyłączeniem taboru z użytkowania. Główną zaletą tego modułu jest generowanie harmonogramów napraw i przeglądów w czasie rzeczywistym. Dane z tego modułu są istotne przy planowaniu przydziału pojazdów do obiegów.

Moduły zarządzania przewozami i zarządzania realizacją napraw i przeglądów to trzecia kategoria zadań wypełnianych przez systemy informatyczne wspomagające podejmowanie decyzji w zakresie realizowanych przewozów. Moduł zarządzania przewozami przeznaczony jest dla dyspozytorów. Pozwala on m.in. monitorować status przewozu i pojazdy, zlokalizować przewożony ładunek na mapie, informować zainteresowanych o zmianie statusu przewozu i zareagować w czasie rzeczywistym na zakłócenia procesów przewozowych spowodowane np. absencją załogi, wyłączeniem infrastruktury z użytkowania, zdarzeniami kolejowymi czy uszkodzeniami pojazdów. Najważniejszymi zadaniami spełnianymi przez ten moduł są: kontrola obsady wszystkich prac przewozowych w dniu, możliwość szybkiego tworzenia obsady prac przewozowych pojazdami i pracownikami, gdy wystąpią zakłócenia, oraz weryfikacja *on-line* prawidłowego przypisania pojazdu i pracownika wraz z funkcją podpowiedzi dopasowania pracownika i pojazdu do pracy. Z kolei moduł zarządzania realizacją napraw i przeglądów m.in. monitoruje proces zaawansowa-

nia napraw i przeglądów oraz status pojazdu, informuje o zbliżającym się terminie przeglądu czy naprawy, nadzoruje terminy realizacji procesów w odniesieniu do planu oraz optymalizuje wykorzystanie zasobów.

Kategoria „rozliczenia” składa się z trzech modułów. W module „rozliczenia pracownicze” użytkownik ma możliwość określenia wynagrodzeń pracowników przedsiębiorstwa, biorąc pod uwagę ich absencję w pracy, przepracowaną liczbę godzin itp. Rozliczenia z kontrahentami obejmują m.in. ewidencję faktur, regulowanie zobowiązań płatniczych oraz kontrolę ściągania należności od kontrahentów. Natomiast moduł „inne rozliczenia” pozwala m.in. rozliczać wpływy z biletów, zarządzać cennikami i taryfami, analizować rentowność, przejazdy pasażerów i sprzedaż biletów.

W kategorii „inne” zestawiono dwa moduły. „Komunikacja z klientem” to moduł, który pozwala m.in. generować i kalkulować oferty dla klienta, zarządzać zamówieniami, śledzić przesyłkę na mapie i określić czas jej dostarczenia, zarejestrować list przewozowy czy zlecić naprawę taboru i innych usług. Moduł „raporty” m.in. generuje zestawienia dla Urzędu Statystycznego i Urzędu Transportu Kolejowego, wizualizuje dane systemowe (np. wskaźniki KPI) oraz udostępnia raporty innym użytkownikom systemu.

4. Modele decyzyjne w planowaniu przewozów w transporcie kolejowym

Modelowanie zadań planowania w przypadku planowania ruchu kolejowego jest uzależnione od rodzaju ruchu (pasażerski lub towarowy). Pociągi pasażerskie zawsze kursują zgodnie z ustalonym harmonogramem, podczas gdy pociągi towarowe mogą operować bez stałych harmonogramów i w zależności od możliwości sieci realizować pracę przewozową w różnych dniach. Pociągi pasażerskie są bardziej wrażliwe na czas, mają tym samym pierwszeństwo za każdym razem, gdy korzystają z tej samej sieci kolejowej z pociągami towarowymi.

4.1. Planowanie cyrkulacji wagonów

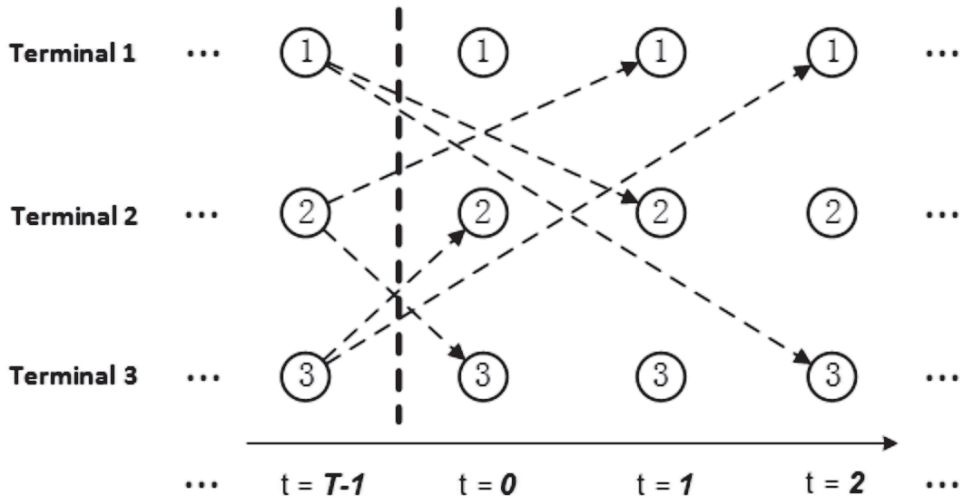
W pierwszej fazie rozwoju badań w obszarze zastosowania modeli decyzyjnych w planowaniu cyrkulacji wagonów skupiano się na uproszczonej wersji tego zagadnienia, określanej jako problem rozmieszczenia pustych wagonów (*distribution of empty freight cars problem*). Podstawowym problemem była odpowiedź na pytanie, ile wagonów należy umieścić w węzłach sieci kolejowej w kolejnym okresie tak, aby możliwe było zrealizowanie zakładanej pracy przewozowej. Jako pierwsze wskazać należy tutaj prace G. Feeneya [Feeney 1957] i D.C. Leddona oraz E. Wrathalla [Leddon, Wrathall 1968]. Niestety z założenia sformułowania te pozwalały na rozważanie wyłącznie zadań statycznych (tj. dotyczących jednego okresu). Stosunkowo proste modele decyzyjne mogły być rozwiązywane za pomocą klasycznego algorytmu sim-

plex. Jednak wiedząc, że podstawowy element tego zadania, tj. przemieszczenia się wagonów, nie został tutaj rozważony, modele te trudno wykorzystywać we wspomaganiu procesu planowania w analizowanym obszarze.

Kolejna grupa modeli związana z tym obszarem to zadania planowania wielkości floty (*fleet sizing problem*), w których mimo że nie uwzględniano podstawowego aspektu, jakim jest możliwość przemieszczania się wagonów, to stanowiła ona punkt wyjścia do właściwych modeli planowania cyrkulacji wagonów (*rolling stock circulaiton problem*). Z punktu widzenia decydenta wynikiem zastosowania takiego modelu było wspomaganie decyzji dotyczącej wielkości floty. W tym nurcie na uwagę zasługuje kilka prac. Pierwsza z nich to propozycja takich autorów, jak D. Zuckerman i C.S. Tapiero [Zuckerman, Tapiero 1980], którzy zaproponowali sposób wyznaczania liczby wagonów dla floty realizującej transport pasażerów. Kolejna praca, autorstwa W.C. Jordana i M.A. Turnquista [Jordan, Turnquist 1986], dotyczyła wyznaczenia liczby kontenerów wykorzystywanych w przedsiębiorstwie logistycznym. Natomiast badania G.J. Beaujona i M.A. Turnquista [Beaujon, Turnquist 1991] stanowiły połączenie zadania wyznaczenia wielkości floty z poprzednią grupą modeli wyznaczania rozmieszczenia. Autorzy rozważali model decyzyjny w celu wyznaczenia optymalnej liczby pojazdów, a także ich rozmieszczenia.

Kluczowe do rozwiązywania zagadnień cyrkulacji wagonów, w których uwzględnione zostały zarówno lokalizacja wagonów w kolejnych okresach planowania, jak i wielkości floty, było wprowadzenie sieci czas–lokalizacja (*time space network*). Opis tego podejścia został zaprezentowany przez W.C. Jordana i M.A. Turnquista [Jordan, Turnquist 1983], a jego szybki rozwój zapewnił W.B. Powell [Powell 1986], który dzięki sieci czas–lokalizacja rozważył planowanie przebiegów pustych wagonów równoległe z uwzględnieniem przebiegach wagonów pełnych. Koncepcja sieci czas–lokalizacja polega na przedstawieniu na jednym grafie całej sieci możliwych połączeń pomiędzy lokalizacjami w zadanym horyzoncie planowania. Zostało to osiągnięte przez odpowiednie powielenie węzłów grafu odpowiadających lokalizacjom. Przykładowo, jeśli rozważamy zadanie dla t okresów, to węzeł odpowiadający lokalizacji l_1 pojawi się w sieci czas–lokalizacja t razy. Dodatkowo węzeł odpowiadający lokalizacji l_1 w okresie $t + 1$ będzie połączony z węzłem odpowiadającym lokalizacji l_2 w okresie $t + 2$ tylko, gdy możliwe jest przemieszczenie się z l_1 do l_2 w ciągu jednego okresu. W sieci nie ma natomiast strzałek mających początek w węzłach odpowiadających okresowi t i koniec w węzłach odpowiadających okresom wcześniejszym niż t , gdyż nie ma możliwości cofania się w czasie. Przykład sieci czas–lokalizacja przedstawiono na rys. 2. Tak przygotowany graf jest wykorzystywany do rozwiązywania zagadnień cyrkulacji wagonów.

Interesującym wariantem modeli cyrkulacji wagonów są zagadnienia, w których są one rozważane równoległe z zadaniami przydziału lokomotyw (opisanymi w dalszej części artykułu). W propozycji J.F. Cordeau, F. Soumisa i J. Desrosiersa [Cordeau i in. 2000], dzięki zastosowaniu dekompozycji Bandersa, wskazano na możliwości rozwiązania wspomnianego problemu. Natomiast rozwiązywanie



Rys. 2. Przykładowa sieć czas–lokalizacja

Źródło: opracowanie własne.

większych zadań (w tym rzeczywistego zagadnienia VIA Rail Canada) wymagało podejścia heurystycznego, które przedstawiono w pracach J.F. Cordeau, G. Desaulniers, N. Lingaya, F. Soumisa i J. Desrosiers [Cordeau i in. 2001] i N. Lingaya, J.F. Cordeau, G. Desaulniers, J. Desrosiers i F. Soumisa [Lingaya i in. 2002].

Jak pokazano w literaturze, istnieje wiele wariantów modeli decyzyjnych, które pozwalają uwzględnić zarówno wielkość floty, jak i alokację pustych wagonów towarowych. Niestety można wskazać tylko kilka implementacji zrealizowanych w przedsiębiorstwach tych stosunkowo dobrze przeanalizowanych zadań. Jako pierwsze zastosowanie można wskazać planowanie cyrkulacji pustych wagonów Niemieckich Kolejach Federalnych, a rozwiązanie zostało opisane w pracy P. Waldingera i H.C. Siega [Waldinger, Sieg 1991]. Drugie badanie wykonał K. Holmberg, M. Joborn i J.T. Lundgren [Holmberg i in. 1998]. W pracy tej użyto sieci czas–lokalizacja i rozwiązano problem w przedsiębiorstwie Szwedzkie Koleje Państwowe. W kolejnej implementacji G.L. Giacco, A. D’Ariano i D. Pacciarelli [Giacco i in. 2014] zaproponowali zadanie programowania całkowitoliczbowego do planowania cyrkulacji wagonów wraz z zagadnieniem planowania przeglądów taboru. Ostatnia praca to propozycja P. Hanczara i P. Peterneka [Hanczar, Peternek 2015], którzy analizowali możliwość zastosowania programowania całkowitoliczbowego do planowania cyrkulacji pustych wagonów w przedsiębiorstwie transportowym PKPCargo w horyzoncie średnioterminowym. W celu rozwiązania zadania o rozmiarach rzeczywistych i stosunkowo długim horyzoncie (jak na zadania planowania cyrkulacji wagonów) zastosowano kroczący horyzont panowania. Zaproponowany model pozwolił na ocenę wariantów planowania i ich wpływu na dostępność wagonów.

4.2. Planowanie cyrkulacji lokomotyw

Na gruncie badań operacyjnych problem planowania cyrkulacji lokomotyw jest często określany jako *Locomotive Routing Problem* (LRP) lub *Locomotive Assignment Problem* (LA). Jednym z pierwszych artykułów przeglądowych na temat LRP jest praca [Cordeau i in. 1998], która zawiera wyczerpującą prezentację istniejących podejść do rozwiązywania tego problemu, jak również wersji samego zagadnienia. Ogólnie stwierdzić należy, że są dwie wersje podstawowe LRP: z pojedynczymi lokomotywami (*single locomotive*) i zespołami lokomotyw (*multiple locomotive*). W zagadnieniach z pojedynczymi lokomotywami zakłada się, że do przetransportowania każdego pociągu wykorzystana będzie wyłącznie jedna lokomotywa. Modele te są charakterystyczne dla sieci europejskich i do ich modelowania najczęściej wykorzystuje się zadanie minimalnego przepływu z ograniczeniami kierunku. Tę tematykę rozważają m.in. M.B. Wright [Wright 1989], M.A. Forbes, J.N. Holt i A.M. Watts [Forbes i in. 1991] oraz M. Fischetti i P. Toth [Fischetti, Toth 1997]. Natomiast LRP z zespołami lokomotyw, w których do przewiezienia pociągu wymagane jest użycie jednej lub więcej niż jednej lokomotywy, są spotykane głównie w zastosowaniach amerykańskich i kanadyjskich. Ta wersja zagadnienia jest omawiana m.in. przez S. Smitha i Y. Sheffiego [Smith, Sheffi 1988] oraz J.F. Cordeau, F. Soumisa i J. Desrosiersa [Cordeau i in. 1998]. Spośród najnowszych prac na uwagę zasługują artykuły R.K. Ahui, J. Liu, J.B. Orlina, D. Sharma i L.A. Shugharta [Ahuja i in. 2005] oraz B. Vaidyanathana, K. Ahui, J. Liu i L.A. Shugharta [Vaidyanathan i in. 2007].

Istotnym elementem sterowania przepływem lokomotyw jest konieczność uwzględnienia przeglądów okresowych. Problem ten jest rozważany w pracy G. Marotiego i L. Kroona [Maroti, Kroon 2005]. Jej autorzy przyjmują stosunkowo prostą wersję, w której każda lokomotywa musi podlegać przeglądowi okresowemu w najbliższych trzech dniach. Kolejna praca P. Hanczara [Hanczar 2015] to propozycja zastosowania modelu całkowitoliczbowego do rozwiązania rzeczywistego zagadnienia planowania cyrkulacji lokomotyw z uwzględnieniem przeglądów krótkookresowych. Autor zaprezentował rozwiązanie zadania dla danych rzeczywistych jednego z działających w Polsce przedsiębiorstw transportu kolejowego.

Mimo że zagadnienie to jest często rozważane teoretycznie, a badaczom udaje się rozwiązać ten problem o dużych rozmiarach (przykładowo A. Fugenschuh, H. Homfeld, A. Huck i A. Martin [Fugenschuh i in. 2006] rozwiązali zadania nawet dla 1537 pociągów towarowych i 4 klas lokomotywy), mało implementacji prezentowanej grupy modeli zakończyło się sukcesem w zastosowaniach praktycznych. Do tej grupy zaliczyć należy propozycję J.A. Sabino, J.E. Leala, T. Stutzlego i M. Birattarię [Sabino i in. 2010], którzy przedstawili algorytm mrówkowy do rozwiązywania problemu planowania lokomotyw. Uwzględniając szczegółową specyfikację wszystkich oczekujących planowanych zleceń przewozowych oraz dostępne lokomotywy, algorytm pozwolił zbudować harmonogram pracy lokomotyw w ramach terminalu kolejowego Tubarao.

4.3. Planowanie służb

Pierwsza próba rozwiązania problemu planowania służb miała miejsce w przemyśle lotniczym i została przedstawiona przez M. Minoux [Minoux 1984]. W tym podejściu redukcja rozmiaru modelu jest dokonywana przez rozwiązanie najkrótszego problemu ścieżki w sieci, w którym łuki reprezentują połączenia, a węzły – lokalizacje. Wykorzystano tutaj wprowadzoną wcześniej sieć czas–lokalizacja omówioną w poprzednim podpunkcie dotyczącym planowania cyrkulacji wagonów. W rozwiązaniu uwzględniono ograniczenia związane z połączeniami, ale nie uwzględniono warunków połączenia dla całego toru lotu (np. czasu pracy).

Kolejną propozycją jest artykuł S. Lavoiego, M. Minoux i E. Odierego [Lavoie i in. 1988], w którym problem został przedstawiony jako sieć, w której węzły odpowiadają wymaganym do wykonania zadaniom, a łuki określają kolejność ich wykonania. Analogiczne podejście w przypadku rozwiązywania tego problemu dla załóg Air France zaproponowali G. Desaulniers, J. Desrosiers, Y. Dumas, S. Marc, B. Rioux, M.M. Solomon i F. Soumis [Desaulniers i in. 1997].

W przypadku zagadnienia planowania służb wyróżnić można dwa podejścia do jego rozwiązywania. Pierwsze z nich to podejście wykorzystujące sieć czas–lokalizacja, a drugie polega na wygenerowaniu wszystkich możliwych wariantów służb, a następnie wyborze spośród nich zestawu gwarantującego spełnienie wszystkich wymaganych ograniczeń i minimalizujących zadaną funkcję celu. Skuteczność obu ujęć do planowania służb jest trudna do porównania, ponieważ pierwsze podejście wymaga więcej czasu na rozwiązanie problemu, podczas gdy wariant sieci dyżurnej wymaga więcej pamięci. W roku 1999 podjęto próbę rozwiązania kwestii związanej z ilością pamięci niezbędnej do uzyskania rozwiązania w drugim podejściu [Hjorring, Hansen 1999], używając obu podejść równolegle. W zależności od potrzeb część sieci czas–lokalizacja została przeddefiniowana przez grupowanie wybranych zadań.

W kolejnych latach zauważyć można skuteczne wykorzystanie metod optymalizacji przy planowaniu służb. Na przykład w pracach A. Caprari, M. Fischettiego, P. Totha, P.L. Guidy i D. Viga [Caprara i in. 1997] oraz w pracy [Caprara i in. 1999] przedstawiono trójfazowy algorytm. Najważniejsza druga faza wykorzystuje podejście *set partitioning* z relaksacją Lagrange’a. Bardzo ważne badania w tej dziedzinie to propozycja L. Kroona i M. Fischettiego [Kroon, Fischetti 2001]. W rozwiązywaniu problemu planowania służb autorzy zastosowali programowanie z ograniczeniami (*constraint programming*), które wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej znacznie poprawiły uzyskane rozwiązania. Interesującą metodę generowania wszystkich dopuszczalnych służb wraz z heurystykami do ich filtrowania przedstawili A. Wren, S. Fores, A. Kwan, R. Kwan, M. Parker i L. Proll [Wren i in. 2003]. Rezultatem ich prac było stworzenie systemu TRACS II do planowania służb w przedsiębiorstwie kolejowym w Wielkiej Brytanii.

Alternatywne formuły matematyczne dla problemu planowania służb na poziomie taktycznym w kolejach zostały przedstawione przez A.C. Suyabatmaza i G. Sahina [Suyabatmaz, Sahin 2015]. Autorzy określili minimalną wymaganą wielkość załogi zgodnie z ograniczeniami dotyczącymi wykonalności i łączności harmonogramów. Ponadto przedstawiono dowody, że formuła oparta na łuku jest realnym podejściem.

Jak to zostało przedstawione, w obszarze planowania służb mamy do czynienia z wieloma zastosowaniami z udokumentowanym wdrożeniem.

5. Zakończenie

Rozlokowanie kluczowych zasobów osobowych i taborowych jest jedną z najważniejszych operacji kolejowych. Właściwa alokacja zasobów może bowiem w istotny sposób obniżyć koszty lub zwiększyć rentowność przedsiębiorstwa kolejowego. Problem alokacji zasobów związany jest z procesem podejmowania decyzji i można go rozwiązać z użyciem metod zaawansowanych, takich jak optymalizacja. Nowoczesne systemy wspomagania działalności kolejowej korzystają z algorytmów optymalizacyjnych do rozwiązania tego problemu.

W artykule dokonano przeglądu modeli decyzyjnych pod kątem możliwości ich zastosowania w modułach systemów informatycznych wspomagających podejmowanie decyzji w zakresie planowania przewozów w transporcie kolejowym. Zidentyfikowano etapy procesu planowania przewozów towarowych i pasażerskich w ruchu kolejowym oraz scharakteryzowano także moduły systemu wspomagania działalności kolejowej. Ponadto opisano modele decyzyjne stosowane do rozwiązywania problemów planowania przepływu wagonów, planowania cyrkulacji lokomotyw i planowania służb, które mogą być zaimplementowane w formie modułów w systemach informatycznych.

Literatura

- Ahuja R.K., Liu J., Orlin J.B., Sharma D., Shughart L.A., 2005, *Solving real-life locomotive scheduling problems*, Transportation Science, vol. 39, no. 4, s. 503-517.
- Beaujon G.J., Turnquist M.A., 1991, *A model for fleet sizing and vehicle allocation*, Transportation Science, vol. 25, no. 1, s. 19-45.
- Caprara A., Fischetti M., Toth P., Guida P.L., Vigo D., *Algorithms for railway crew management*, Mathematical Programming B, no. 79, s. 125-141.
- Caprara A., Fischetti M., Toth P., Vigo D., Guida P.L., 1999, *Solution of Large-Scale Railway Crew Planning Problems: The Italian Experience*, [w:] Wilson N. (red.), *Computer-Aided Transit Scheduling*, Economics and Mathematical Systems, Springer, Heidelberg, s. 1-18.
- Cordeau J.F., Desaulniers G., Lingaya N., Soumis F., Desrosiers J., 2001, *Simultaneous locomotive and car assignment at VIA Rail Canada*, Transportation Research Part B: Methodological, vol. 35, iss. 8, s. 767-787.

- Cordeau J.F., Soumis F., Desrosiers J., 1998, *A Benders decomposition approach for the locomotive and car assignment problem*, Technical Report G-98-35, GERAD, Ecole des Hautes Etudes Commerciales de Montreal, Montreal.
- Cordeau J.F., Soumis F., Desrosiers J., 2000, *A benders decomposition approach for the locomotive and car assignment problem*, *Transportation Science*, vol. 34, no. 2, s. 133-149.
- Cordeau J.F., Toth P., Vigo D., 1998, *A survey of optimization models for train routing and scheduling*, *Les Cahiers de GERAD*, *Transportation Science*, vol. 32, iss. 4, s. 380-404.
- Desaulniers G., Desrosiers J., Dumas Y., Marc S., Rioux B., Solomon M.M., Soumis F., 1997, *Crew pairing at Air France*, *European Journal of Operations Research*, vol. 97, iss. 2, s. 245-259.
- DPK System, 2018, <https://www.dpkssystem.com> (15.12.2018).
- Dziaduch I., Hanczar P., 2018, *Railway crew scheduling in passenger transportation – optimization approach*, *Mathematical Economics*, no. 14(21).
- Feeney G., 1957, *Controlling the Distribution of Empty Freight Cars*, *Proceedings of the Tenth National Meeting*, *Operations Research Society of America*, Baltimore.
- Fischetti M., Toth P., 1997, *A package for locomotive scheduling*, Technical Report DEIS-OR-97-16, University of Bologna, Bologna, Italy.
- Forbes M.A., Holt J.N., Watts A.M., 1991, *Exact solution of locomotive scheduling problems*, *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 42, no. 10, s. 825-831.
- Fugenschuh A., Homfeld H., Huck A., Martin A., 2006, *Locomotive and wagon scheduling in freight transport*, [w:] Jacob R., Muller-Hannemann, M. (red.), *ATMOS 2006-6th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways*, Internationales Begegnungs- und Forschungszentrum für Informatik (IBFI), Zurich, Switzerland.
- Giacco G.L., D’Ariano A., Pacciarelli D., 2014, *Rolling stock rostering optimization under maintenance constraints*, *Journal of Intelligent Transport Systems: Technology, Planning, and Operations*, vol. 18, iss. 1, s. 95-105.
- Gołębiowski P., Jacyna M., 2013, *Wybrane problemy planowania ruchu kolejowego*, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, z. 97, s. 123-133.
- Hanczar P., 2015, *Modele decyzyjne w planowaniu cyrkulacji lokomotywy w kolejowym transporcie towarowym*, *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, nr 382, s. 183-194.
- Hanczar P., Peternek P., 2015, *The short-term car flow planning model in rail freight company – case study*, *Transportation Research Procedia*, vol. 10, s. 605-614.
- Hjorring C., Hansen J., 1999, *Column generation with a rule modelling language for airline crew pairing*, 34th Annual Conference of the Operational Research Society of New Zealand, s. 133-142.
- Holmberg K., Joborn M., Lundgren J.T., 1998, *Improved empty freight car distribution*, *Transportation Science*, vol. 32, no. 2, s. 163-173.
- Ivu, 2018, <https://www.ivu.de> (15.12.2018).
- Jordan W.C., Turnquist M.A., 1983, *A stochastic, dynamic network model for railroad car distribution*, *Transportation Science*, vol. 17, iss. 2, s. 123-145.
- Kisielewski P., 2016, *The system of IT support for logistics in the rail transport*, *Archives of Transport*, vol. 40, iss. 4, s. 39-50.
- Kroon L., Fischetti M., 2001, *Crew scheduling for Netherlands Railways, Destination: Customer*, [w:] Voss S., Daduna J. (red.), *Computer-Aided Scheduling of Public Transport, Economics and Mathematical Systems*, Springer, Heidelberg, s. 181-201.
- Lavoie S., Minoux M., Odier E., 1988, *A new approach for crew pairing problems by column generation with an application to air transportation*, *European Journal of Operations Research*, no. 35, s. 45-58.
- Leddon D.C., Wrathall E., 1968, *Scheduling empty freight car fleets on the Louisville and Nashville railroad*, *Cybernetic Electronics Railways*, no. 3.
- Lingaya N., Cordeau J.F., Desaulniers G., Desrosiers J., Soumis F., 2002, *Operational car assignment at VIA Rail Canada*, *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 36, iss. 9, s. 755-778.

- Maroti G., Kroon L., 2005, *Maintenance routing for train units: The transition model*, Transportation Science, vol. 39, no. 4, s. 518-525.
- Minoux M., 1984, *Column Generation Techniques in Combinatorial Optimization: A New Application to Crew Pairing Problems*, XXIVth AGIFORS Symposium, Strasbourg, France.
- Özdemir U., 2009, *Methodology for Crew-Pairing Problem in Airline Crew Scheduling*, Bogazici University, <https://www.cmpe.boun.edu.tr/~gungort/theses/Methodology%20for%20Crew-Pairing%20Problem%20in%20Airline%20Crew%20Scheduling.pdf> (10.11.2018).
- Pertosoft, 2018, <https://petrosoft.pl> (15.12.2018).
- PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2015, *Instrukcja o rozkładzie jazdy pociągów (Ir-11)*, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. – Centrum Rozkładów Jazdy, Warszawa.
- Powell W.B., 1986, *A stochastic model of the dynamic vehicle allocation problem*, Transportation Science, vol. 20, no. 2, s. 117-129.
- Sabino J.A., Leal J.E., Stutzle T., Birattari M., 2010, *A multi-objective ant colony optimization method applied to switch engine scheduling in railroad yards*, Pesquisa Operacional, vol. 30, no. 2, s. 486-514.
- Smith S., Sheffi Y., 1988, *Locomotive scheduling under uncertain demand*, Transportation Research Record 1251, s. 45-53.
- Suyabatmaz A.Ç., Sahin G., 2015, *Railway crew capacity planning problem with connectivity of schedules*, Transportation Research, Part E, vol. 84, s. 88-100.
- Trapeze, 2018, <https://www.trapezegroup.pl> (15.12.2018).
- Turnquist M.A., Jordan W.C., 1986, *Fleet sizing under production cycles and uncertain travel times*, Transportation Science, vol. 20, no. 4, s. 227-236.
- Vaidyanathan B., Ahuja R.K., Liu J., Shughart L.A., 2007, *Real-life locomotive planning: New formulations and computational results*, Transportation Research, Part B: Methodological, vol. 42, iss. 2, s. 147-168.
- Waldinger P., Sieg H.C., 1991, *Rechnergesteuerte Leerwagenverteilung (LWV)*, Die Bundesbahn, Germany, no. 4, s. 389-431.
- Wren A., Fores S., Kwan A., Kwan R., Parker M., Proll L., 2003, *A flexible system for scheduling drivers*, Journal of Scheduling, no. 6, s. 437-455.
- Wright M.B., 1989, *Applying stochastic algorithms to a locomotive scheduling problem*, Journal of the Operational Research Society, vol. 40, no. 2, s. 187-192.
- Zuckerman D., Tapiero C.S., 1980, *Random vehicle dispatching with options and optimal fleet size*, Transportation Research, Part B: Methodological, vol. 14, iss. 4, s. 361-368.