

Katarzyna Palikowska¹

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Zarządzanie opóźnieniami w ruchu kolejowym z zastosowaniem programowania ewolucyjnego

1. WPROWADZENIE

Zarządzanie ruchem kolejowym polega między innymi na zapewnieniu realizacji planowego rozkładu jazdy i właściwej, szybkiej reakcji na nieoczekiwane zdarzenia wymagające modyfikacji tego rozkładu. Nieoczekiwane zdarzenia związane są najczęściej z awarią taboru lub awarią elementu układu torowego i w konsekwencji prowadzą do opóźnienia jazdy (opóźnienia pierwotnego) w stosunku do jazdy planowanej rozkładem. Opóźnienie pierwotne pociągu lub grupy pociągów może spowodować opóźnienia wtórne w obszarze całej sieci kolejowej.

Problem właściwego zarządzania opóźnieniami w ruchu kolejowym jest problemem decyzyjnym, polegającym na rozwiązywaniu konfliktów wynikających ze współzawodnictwa opóźnionych pociągów w dostępie do określonych elementów układu torowego (torów szlakowych, torów stacyjnych, węzłów torowych). Rozstrzygnięcie konfliktu w dostępie do elementu układu torowego, podjęcie decyzji o wstrzymaniu biegu pociągu, zaniechaniu lub zapewnieniu skomunikowania winno odbyć się z zachowaniem zasad bezpieczeństwa oraz winno uwzględniać cele biznesowe różnych grup (pasażerów, przewoźników, zarządców infrastruktury itd.).

Problem zarządzania opóźnieniami różni się zasadniczo od problemu układania rozkładu jazdy. Zarządzanie opóźnieniami zmierza do uzyskania biegu jak najbardziej zbliżonego do pierwotnego rozkładu jazdy. Założenia przyjęte w konstrukcji rozkładu jazdy oddziałują na złożoność problemu zarządzania opóźnieniami między innymi poprzez:

- zapasy w czasach jazdy i postojów ułatwiające niwelację opóźnień,
- specyfikację wymaganych skomunikowań,
- intensywność połączeń.

Rozkładowe zapasy w czasach jazdy i postojów umożliwiają niwelowanie niewielkich opóźnień przez obsługę pociągu (regulacja prędkości jazdy) lub dyspozytora (skrócenie czasu postoju). Intensyfikacja połączeń rozkładowych zwiększa stopień wykorzystania sieci, zwiększając tym samym potencjalną liczbę konfliktów oraz ryzyko propagacji ewentualnych opóźnień.

Skomunikowanie pociągów może mieć wpływ na cały obszar sieci. W przypadku skomunikowań pociągów różnych przewoźników pojawia się problem uzyskania przez dyspozytora zgody przewoźnika pociągu, który oczekując na skomunikowanie opóźnia bieg, co w konsekwencji może spowodować rozszczeni pasażerów niekorzystających ze skomunikowania (wynikające z niedotrzymania rozkładowego czasu jazdy).

Zarządzanie opóźnieniami obejmuje predykcję propagacji opóźnień i minimalizację ich konsekwencji w obszarze całej sieci poprzez tworzenie planu następujących po sobie decyzji z uwzględnieniem ich wzajemnego wpływu.

2. DOTYCHCZAS STOSOWANE METODY

Znaczenie właściwego zarządzania opóźnieniami rośnie. Punktualność rozumiana jako zgodność z rozkładem jazdy jest ważnym elementem oceny jakości oferowanych usług przewozowych. Mimo wielu

¹ katarzyna.palikowska@wilis.pg.gda.pl

podejść stosowanych w rozwiązaniu zagadnienia problem pozostaje otwarty – szczególnie jeżeli chodzi o jednoczesne uwzględnienie wielu kryteriów (minimalizacja opóźnień i ich propagacji, zapewnienie skomunikowań, zapewnienie satysfakcji pasażerów, uwzględnienie aspektów ekonomicznych: minimalizacji kosztów, maksymalizacji zysków).

Przegląd stosowanych strategii wspomagających zarządzanie opóźnieniami w ruchu kolejowym został przedstawiony w tabeli 1.

Tabela 1. Przegląd metod stosowanych w zarządzaniu opóźnieniami

Metoda	Autor	Komentarz
model MIP (<i>Mixed Integer Programming</i>)	Schöbel [9], Törnquist [10]	Złożoność obliczeniowa modelu utrudnia zastosowanie w czasie rzeczywistym. Model wymaga by funkcja celu była liniowa, co ogranicza stosowalność w optymalizacji wielokryterialnej.
podziału i ograniczeń (<i>Branch & Bound</i>)	D' Ariano [2], Wolfenburg [11]	Metoda przeglądania przestrzeni rozwiązań połączona z modelem symulacyjnym z przesuwającym horyzontem predykcji.
heurystyczna	Sahin [8]	Algorytmy przybliżone uwzględniające podzbiór przestrzeni rozwiązań, pozwalające uzyskać rozwiązanie zbliżone do optymalnego w czasie wielomianowym (redukcja złożoności wykładniczo rosnącej wraz ze wzrostem liczby konfliktów).
sieci PERT (<i>Program Evaluation & Review Technique</i>)	Kanai [5]	Węzły sieci PERT odpowiadają zdarzeniom odpowiadającym rozkładowym przyjazdom / odjazdom pociągów, łuki reprezentują relacje kolejnościowe i są opisane wartościami minimalnych odstępów czasowych pomiędzy zdarzeniami.
model ogólny (<i>job-shop</i>) szeregowania zadań	Gao [3], D' Ariano [2]	Elementy układu torowego traktowane są jako maszyny przydzielane pociągom – zadaniom, składającym się z ciągu następujących po sobie operacji odpowiadających przyjazdom i odjazdom.

Źródło: opracowanie własne.

Zaprezentowany w tabeli 1 przegląd zawiera wybrane metody. Zakres metod stosowanych jest szerszy i obejmuje dodatkowo modele oparte o sieci Petri'ego, heurystyki PSO, algorytmy *tabu search*, programowanie dynamiczne, sterowanie rozmyte (He [4]) i wiele innych.

W zaprezentowanych modelach uwzględniono szereg ograniczeń:

- rozkładowe czasy przyjazdu i odjazdu,
- dopuszczalne prędkości,
- minimalne czasy postoju,
- warunki wyprzedzania,
- skomunikowania pociągów,
- pojemność elementów układu torowego (np. liczbę torów stacyjnych).

Najczęściej stosowanym kryterium jest minimalizacja opóźnień pociągów względem planowanego rozkładu jazdy w obszarze całej sieci.

W pracy Wolfenburg [11] zastosowano ważoną sumę opóźnień na końcu horyzontu predykcji, w której wagi opóźnień pierwotnie uzależnione od kategorii pociągów, w toku symulacji ustalane są dynamicznie w zależności od aktualnej sytuacji ruchowej.

Opóźnienia pociągów przekładają się bezpośrednio na obniżenie satysfakcji pasażerów. W pracy Kanai [5] modelowano zachowania pasażerów w sytuacji wystąpienia opóźnień (zmiana planu podróży) a jako kryterium przyjęto satysfakcję pasażerów, z uwzględnieniem wpływu zatłoczenia pojazdu, wielkości opóźnienia, czasu opóźnienia w stosunku do czasu spędzonego przez pasażera w pociągu, liczby i wygody przesiadek.

W pracach (Gao [3], Yamada [12]) do rozwiązania modelu ogólnego (*job-shop*) szeregowania zadań wykorzystano algorytm genetyczny. Problem zarządzania opóźnieniami w ruchu kolejowym uzyskuje

wygodną reprezentację w kategoriach tego modelu, co umożliwiło, po uwzględnieniu specyfiki ruchu kolejowego, efektywne wykorzystanie algorytmów genetycznych (He [4]).

W pracy D'Ariano [2] opartej również na modelu ogólnym (*job-shop*) szeregowania zadań zostały wykorzystane grafy alternatywne (dysjunkcyjne) odwzorowujące strukturę sieci kolejowej. Przegląd przestrzeni rozwiązań został dokonany metodą podziału i ograniczeń.

Niniejszy artykuł jest kontynuacją przedstawienia problemu zarządzania opóźnieniami w ruchu kolejowym jako problemu ogólnego (*job-shop*) szeregowania zadań. W stosunku do pracy D'Ariano [2] dopuszcza zmianę struktury sieci na skutek możliwych awarii. W artykule zaprezentowano zastosowanie algorytmu genetycznego z wielokryterialną funkcją oceny opartą na wynikach procesu symulacji umożliwiającego predykcję propagacji opóźnień i utraty ewentualnych skomunikowań w obszarze całej sieci.

3. OPIS MODELU

Rzeczywista struktura sieci kolejowej odwzorowana jest w postaci grafu, którego węzłami są elementy układu torowego (odcinki blokowe torów szlakowych, tory stacyjne, węzły torowe). Krawędzie grafu wskazują na połączenia między tymi węzłami. Węzeł opisany jest:

- pojemnością (dopuszczalną liczbą równocześnie przypisanych pociągów),
- rodzajem (tor stacyjny, tor szlakowy, węzeł torowy),
- długością,
- maksymalną dopuszczalną prędkością przejazdu,
- minimalnym czasem przejazdu (uwzględniającym niezbędne czasy hamowania),
- kategorią.

Węzeł torowy zestawiający drogę przebiegu ma jednostkową pojemność tzn. jest blokowana do czasu zakończenia przejazdu przez pojedynczy pociąg.

Równorzędne odcinki torów tj. połączone z tymi samymi węzłami torowymi mogą być odwzorowane jako pojedyncze węzły o pojemności równej liczbie tych odcinków.

Tor szlakowy podzielony na odstępy blokowe może być odwzorowany zarówno w postaci oddzielnych węzłów o jednostkowej pojemności połączonych szeregowo jak i w postaci pojedynczego węzła o pojemności równej liczbie odcinków. Wymóg związany z minimalnym odstępem oddzielającym pociągi jadące tym samym torem szlakowym jest uwzględniany w fazie symulacji ruchu pociągów podczas oceny rozwiązań.

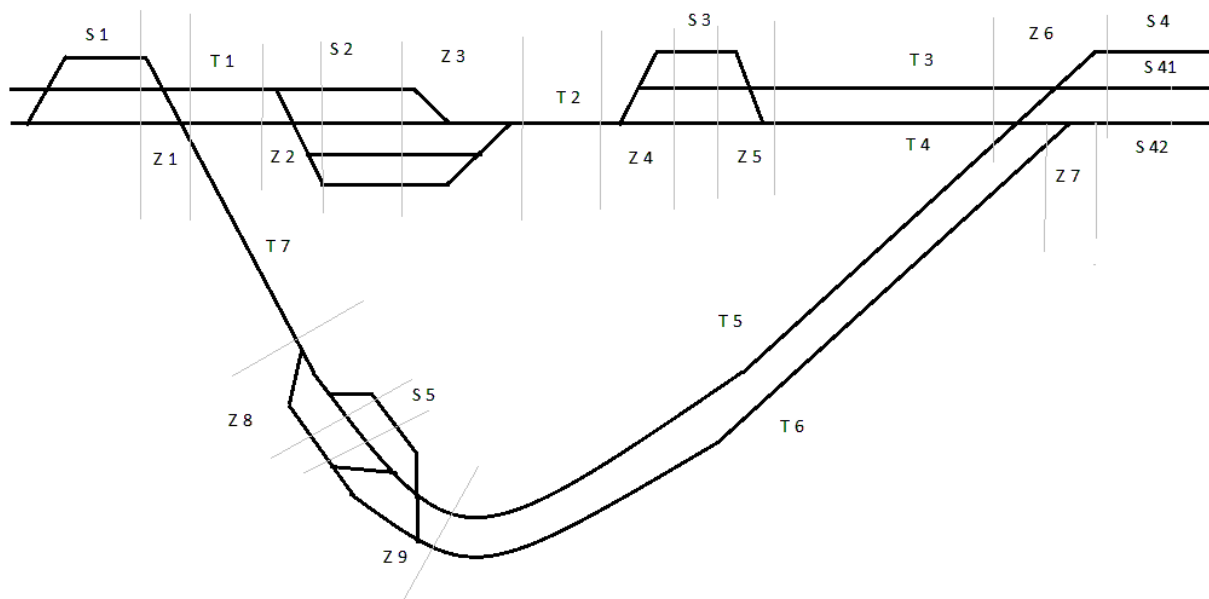
Stacja złożona z równorzędnych torów stacyjnych stanowi pojedynczy węzeł grafu o pojemności równej liczbie posiadanych torów stacyjnych. Stacja o zróżnicowanych parametrach torów stacyjnych (różne kategorie, różne długości torów lub odmienna struktura połączeń z węzłami torowymi) jest odwzorowywana w postaci kilku węzłów w grafie odpowiadającym grupom równorzędnych torów stacyjnych.

Przykładowa struktura sieci została przedstawiona na rys. 1. Oznaczone na niej zostały grupy torów stacyjnych (S), torów szlakowych (T) i węzłów torowych (Z).

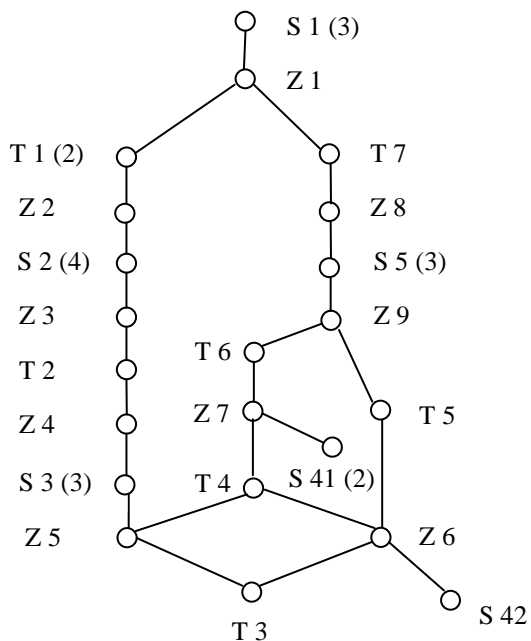
Rys. 2 przedstawia graf, którego wierzchołki odpowiadają elementom układu torowego sieci z rys. 1 (w nawiasach podano pojemność większą niż jednostkowa). Krawędzie grafu odzwierciedlają istniejące w sieci połączenie pomiędzy elementami układu. Struktura sieci (graf) na potrzeby implementacji reprezentowana jest w postaci listy sąsiedztwa (rys. 3).

Struktura sieci może ulegać dynamicznym zmianom na skutek awarii lub planowanych wyłączeń elementów układu torowego z użytkowania. Przyjęto, że awaria / wyłączenie odwzorowywana jest przez zmniejszenie pojemności węzła reprezentującego równorzędną grupę elementów układu torowego. Lista wyłączeń / awarii obejmuje oznaczenie elementu układu torowego wraz z godzinami od – do wyłączenia z użytkowania.

Krawędź reprezentująca połączenie między dwoma węzłami w grafie w trakcie procesu symulacji opisana jest dwoma liczbami odpowiadającymi pojemnościom węzłów, które łączy. Zerowa pojemność krawędzi przy niezerowej pojemności węzła zapobiega zestawieniu sprzecznego przebiegu (wykorzystaniu dopuszczalnej pojemności węzła do zestawienia sprzecznego przebiegu).



Rys. 1 Przykładowa struktura sieci kolejowej



Rys. 2. Graf odwzorowujący sieć z rys. 1

Z 1	→	T 1	→	T 7	→	S 1
Z 2	→	T 1	→	S 2		
Z 3	→	T 2	→	S 2		
Z 4	→	T 2	→	S 3		
Z 5	→	T 3	→	T 4	→	S 3
Z 6	→	T 3	→	T 4	→	T 5
Z 7	→	T 4	→	T 6	→	S 41
Z 8	→	T 7	→	S 5		
Z 9	→	T 5	→	T 6	→	S 5

Rys. 3. Lista sąsiedztwa odwzorowująca graf z rys. 2

3.1. Rozkład jazdy

Rozkład jazdy reprezentowany jest w postaci listy zadań (ang. *job*) odpowiadających poszczególnym pociągom. Zadanie (kurs pociągu) składa się z ciągu operacji odpowiadających zajęciu elementów układu torowego (węzłów grafu) w ściśle określonej kolejności. Przyjęto, że operacja (zajęcie elementu układu torowego) winna być opisana rozkładowym czasem przyjazdu i odjazdu jedynie w przypadku gdy elementem jest stacja (grupa torów stacyjnych).

Zaprezentowane podejście umożliwia elastyczne podejście i możliwość szczegółowego podania rozkładu jazdy z dokładnością do zajmowanych torów szlakowych bądź też ograniczenia się jedynie do podania stacji na trasie. Stacja zawierająca kilka grup torów stacyjnych odwzorowana w postaci kilku węzłów grafu w rozkładzie jazdy może być opisane z dokładnością do węzła lub podana w formie zagregowanej odpowiadającej dowolnej grupie torów (dowolnemu torowi stacyjnemu).

P 001	S 1		S 2		S 3		S 4	
	0000	0010	0036	0040	0055	0060	0080	0000
P 002	S 1		S 5		S 4			
	0000	0005	0060	0065	0120	00:00		
P 003	S 4		S 3		S 2		S 1	
	0000	0005	0020	0025	0032	0037	0070	0000
P 004	S 2		S 3		S 4		S 5	
	0060	0070	0090	0100	0125	0130	0180	0000

Rys. 4. Przykład rozkładu jazdy

Rozkład jazdy zawierający połączenie dwóch stacji jest automatycznie uzupełniany podczas procesu symulacji o brakujące elementy układu torowego łączące wymienione stacje na podstawie aktualnej sytuacji ruchowej i aktualnej struktury sieci (dostępności poszczególnych elementów układu torowego).

<i>P 001</i>	S 1		Z 1	T 1	Z 2	S 2		Z 3	T 2	Z 4	S 3		Z 5	T 3	Z 6	S 41
	00	00				00	00				00	00				00
	00	10				36	40				55	60				80

Rys. 5. Przykład uzupełnionego rozkładu jazdy

Pociąg opisany jest:

- kategorią,
- długością składu,
- maksymalną dopuszczalną prędkością,
- wyjściową wagą minuty opóźnienia.

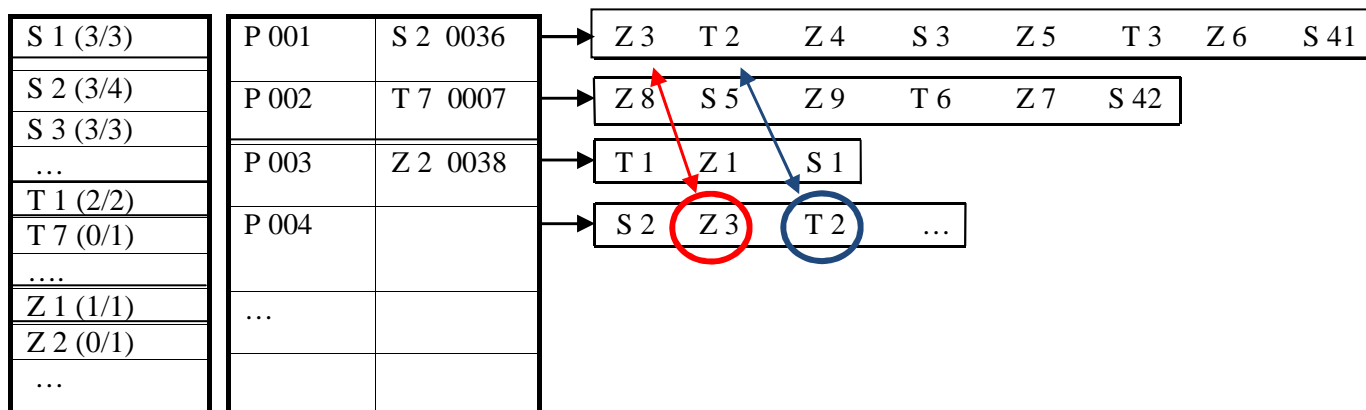
Z pociągami związana jest lista pożądaných skomunikowań wiążąca pary pociągów i stacje skomunikowania. Zapewnienie skomunikowania pociągów w sytuacjach awaryjnych stanowi jeden z ważniejszych aspektów dbałości o satysfakcję pasażera, szeroko omawianym w literaturze.

W nawiązaniu do pracy Kanai [5] w podejściu prezentowanym w niniejszym artykule wprowadzono dodatkową strukturę na potrzeby uwzględnienia satysfakcji pasażera. Dodatkowa struktura reprezentuje ilościowo i jakościowo sprzedaż biletów / zawartych umów przewozowych. Sprzedany bilet / zawarta umowa dotyczy pociągu (kilku pociągów w przypadku skomunikowanego połączenia z przesiadkami) z określoną stacją początkową, stacjami pośrednimi i stacją końcową. Każda stacja opisana jest godziną odjazdu i przyjazdu. Kryterium optymalizacyjne, o ile ustawiony horyzont predykcji na to pozwala, uwzględnia dotrzymanie godziny przyjazdu do stacji docelowej. Wprowadzenie pojęcia biletu i sprzedanej liczby biletów nadaje priorytety skomunikowaniom oraz pociągom odzwierciedlające interesy pasażerów.

3.2. Stan systemu

Na stan systemu s_i w chwili czasu t_i składa się stan sieci (bieżąca struktura) wraz z zajętością poszczególnych węzłów (dostępna pojemnością) oraz stan wszystkich pociągów, które nie zakończyły biegu. Stan pociągu opisany jest elementem układu torowego, na którym pociąg aktualnie się znajduje wraz z godziną wjazdu na dany element.

Z każdym pociągiem w stanie s_i związana jest uporządkowana lista elementów układu torowego stanowiąca plan dalszej drogi pociągu do stacji końcowej odpowiadająca uzupełnionemu rozkładowi jazdy z rys. 5.



Rys. 6. Struktury opisujące stan systemu w chwili t_i

Na rys. 6 zostały zaznaczone w postaci dwukierunkowych strzałek łuki dysjunkcyjne reprezentujące potencjalne konflikty w dostępie do elementów układu torowego (dążenie do zajęcia tego samego elementu układu torowego przez więcej niż jeden pociąg).

Zaprezentowany sposób podejścia odpowiada modelowi ogólnemu (*job-shop*) szeregowania zadań z grafami alternatywnymi opartymi o łuki dysjunkcyjne opisanemu w pracy D'Ariano [2]. Autor wspomnianej pracy do rozwiązania modelu zastosował metodę podziału i ograniczeń (*branch & bound*) zakładając stałą strukturę sieci do końca horyzontu predykcji, co stanowi ograniczenie metody.

Struktury użyte do opisu stanu systemu (rys. 6) dzięki przechowywaniu aktualnej pojemności węzłów pozwalają na dynamiczne uwzględnienie struktury sieci w procesie symulacji.

4. OPIS ROZWIĄZANIA

Rozwiązanie problemu szeregowania zadań opisanego strukturami zaprezentowanymi na rys. 6 uzyskano poprzez zastosowanie algorytmu genetycznego. Kryterium optymalizacyjne (1) wyraża dążenie do minimalizacji ważonej sumy opóźnień (opóźnienie rozumiane jako różnica pomiędzy rzeczywistym czasem osiągnięcia stacji docelowej a czasem określonym w rozkładzie jazdy).

Algorytmy genetyczne wielokrotnie stosowano z sukcesem do rozwiązywania modelu ogólnego szeregowania zadań, w którym struktura maszyn jest stała (Gao [3], Yamada [12]).

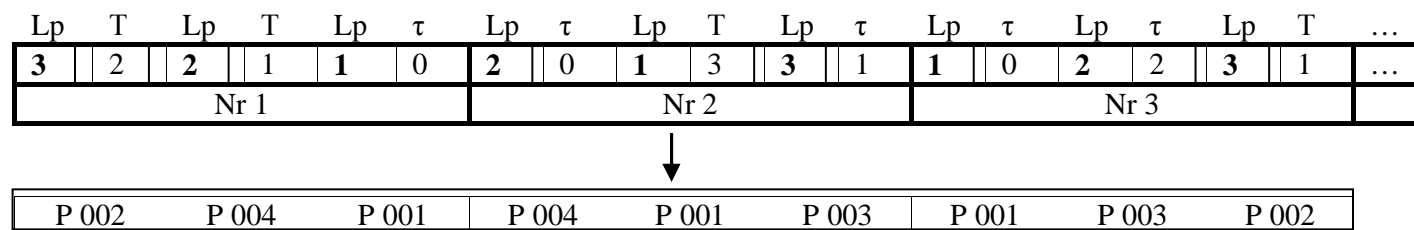
4.1. Kodowanie problemu

Zastosowane kodowanie problemu bazuje na kodowaniu permutacji kolejności zajmowania konfliktowych elementów układu torowego przez pociągi. W pierwszym kroku na podstawie struktur z rys. 6 tworzona jest lista elementów układu torowego i lista pociągów uczestniczących w potencjalnych konfliktach o dostęp (rys. 7).

Element układu torowego objęty konfliktem	Numer elementu	1	2	3	← Lp
Z 3	1	P 001	P 004	P 002	
T 2	2	P 001	P 004	P 003	
S 1	3	P 001	P 003	P 002	
...	...				

Rys. 7. Lista elementów układu torowego i potencjalnie współzawodniczących pociągów

Struktura pojedynczego osobnika kodującego potencjalne rozwiązanie problemu uszeregowania została zaprezentowana na rys. 8. Oprócz kodowania permutacji, szeroko stosowanego w literaturze, przyjęta w niniejszym artykule struktura osobnika zawiera dodatkowe liczby τ kodujące minimalny czas postępu pociągu na danym elemencie układu torowego, co umożliwia zakodowanie skomunikowań oraz wstrzymań biegu pociągu.



Rys. 8. Kodowanie i dekodowanie osobnika

Zastosowane kodowanie permutacji kolejności zajmowania elementów rozwiązuje potencjalne konflikty w obszarze całej sieci do końca horyzontu predykcji (zakończenia ostatniej operacji z list odpowiadających uzupełnionemu rozkładowi jazdy każdego z pociągów – rys. 6). Zapobieganie sprzeczności przebiegów odbywa się w toku symulacji na etapie oceny osobnika.

Osobnik reprezentuje sobą komplet danych związanych z uszeregowaniem, umożliwiających w oparciu o strukturę sieci przeprowadzenia symulacji niezbędnej do dokonania oceny kodowanego rozwiązania.

4.2. Funkcja oceny

W oparciu o strukturę sieci (rys. 3) oraz struktury reprezentujące aktualny stan systemu (rys. 6) odbywa się proces symulacji, w trakcie którego obliczana jest wartość wielokryterialnej funkcji oceny każdego osobnika. Proces symulacji uwzględnia permutacje kolejności zajmowania elementów układu torowego przez potencjalnie współzawodniczące pociągi oraz zakodowane minimalne czasy zajmowania elementu przez pociąg. Wygenerowana lista elementów układu torowego, które mają być zajęte w następnym kroku podlega sprawdzeniu pod kątem występowania przebiegów sprzecznych. Przykładowy przebieg procesu symulacji zaprezentowano w tabeli 2.

Tabela 2. Przykładowy przebieg procesu symulacji

Stan systemu w chwili t_i									
0038			0039			0040			...
S 1 (3/3)	P 001	S 2 0036	S 1 (3/3)	P 001	S 2 0036	S 1 (3/3)	P 001	Z 3 0040	
S 2 (3/4)	P 002	T 7 0007	S 2 (3/4)	P 002	T 7 0007	S 2 (4/4)	P 002	T 7 0007	
S 3 (3/3)	P 003	Z 2 0038	S 3 (3/3)	P 003	T 1 0039	S 3 (3/3)	P 003	T 1 0039	
...	P 004		...	P 004		...	P 004		
T 1 (2/2)	...		T 1 (1/2)	...		T 1 (1/2)	...		
T 7 (0/1)			T 7 (0/1)			T 7 (0/1)			
....					
Z 1 (1/1)			Z 1 (1/1)			Z 1 (1/1)			
Z 2 (0/1)			Z 2 (1/1)			Z 2 (1/1)			
Z 3 (1/1)			Z 3 (1/1)			Z 3 (0/1)			

Proces symulacji kończy się z chwilą osiągnięcia przez ostatni pociąg stacji docelowej. Na zakończenie procesu obliczana jest wartość wielokryterialnej funkcji oceny według formuły (1).

$$F = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B w_b (t_{sb} - t_{kb})^2 \text{ dla } t_{sb} \geq t_{kb} \quad (1)$$

gdzie:

B – liczba biletów,

w_b – waga jednostki opóźnienia związanego z biletem ustalana dynamicznie,

t_{kb} – rozkładowy czas osiągnięcia stacji docelowej określonej biletem,

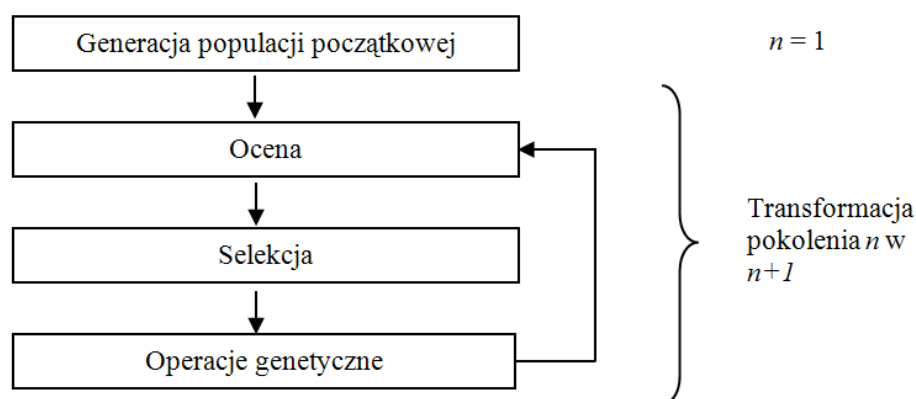
t_{sb} – rzeczywisty (symulacyjny) czas osiągnięcia stacji docelowej określonej biletem.

Formuła (1) uwzględnia wagę poszczególnych skomunikowań poprzez sumowanie (odpowiada liczbie sprzedanych biletów) ważonych wartości opóźnienia, do którego niechybnie dojdzie w wyniku utraty skomunikowania.

Przyjęcie założenia, że na każdy pociąg objęty rozkładem jazdy sprzedano jeden bilet od stacji początkowej do stacji końcowej sprowadza formułę (1) do postaci kryterium optymalizacyjnego opisanego w pracy Wolfenburg [11].

4.3. Opis algorytmu

Algorytm genetyczny zastosowany do rozwiązania problemu zarządzania opóźnieniami w ruchu kolejowym działa według ogólnego schematu opisanego w pracach Arabas [1], Michalewicz [7] i zaprezentowanego na rys. 9.



Rys. 9. Schemat działania algorytmu genetycznego

Klasyczne operacje genetyczne (krzyżowanie, mutacja) zostały dopasowane do specyfiki kodowania permutacji odpowiadającym kolejności zajmowania elementów układu torowego przez współzawodniczące pociągi wraz z zakodowanym minimalnym czasem postoju pociągu na przydzielonym elemencie. Zastosowano modyfikacje operatora krzyżowania opisane w pracy Yamada [12] w celu zapewnienia prawidłowości kodowanych permutacji w osobnikach potomnych.

5. WNIOSKI

Artykuł przedstawia problem zarządzania opóźnieniami w ruchu kolejowym w kategoriach modelu ogólnego (*job-shop*) szeregowania zadań. Celem procesu optymalizacji jest znalezienie optymalnego uszeregowania pociągów w odniesieniu do każdego z elementów układu torowego będącego potencjalnym miejscem wystąpienia konfliktu. Zaprezentowany proces optymalizacji obejmuje proces symulacji odbywający się na potrzeby oceny potencjalnych rozwiązań.

Algorytm może być używany na bieżąco do oceny sytuacji ruchowej w obszarze całej sieci. W przypadku planowej realizacji rozkładu jazdy tzn. braku opóźnień oraz wyłączeń elementów układu torowego z użytkowania (zakłóceń, awarii) suma opóźnień na końcu horyzontu predykcji powinna być równa zero. Algorytm wykrywa elementy układu torowego stanowiące potencjalne miejsce wystąpienia konfliktu rozumianego jako współzawodnictwo pociągów o dostęp do elementów wspólnych dla tras

uczestniczących w konflikcie pociągów. Poprzez wyszukiwanie optymalnej kolejności zajmowania elementu przez pociągi algorytm dąży do minimalizacji konsekwencji wywołanych opóźnieniami pierwotnymi, zakłóceniami w ruchu, wyłączeniami elementów układu torowego z użytkowania.

Zaprezentowany algorytm wykazuje się elastycznością jeżeli chodzi o możliwości modyfikacji kryterium optymalizacji. Zmiana wag poszczególnych części składowych funkcji oceny, konieczność uwzględnienia nowych aspektów, nie zaburza zastosowanego schematu rozwiązania.

W toku dalszych prac należy potwierdzić skuteczność zaprezentowanego podejścia poprzez zastosowanie algorytmu w odniesieniu do sieci o bardziej złożonej strukturze z rozkładem jazdy o większej intensywności połączeń.

Streszczenie

Zarządzanie opóźnieniami w ruchu kolejowym zostało potraktowane jako wielokryterialny problem optymalizacyjny, który obejmuje między innymi zapewnienie skomunikowania pociągów na stacjach węzłowych oraz dążenie do uzyskania biegu pociągów najbardziej zgodnego z pierwotnym rozkładem jazdy. Uwzględniono priorytety poszczególnych pociągów uzależnione od sytuacji ruchowej i kategorii pociągów. W przeprowadzonym procesie optymalizacji wykorzystano algorytm genetyczny z operatorami genetycznymi dopasowanymi do specyfiki problemu traktowanego jako ogólny problem (*job-shop*) szeregowania zadań.

Słowa kluczowe: kolejowy rozkład jazdy, zarządzanie opóźnieniami, algorytm genetyczny, szeregowanie zadań

Delay management in railway traffic with using evolution programming

Abstract

Railway delay management problem was treated as multi-objective optimization problem dealing with ensuring train connections at hub stations and trying to re-schedule delayed trains to obtain a new schedule as far as possible correspondent to the base timetable. Different train priorities dependent of the current state of the railway network and train class has been taken into account. The optimization process has been carried out using the genetic algorithm with the genetic operators adjusted to the specific character of the railway re-scheduling modeled as job-shop scheduling task problem.

Key words: railway timetable, delay management, genetic algorithm, job-shop scheduling.

LITERATURA

- [1] Arabas J. : Wykłady z algorytmów ewolucyjnych, WNT, Warszawa 2004
- [2] Corman F., D'Ariano A., Hansen I., Pacciarelli D. : Optimal multi-class rescheduling of railway traffic, *Journal of Rail Transport Planning & Management* 1(2011), pp. 14-24 , Elsevier Ltd.
- [3] Gao J., Sun L., Gen M. : A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job-shop scheduling problems, *Computers & Operations Research* 35 (2008), pp. 2892-2907, Elsevier Ltd.
- [4] He S., Song R., Chaudhry S. : Fuzzy dispatching model and genetic algorithms for railyards operations, *European Journal of Operational Research* 124 (2000), pp.307-331, Elsevier Ltd.
- [5] Kanai S., Shiina K., Harada S., Tomii N.: An optimal delay management algorithm from passengers' viewpoints considering the whole railway network, *Journal of Rail Transport Planning & Management* 1(2011), pp.25-37, Elsevier Ltd.
- [6] Krasemann J. : Design of an effective algorithm for fast response to the re-scheduling of railway traffic during disturbances
- [7] Michalewicz Z. : Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne, WNT, Warszawa 1996
- [8] Sahin I.: Railway traffic control and train scheduling based on inter-train conflict management, *Transportation Research, Part B* 3(1999), pp. 511-534 , Pergamon
- [9] Schöbel, A. : Integer programming approaches for solving the delay management problem, *Algorithmic Methods for Railway Optimization, Lecture Notes in Computer Science*, Springer.
- [10] Törnquist J., Persson J. : N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances, *Transportation Research Part B* 41(3) (2007), pp. 342-362, Elsevier Ltd.
- [11] Wolfenburg A.: Optymalne kierowanie ruchem pociągów w obszarze sieci kolejowej, Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej, Gorzów Wielkopolski 2011.
- [12] Yamada T., Nakano R.: Genetic Algorithms for Job-Shop Scheduling Problems, *Proceedings of Modern Heuristic for Decision Support*, pp. 67-81, UNICOM seminar, London 1997.