

Optymalizacja rozwiązywania konfliktów między pociągami podczas projektowania wykresów ich ruchu przy wykorzystaniu metody BBS

Andrzej WOLFENBURG¹

Streszczenie

Problemem badawczym, który należało rozwiązać było dostosowanie metody BBS do zadania optymalnego rozwiązywania konfliktów między pociągami, a następnie sprawdzenie poprawności tej metody. Zastosowana metodologia badawcza to analiza poprawności rozwiązań generowanych przez napisane programy, zmiany algorytmów i poprawianie błędów aż do uzyskania rozwiązań optymalnych. Zastosowane metody to metody symulacji i optymalizacji dyskretnej, metody programowania komputerowego oraz metoda BBS.

Otrzymane wyniki w pełni potwierdziły przydatność zastosowanej metody BBS do celów optymalnego rozwiązywania konfliktów między pociągami i projektowania optymalnych wykresów ruchu na przykładzie linii jednotorowej. Utworzony program optymalizacyjny włączono do Systemu Tworzenia Wykresów Ruchu Pociągów wcześniej opracowanego przez autora dla Instytutu Kolejnictwa. Autor planuje dalsze prace nad systemem w celu umożliwienia tworzenia optymalnych wykresów ruchu dla dowolnych układów torowych, w tym dla linii dwu i wielotorowych.

Słowa kluczowe: Metoda BBS, konflikty między pociągami, optymalne wykresy ruchu

1. Wstęp

Rozwiązywanie konfliktów między pociągami podczas projektowania wykresów ruchu w nowych lub zmienianych rozkładach jazdy, występujące również w zadaniach kierowania ruchem pociągów, jest podstawowym elementem optymalizacji wykresów ruchu. Jest zagadnieniem trudnym do zalgorytmizowania i następnie zaimplementowania go w postaci programu komputerowego. Projektowanie optymalnych wykresów ruchu pociągów należy bowiem do klasy zadań harmonogramowania, które uważane są za najtrudniejsze z grupy zadań optymalizacji. Do rozwiązania tego problemu autor opracował nową metodę matematyczno-informatyczną, opartą na połączeniu metody Branch and Bound z metodą Symulacji Dyskretnej, nazwaną Branch and Bound Simulation (BBS) [1-3]. Metoda umożliwia tworzenie optymalnych i suboptymalnych wykresów ruchu dla dowolnego układu torowego będącego częścią sieci kolejowej, zapewniających rozwiązanie konfliktów między pociągami.

2. Opis problemu

Zakłada się, że projektant wykresów ruchu pociągów dysponuje wykresem ruchu grupy pociągów, uwzględniającym założone najwcześniejsze czasy odjazdu ze stacji początkowych, założone czasy postojów oraz poprawne

czasy jazdy wyznaczone na podstawie charakterystyk trakcyjnych pociągów i warunków techniczno-ruchowych linii, lecz bez uwzględnienia konfliktów między nimi. Ten etap projektowania jest znany i opisany w literaturze krajowej i zagranicznej. Utworzony wykres ruchu pociągów okazuje się przeważnie niedopuszczalny dla wybranego odcinka sieci kolejowej właśnie ze względu na nierozwiązane konflikty między pociągami na torach szlakowych, stacyjnych bądź w węzłach torowych.

W celu rozwiązania konfliktów między pociągami, projektant korzystając z systemu komputerowego, przesuwając na ekranie monitora komputerowego trasy pociągów, zmienia czasy postojów lub czasem wydłuża czasy jazdy. Autor zaprojektował system realizujący wymienione zadania dla Instytutu Kolejnictwa [6], a jego szczegółowe elementy zostały zgłoszone do Urzędu Patentowego [7]. Uzyskane w ten sposób rozwiązania są dopuszczalne, ale rzadko optymalne, to znaczy takie, w których suma wydłużeń czasów postojów pociągów w celu usunięcia konfliktów jest minimalna. W celu uzyskania optymalnych rozwiązań należy zastosować metodę optymalizacyjną BBS.

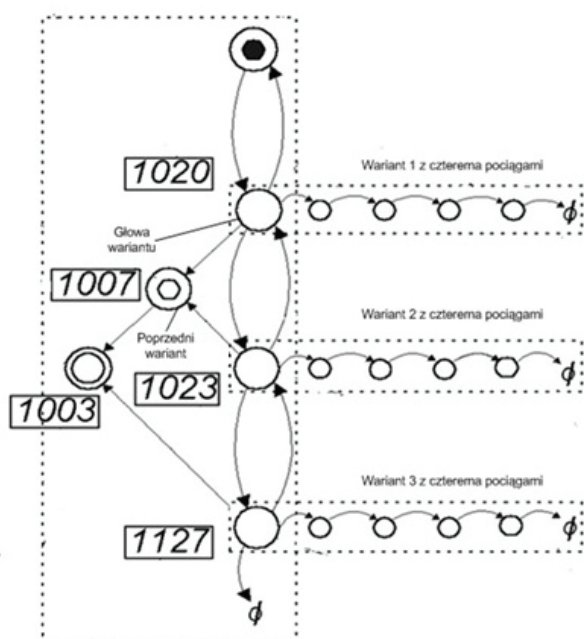
3. Metoda BBS

Metoda BBS (*Branch and Bound Simulation*) służy do rozwiązania zadania optymalnego kierowania ruchem pociągów w obszarze sieci kolejowej [5], polegającego

¹ Dr inż.; Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań; e-mail: Andrzej.Wolfenburg@ilim.poznan.pl.

na minimalizacji wskaźnika jakości, będącego sumą ważonych opóźnień pociągów na końcu przyjętego horyzontu czasowego. Wagi zależą od kategorii pociągów. Metoda BBS powstała przez połączenie symulacji dyskretnej z metodą podziału i ograniczeń. W symulacji dyskretnej występuje jedna lista zdarzeń, w metodzie BBS zaś występuje wiele list zdarzeń, przy czym każda z nich jest przyłączona do wierzchołka grafu metody *Branch & Bound*.

Każda z list zdarzeń stanowi wariant rozwiązania częściowego. Na liście zdarzeń danego wariantu znajdują się zdarzenia pociągów uporządkowane według niemalejących wartości ich czasów zajścia. Tak jak w metodzie *B&B* rozwija się drzewo rozwiązań, aż do uzyskania rozwiązania optymalnego. Kryterium wyboru wierzchołka drzewa (wariantu) do dalszego rozwoju jest jemu przyporządkowana najmniejsza wartość dolnego ograniczenia wskaźnika jakości (DOWJ). Wybrany wierzchołek staje się rodzicem tylu wierzchołków, ile jest dopuszczalnych sterowań dla pociągu o zdarzeniu z początku listy zdarzeń danego wariantu. Na początku listy zdarzeń znajduje się najwcześniejsze zdarzenie spośród zdarzeń dla wszystkich pociągów z listy. Rozwiązanie optymalne uzyskuje się wówczas, gdy czas realizowanego zdarzenia dla pewnego pociągu rozpatrywanego wariantu przekroczył czas horyzontu planowania, a wartość DOWJ dla tego wariantu jest nie większa niż DOWJ dla każdego z pozostałych wariantów [5]. Metodę BBS wykorzystano także do optymalnego harmonogramowania prac na maszynach [4] i optymalizacji tras samochodów [8]. Na rysunku 1



Rys. 1. Przykładowy stan pamięci programu zrealizowanego przy wykorzystaniu metody BBS

przedstawiono przykładowy stan pamięci programu zrealizowanego przy wykorzystaniu metody BBS do rozwiązania zadania optymalnego sterowania ruchem pociągów, dotyczącego minimalizacji ich opóźnień.

Pokazano trzy warianty w postaci list zdarzeń, przy czym każda zawiera zdarzenia dla czterech pociągów. Zdarzenia dla pociągów są uporządkowane na listach zdarzeń według niemalejących czasów ich zajścia, natomiast poszczególne listy zdarzeń (warianty) są uporządkowane na dwukierunkowej liście wariantów według nie malejących wartości dolnego ograniczenia wskaźnika jakości (DOWJ), którym jest ważona suma opóźnień pociągów wyliczana na koniec horyzontu predykcji (1-2 godzin). Po lewej stronie rysunku znajduje się drzewo rozwoju wariantów, zawierające głowy poprzednich wariantów z usuniętymi zdarzeniami, z których zostały utworzone trzy warianty (listy zdarzeń) znajdujące się po prawej stronie rysunku. Przykładowo, poprzedni wariant o głowie z DOWJ równym 1007 był podstawą utworzenia dwóch wariantów z wartościami DOWJ 1020 i 1023 na skutek wystąpienia dwóch decyzji sterujących, na przykład dotyczących zatrzymania i dalszego ruchu jednego z czterech przedstawionych pociągów.

Algorytm rozwoju wariantów polega na wyborze wariantu z najmniejszą wartością DOWJ, wybrania zdarzenia o najmniejszym czasie zajścia i wykonania procedury przyporządkowanej do tego zdarzenia. W sytuacji przedstawionej na rysunku 1, następnym wariantem wybranym do przetwarzania będzie wariant z DOWJ równym 1020, gdyż jest to wariant o najmniejszej wartości DOWJ, który znajduje się na początku listy wariantów. Program obsługi wariantu może wygenerować np. dwa nowe warianty, które będą dołączone do listy wariantów zgodnie z wyliczonymi wartościami ich DOWJ. Głowa bieżącego wariantu, w której zapisano stan systemu w momencie generacji nowych wariantów, po odłączeniu od niej zdarzeń zostaje włączona do drzewa rozwoju wariantów. Łuki wychodzące z głów dwóch nowych list zdarzeń (wariantów) zostają skierowane do tej głowy w celu zarejestrowania następstwa generacji wariantów, potrzebnego później do wylistowania ciągu optymalnych sterowań. Każde zdarzenie na liście zdarzeń dotyczy jednego pociągu i odwrotnie, dlatego lista zdarzeń (wariant) może być utożsamiana z listą pociągów. W metodzie BBS służącej do optymalnego kierowania pociągami w przypadku opóźnień pociągów, uwzględnia się możliwość stosowania skróconych czasów jazdy i postojów, a także zmianę kolejności przyjmowania i wyprawiania pociągów oraz zmianę torów stacyjnych i szlakowych względem przyjętych w stacyjnych rozkładach jazdy.

4. Optymalne rozwiązanie konfliktów między pociągami

Należy zwrócić uwagę na podobieństwa zadań optymalnego kierowania ruchem pociągów i zadań projektowania optymalnych wykresów ruchu pociągów. W obu przypadkach mamy do czynienia z podobnym wskaźnikiem jakości, który w zadaniach optymalnego kierowania ruchem jest sumą ważonych opóźnień pociągów liczoną na koniec horyzontu predykcji, a w zadaniach projektowania optymalnych wykresów ruchu – sumą ważonych wydłużeń jazdy (włączając czasy postojów) wszystkich pociągów. Wydłużenia te dotyczą czasów przyjazdów do stacji końcowych odcinka. Występują one w przypadku konfliktów między pociągami ze względu na przekroczenia czasów postoju pociągów ponad czasy nominalne, w oczekiwaniu przez te pociągi na zwolnienie elementów układu torowego zajętych przez inne pociągi. Stosuje się wskaźnik jakości będący średnim wydłużeniem czasu jazdy (liczonym na pociąg).

Uzyskanie optymalnego rozwiązania konfliktów między pociągami przedstawiono na przykładzie linii jednotorowej bez podziału szlaków na odstępy, chociaż sama metoda ma zastosowanie dla obszaru sieci o dowolnej konfiguracji. Budowę systemu rozpoczęto od utworzenia modelu symulacyjnego linii. W rozwiązaniu optymalnym wyznaczonym przez system, założone czasy jazdy zachowano, natomiast w celu rozwiązania konfliktów między pociągami czasy postojów wydłużono w sposób najmniejszy z możliwych. Na linii jednotorowej istnieją następujące konflikty między pociągami:

- pociąg czeka na torze stacyjnym na zwolnienie szlaku przed nim przez pociąg tego samego kierunku,
- pociąg czeka na torze stacyjnym na zwolnienie szlaku przed nim przez pociąg przeciwnego kierunku,
- pociąg czeka na torze szlakowym na zwolnienie toru stacyjnego przed nim przez pociąg tego samego kierunku przy zajętych pozostałych torach stacyjnych.

Utworzony model symulacyjny uwzględni wymienione rodzaje konfliktów, co jednak nie musi prowadzić do uzyskania rozwiązania optymalnego, a nawet nie gwarantuje rozwiązań niepowodujących zablokowania linii. Konieczne jest wprowadzenie możliwości generowania wariantów ruchu, z których pewne (wybierane przez algorytm optymalizacji) mogą prowadzić do rozwiązań optymalnych, co umożliwia metoda BBS. Warianty takie umożliwiają wyznaczenie dowolnej dopuszczalnej stacji krzyżowania każdej pary pociągów przeciwnego kierunku. Sytuacja dla linii jednotorowej, w której jest uzasadnione wygenerowanie nowego wariantu ruchu występuje w momencie, w którym minął czas rozkładowy odjazdu pociągu zatrzymanego na torze stacyjnym, a tor szlakowy przed

pociągiem jest wolny. Jednym z możliwych wariantów w tej sytuacji jest oczywiście odjazd pociągu i zajęcie przez niego toru szlakowego.

Drugim nowym wariantem ruchu, który niekiedy może prowadzić do rozwiązania optymalnego, jest zatrzymanie pociągu na torze stacyjnym i oczekiwanie na przyjazd pociągu przeciwnego kierunku, znajdującego się dalej niż na sąsiednim szlaku lub oczekiwanie na wyprzedzenie go przez pociąg zgodnego kierunku po sąsiednim torze stacyjnym. Najwcześniejszy moment, w którym może wystąpić takie zdarzenie, nazywano w metodzie BBS Momentem Sprzyjającym, a jego wartość jest wyznaczona na bazie aktualnego, a niekiedy przyszłego położenia pozostałych pociągów (dla pociągów, które dla danego momentu czasu symulacyjnego nie wjechały jeszcze na odcinek linii). Wartość ta służy do wyznaczenia w tym momencie najmniejszego z możliwych wydłużenia czasu postoju pociągu. Wydłużenie to jest składnikiem sumy wydłużeń dla wszystkich pociągów, tworzącej DOWJ dla danego wariantu. Konieczność wygenerowania nowych wariantów ruchu może wystąpić także w sytuacji, gdy mamy do wyboru kilka torów stacyjnych lub szlakowych. Dla linii jednotorowej, na której tory stacyjne niewiele różnią się od siebie pod względem charakterystyk ruchowych, nie wariantujemy ruchu pociągu w tym przypadku, lecz przy obu torach wolnych, dla pierwszego wjeżdżającego pociągu, krzyżującego się z innym pociągiem na tej stacji, wybieramy tor według stałych, przyjętych reguł.

Układ wariantów możliwych do utworzenia musi być zupełny, to znaczy taki, że musi być możliwość utworzenia wszystkich potencjalnie możliwych wariantów ruchu przez wszystkie pociągi, ale tych które mogą prowadzić do rozwiązań optymalnych. W rzeczywistości, dzięki właściwości metody BBS, tylko niezwykle mała część wszystkich możliwych wariantów zostaje utworzona podczas poszukiwania rozwiązania optymalnego, gdyż pozostałe nie utworzone na pewno nie prowadzą do rozwiązania optymalnego.

Znajdowanie rozwiązań optymalnych w metodach opartych na metodzie B&B jest znacznie szybsze w przypadkach, gdy wyliczana wartość DOWJ jest bliska nieznannej wówczas wartości wskaźnika jakości. Zazwyczaj jako DOWJ używa się sumy (ważonej lub nie) aktualnych wydłużeń czasów postojów, która może jedynie rosnąć w razie upływu czasu symulacyjnego aż do rzeczywistej wartości wskaźnika jakości. W celu wyliczenia lepszej wartości DOWJ, do aktualnej wartości sumy wydłużenia postojów dodaje się wartość tak zwanej dopuszczalnej heurystyki AH (ang. *admissible heuristic*), która nigdy nie zawyży wartości powstałego wyrażenia ponad rzeczywistą wartość wskaźnika jakości.

$$\text{DOWJ} = \text{WP} + \text{AH}$$

gdzie:

DOWJ – dolne ograniczenie wskaźnika jakości,
 WP – suma aktualnych (dla danego momentu czasu symulacyjnego) wydłużeń czasów postojów wszystkich pociągów,
 AH – *admissible heuristic*.

AH określa dolne ograniczenie przyrostu wydłużeń czasów postojów wszystkich pociągów od danego momentu czasu symulacyjnego do końca horyzontu optymalizacji. Przykładowo, jeżeli pociągi jednego kierunku będą się w przyszłości (względem aktualnej wartości czasu symulacyjnego) krzyżować z pociągami przeciwnego kierunku, to minimalna wartość wydłużenia czasów postojów dla wybranej pary pociągów ze wszystkich możliwych kombinacji par pociągów i miejsc ich krzyżowań może stanowić składnik AH. Przedstawioną analizę można powtórzyć wielokrotnie dla wszystkich pozostałych pociągów (po odjęciu danej pary) dodając stosowne wartości wyliczonych wydłużeń do AH.

W rzeczywistości te wydłużenia mogą być większe od wyliczonych, gdyż w momencie ich wyliczeń nie była w pełni znana przyszła sytuacja ruchowa. Dzieje się tak dlatego, że AH wylicza się na modelu analitycznym, który jest uproszczony (relaksacyjny) w porównaniu do modelu symulacyjnego, jednak dzięki analitycznej strukturze modelu, wyliczanie oszacowania sumy przyszłych wydłużeń czasów postojów (AH) jest bardzo szybkie.

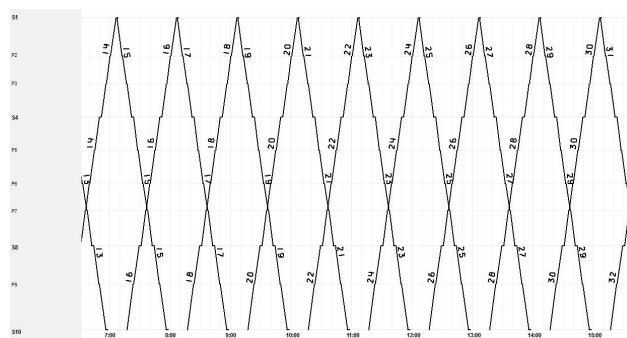
4. Rozwiązanie przykładowego problemu

Jako przykładowy problem wybrano rozwiązanie konfliktów między pociągami na odcinku linii jednotorowej o długości 62,6 km z dwiema stacjami końcowymi, dwiema stacjami pośrednimi i sześcioma przystankami osobowymi, na których zatrzymują się wszystkie rozpatrywane pociągi pasażerskie w czasie rozpatrywanej doby.

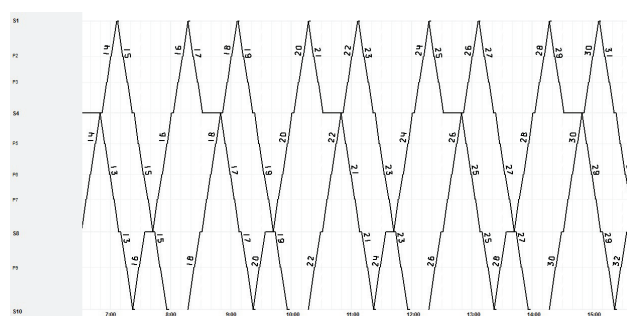
Przyjęto założenia, że dla celów poglądowych model linii będzie uproszczony względem rzeczywistości, jednak bez utraty istotnych cech rozwiązywanego zadania. Wszystkie pociągi są tej samej kategorii i mają takie same charakterystyki ruchowe. Czasy następstwa pociągów tego samego kierunku i stacyjne odstępy czasu dla pociągów przeciwnych kierunków przyjęto na wszystkich stacjach za zerowe. Pominięto wydłużenie czasów wjazdów i wyjazdów przy zmniejszonej prędkości ze względu na wybór torów głównych dodatkowych. Podane czasy łatwo można zmienić w przyjętym modelu. Czasy tracone na hamowanie i rozruch wliczono do czasów jazdy. Przyjęto nominalne czasy jazdy na szlakach oraz czasy postoju na stacjach i przy-

stankach osobowych. Każda ze stacji pośrednich odcinka ma dwa tory zasadnicze, natomiast liczba torów zasadniczych na stacjach skrajnych odcinka jest na tyle duża, że nie mają one wpływu na ruch pociągów.

Przyjęto, że bazowy wykres ruchu przedstawiony na rysunku 2 jest wykresem okresowym i równoodstępowym o odstępie 1 godziny. Jest on jednak niedopuszczalny ze względu na nierozwiązane konflikty. Stanowi on bazę informacji dla programów realizujących metodę BBS o czasach jazdy pociągów na poszczególnych szlakach, nominalnych czasach postojów pociągów na stacjach i przystankach osobowych oraz najwcześniejszych czasach odjazdów pociągów ze stacji początkowych. System optymalizacji wyznaczy optymalne stacje krzyżowania pociągów oraz zminimalizuje sumę wydłużeń czasów postojów pociągów na tych stacjach.



Rys. 2. Bazowy (niedopuszczalny) wykres ruchu pociągów

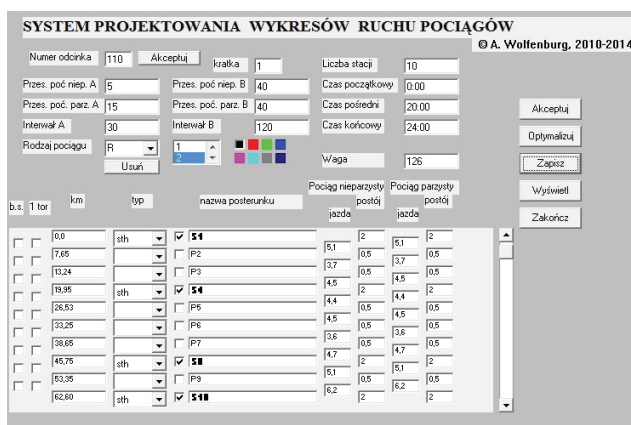


Rys. 3. Wynikowy (optymalny) wykres ruchu pociągów

Na rysunku 3 przedstawiono wynikowy (optymalny) wykres ruchu pociągów uzyskany za pomocą Systemu Projektowania Wykresu Ruchu Pociągów z pakietem optymalizacyjnym, który powstał na bazie systemu opracowanego przez autora dla Instytutu Kolejnictwa [6]. Wykres wynikowy jest okresowy, ale nie równoodstępowy. Co drugi pociąg każdego kierunku ma wydłużony czas jazdy ze względu na wydłużenie postojów na stacjach, gdzie występują krzyżowania z pociągami przeciwnego kierunku. Wydłużenie średnie na pociąg (minimalizowane) wynosi w tym przypadku 5,6 min, a maksymalne 16,2 min. Rozwiązanie może znacznie zmienić się, gdy zmienimy odstęp między

odjazdami pociągów ze stacji początkowych. Ponieważ uzyskanie rozwiązań optymalnych (gdy istnieją) jest bardzo szybkie, projektant może eksperymentować ze zmianą początkowego odstępu lub testować przypadki rozkładów nieokresowych.

Na rysunku 4 przedstawiono ekran początkowy Systemu Projektowania Wykresów Ruchu z dołączonym pakietem optymalizacyjnym.



Rys. 4. Ekran początkowy Systemu Projektowania Wykresów Ruchu Pociągów

5. Zakończenie

Otrzymane wyniki w pełni potwierdziły przydatność zastosowanej metody BBS do celów optymalnego rozwiązywania konfliktów między pociągami i projektowania optymalnych wykresów ruchu na przykładzie linii jednotorowej. Autor planuje dalsze prace nad systemem w celu umożliwienia projektowania optymalnych wykresów ruchu dla dowolnych układów torowych, w tym dla linii dwu- i wielotorowych, a także zastosowania metody do projektowania wykresów ruchu podczas zamknięć torowych. Przy pisaniu niniej-

szego artykułu autor korzystał głównie z poprzednich opracowań własnych. Przegląd literatury krajowej i zagranicznej związanej z tematem zawiera praca [5].

Literatura

1. Wolfenburg A.: *Optymalne sterowanie ruchem pociągów na linii kolejowej*, Automatyka Kolejowa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 9/1980.
2. Wolfenburg A.: *Metoda BBS i jej wykorzystanie do optymalnego sterowania ruchem pociągów w rejonie*, Materiały na III Konferencję Naukową Nauka – Transport – Praktyka, WPW Warszawa 1985.
3. Wolfenburg A.: *Zastosowanie symulacji dyskretnej do rozwiązania zadań optymalizacji*, Prace Naukowe Instytutu Organizacji i Zarządzania Nr 83 Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.
4. Wolfenburg A.: *Metoda BBS i jej wykorzystanie do optymalnego harmonogramowania prac na maszynach*, [rozdział w monografii: *Modele symulacyjne i gry menedżerskie we wspomaganiu decyzji w dydaktyce*, pod redakcją Alicji Balcerak i Witolda Kwaśnickiego], Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010.
5. Wolfenburg A.: *Optymalne kierowanie ruchem pociągów w obszarze sieci kolejowej*, Wydawnictwa PWSZ w Gorzowie Wlkp., Gorzów Wlkp. 2011.
6. Wolfenburg A.: *Nowy graficzny system tworzenia wykresów ruchu pociągów*, TTS 10/2011.
7. Wolfenburg A.: *Sposób modyfikowania tras pociągów na wykresie ruchu na ekranie monitora komputerowego podczas projektowania tych tras*, Zgłoszenie patentowe nr 396527, Biuletyn Urzędu Patentowego 8/2013, Warszawa 2013.
8. Wolfenburg A.: *Wyznaczanie i harmonogramowanie tras pojazdów przy wykorzystaniu metody BBS*, Logistyka 4/2014, CD nr 2, Poznań 2014.

Optimization of Solving Conflicts Among Trains During Designing their Graphs Using BBS Method

Summary

The research problem to be solved is adapting the BBS method to the optimal resolution of the problem related to conflicts among trains and the verification of the method correctness. The research methodology used is the analyses of software procedure results correctness, possibly changing algorithm and error correction up to obtaining the optimal solutions. The methods used are the method of discrete simulation and optimization, methods of computer programming and the BBS method itself.

The obtained results confirmed entirely the usefulness of the BBS method for the purpose of optimal train conflict solving and for the optimal train graphs designing using a single line as an example. The software optimization program has been

included in the Train Graphs Designing System, which had been previously created by the author for the Railway Institute. The author intends to continue his works related to the system taking into consideration any track layout, including lines with two or more tracks.

Keywords: BBS method, conflicts among trains, optimal traffic graphs

Оптимизация процесса решения конфликтов между поездами во время составления графика движения поездов при использовании метода BBS

Резюме

Проблемой исследования, которую необходимо было преодолеть, явилась корректировка метода BBS для оптимального решения конфликтов между поездами, и впоследствии проверка правильности метода. В качестве методологии исследований был использован анализ правильности решений сгенерированных программами, изменения алгоритма и корректировка ошибок до получения оптимальных результатов. Среди использованных методов – методы симуляции и дискретной оптимизации, метод компьютерного программирования и метод BBS.

Полученные результаты вполне подтвердили правильность использованного метода BBS с целью оптимального решения конфликтов между поездами и составления оптимальных графиков движения поездов на примере однопутной линии. Созданная программа оптимизации была включена в Систему составления графиков движения поездов, разработанную автором для Железнодорожного института. Автор намерен вести дальнейшие работы над системой для составления оптимальных графиков движения поездов в любом составе путей, в том числе на двухпутных и многопутных линиях.

Ключевые слова: метод BBS, конфликты между поездами, оптимальные графики движения