

Stanisław Piasecki, Janusz Rydel  
Instytut Badań Systemowych PAN

#### ROZWIĄZYWANIE ZADAŃ HARMONOGRAMOWANIA NA PRZYKŁADZIE TRANSPORTU LOTNICZEGO

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zagadnienie rozwiązywania zadań harmonogramowania w transporcie lotniczym. Ze względu na dużą wymiarowość tych zadań zaproponowano algorytm z "ruchomym horyzontem" do operatywnego harmonogramowania przewozów nieregularnych (czarterów). Przedstawiono zasady wykorzystania implementacji komputerowej tego algorytmu w przedsiębiorstwie lotniczym.

##### 1. WstęP

Zagadnienie harmonogramowania ruchu samolotów jest niewielkim fragmentem problematyki kierowania transportem lotniczym. Jednakże ze względu na złożoność i wielowymiarowość zagadnienia jest szczególnie predysponowane do komputeryzacji. Jednocześnie niebagatelne efekty ekonomiczne, jakie można uzyskać przez optymalne harmonogramowanie lotów a także istnienie wielu algorytmów rozwiązywania tego typu zadań matematycznych, powoduje, że zagadnienie harmonogramowania transportu jest szczególnie wdzięcznym zadaniem. Nietrudno zauważyć, że w kierowaniu transportem lotniczym (a także innymi rodzajami transportu) zagadnienie harmonogramowania występuje w dwóch sytuacjach.

Pierwsza sytuacja jest związana z planowaniem przewozów w długich okresach czasu - sezonach w skali roku. Dotyczy to tylko tych przewozów, których występowanie w rozpatrywanym okresie możemy z dużą pewnością przewidzieć. Jest to więc związane z przewozami pasażerskimi, pocztowymi bądź stałymi z góry zaplanowanymi przewozami towarowymi.

Druga sytuacja związana jest z przewozami nieregularnymi przesyłek lotniczych, wykonywanymi na podstawie ciągle chaotycznie napływających zleceń. Podobna sytuacja występuje także wtedy, gdy skutek zdarzeń losowych (uszkodzenie samolotu, zła pogoda itp.) następuje zaburzenie w realizacji harmonogramu długookresowego i należy podjąć decyzje dotyczące ruchu samolotów w tak zmienionych okolicznościach.

W stosunku do pierwszej sytuacji, planowania długookresowego, harmonogramowanie w drugiej sytuacji nazywamy sterowaniem operatywnym [2].

Z punktu widzenia konstrukcji systemów informatycznych, w pierwszej sytuacji może być zastosowana metoda wsadowa, w drugiej - system musi być systemem czasu realnego (rzeczywistego).

Wynika to stąd, że w pierwszym przypadku dysponujemy niemal dowolnie długim czasem na przygotowanie harmonogramu natomiast, w drugim - czas przygotowania musi być taki, aby realna była możliwość jego wykorzystania niemal natychmiast.

Z punktu widzenia rozwiązywanego problemu matematycznego, zagadnienie harmonogramowania w obu sytuacjach jest identyczne, jednakże nie są to zagadnienia jednakowo trudne do rozwiązania. W pierwszym przypadku, ze względu na długi horyzont planowania, zadanie posiada b. duży wymiar, proporcjonalny do iloczynu: ilości możliwych dróg przelotu (zależnych od liczby rozpatrywanych lotnisk, liczby samolotów, liczby zapotrzebowań przewozowych oraz liczby rozpatrywanych kwantów czasowych (np. o długości 5 min.) w rozpatrywanym horyzoncie czasowym.

Duża wymiarowość takiego zadania powoduje, że ogranicza się planowanie do tygodnia - przyjmując, że wszystkie zapotrzebowania przewozowe powtarzają się w cyklu tygodniowym.

Jednakże nawet takie uproszczenie zadania także natrafia na duże trudności, gdyż liczba zmiennych decyzyjnych i tak oscyluje wokół liczb rzędu milionów. Czas rozwiązywania takich zadań za pomocą algorytmów wydłuża się niebezpiecznie z punktu widzenia niezawodności obliczeń.

Dla potrzeb planowania operatywnego rozmiar zadania jest znacznie mniejszy, ale z drugiej strony także zaostrzają się wymagania na dopuszczalny czas rozwiązywania zadania, który nie może przekraczać pojedynczych minut.

Reasumując, do rozwiązywania zadań harmonogramowania przewozów lotniczych należałoby dla znanego sformułowania zadania matematycznego w terminach programowania liniowego (dokładniej - "mieszanego") znaleźć "elastyczny" algorytm rozwiązywania o dowolnie regulowanym czasie wyznaczania rozwiązania i zapewniający rozwiązanie dowolnie bliskie rozwiązaniu optymalnemu. Oczywiście, im wyznaczymy krótszy czas, tym rozwiązanie może być gorsze od optymalnego.

Aby zapewnić takie własności algorytmowi rozwiązania zadania harmonogramowania, można postąpić w różny sposób. Na przykład opracowując specjalny algorytm lub dzieląc zadanie na mniejsze części i rozwiązując je niezależnie za pomocą algorytmów znanych.

Pierwszy sposób stosowany jest powszechnie przy rozwiązywaniu zadań z dziedziny harmonogramowania, drugi sposób często stosuje się w zagadnieniach klasycznych programowania liniowego o dużych wymiarach, stosując ewentualnie koordynację rozwiązań fragmentarycznych w drugim etapie rozwiązywania zadania.

## 2. Sformułowanie problemu

W naszym przypadku postanowiono zastosować drugą metodę dzieląc zagadnienie w czasie, to znaczy rozwiązując ciąg zadań w krótkich odcinkach czasu, na które został podzielony cały horyzont planowania. Wybierając odpowiednio krótkie odcinki czasu, możemy dowolnie zmniejszyć wymiarowość każdego zadania, a więc i czas otrzymania optymalnego rozwiązania. Powtarzając ten sposób postępowania dla każdego odcinka, możemy otrzymać harmonogram dla całego horyzontu planowania. Jednakże tak otrzymany harmonogram nie będzie oczywiście optymalny dla całego horyzontu. Aby bardziej zbliżyć się do rozwiązania optymalnego, należałoby wydłużyć odcinki czasu lub, co wydaje się bardziej wskazane, przyjąć zasadę, że odcinki czasowe częściowo wzajemnie się pokrywają. W skrajnym przypadku początek odcinka czasowego mógłby się przesunąć o odcinek czasu między kolejnymi zdarzeniami dotyczącymi pojawiania się nowych zapotrzebowań przewozowych. W taki sposób otrzymamy metodę sterowania operatywnego: od zdarzenia do zdarzenia z ruchomym, krótkim horyzontem czasowym. W skrajnym przypadku, gdy ten horyzont czasowy będzie coraz bardziej mały, otrzymamy system podejmowania decyzji "na dziś" bez oglądania się na przyszłe skutki decyzji. Jak wiemy, takie systemy podejmowania decyzji spotyka się dość często w praktyce, szczególnie w sytuacjach awaryjnych.

W rezultacie przystąpiono do opracowania algorytmu komputerowego opartego na algorytmie optymalnego rozwiązywania zadania programowania liniowego w zadanym ruchomym odcinku czasu, z automatycznym uaktualnieniem sformułowania zadania w miarę przesuwania się chwili początkowej okresu planowania.

Jest zrozumiały fakt, że taki algorytm może być wykorzystywany nie tylko w systemie czasu realnego dla celów sterowania operatywnego, ale także może być wykorzystany do rozwiązywania olbrzymich wymiarowo zadań planowania długookresowego, chociaż nie będzie on zapewniał rozwiązania optymalnego.

Nietrudno także zauważyć, że tak otrzymane rozwiązanie zadania planowania długookresowego może być bardzo bliskie rozwiązaniu optymalnemu, jeśli tylko stosunek długości ruchomego odcinka planowania do średniego odstępu czasu między chwilami pojawiania się zapotrzebowań przewozowych jest dostatecznie duży. Oczywiście, także od tego stosunku zależy wymiarowość zadania, a więc i czas otrzymania rozwiązania.

Algorytm "z ruchomym horyzontem" został zaprogramowany na mikrokomputer IBM PC, a jego działanie będzie zademonstrowane. Opis algorytmu można znaleźć w [3].

Trzeba podkreślić, że zagadnienie harmonogramowania ruchu samolotów opisane w [1], [3], którego rozwiązanie tu przedstawiono, nie jest charakterystyczne wyłącznie dla transportu lotniczego. Występuje ono w różnych rodzajach transportu a także w różnych rodzajach działalności - także w działalności produkcyjnej.

Sądzymy, że opisany tu algorytm z "ruchomym brzegiem" i automatycznym uskutualnianiem sformułowania, chociaż nie gwarantujący rozwiązania optymalnego, może być stosowany do rozwiązywania zadań o bardzo dużej wymiarowości, szczególnie w zadaniach harmonogramowania zarówno długo-, jak i krótkookresowego.

W celu przetestowania implementacji komputerowej opisanego algorytmu posłużono się danymi rzeczywistymi uzyskanymi z Przedsiębiorstwa Państwowego "Porty Lotnicze". Dane te ujęte są w tzw. "Arkusze planowanej sytuacji ruchu w FIR Warszawa". Zgodnie z przyjętym opisem matematycznym wielkościami wejściowymi dla implementacji komputerowej są następujące tablice:

- tablica startów samolotów na poszczególnych lotniskach,
- tablica czasowej długości lotów pomiędzy lotniskami,
- tablica wymaganych poziomów lotu dla wszystkich zapotrzebowań na loty,
- tablica czasowej zajętości poziomów na poszczególnych relacjach.

Arkusze "Planowana sytuacja ruchu w FIR Warszawa" zawierają zbiór niezbędnych dla kontrolera informacji o lotach. Informacja o jednym locie stanowi minimalną porcję danych, nazwaną roboczo "paskiem". Każdy pasek zawiera:

- numer rejsu,
- typ samolotu,
- lotnisko startu,
- czas startu,
- lotnisko lądowania,
- czas lądowania,
- poziom lotu,
- zmiany wprowadzone w planie lotów przez kontrolera.

W przypadku lotów zagranicznych podawane są także nazwy radiolatarni granicznych: wlotowej i wylotowej.

Każdy arkusz składa się z dwóch części:

- 1) zawierającej loty regularne;
- 2) zawierającej loty dodatkowe (czartery).

Loty regularne planowane są z półrocznym wyprzedzeniem, natomiast czartery zgłaszane są na bieżąco do godz. 18<sup>00</sup> dnia poprzedzającego dzień startu. W związku z tym, że liczba lotów regularnych jest niewspółmiernie mała w stosunku do liczby czarterów, autorzy przyjęli następujące założenie:

Loty regularne będą tworzyły ograniczenia, natomiast planowane będą loty dodatkowe. Ograniczeniami dla lotów dodatkowych będą:

- \* zajętość poziomów;
  - \* zajętość lotniska (radiolatarni granicznych);
- wprowadzone przez samoloty z rozkładu regularnego.

Zgodnie z tą koncepcją paski lotów regularnych zostały podzielone na dwie grupy:

- 1) loty regularne krajowe (lotniska startu i lądowania leżą w granicach FIR Warszawa);
- 2) loty regularne zagraniczne (przynajmniej jedno z tych lotnisk leży poza granicami FIR Warszawa).

Paski z regularnymi lotami krajowymi stworzyły bazę danych, która została posortowana według następującego klucza:

- 1) relacja: lotnisko startu - lotnisko lądowania;
- 2) czas lotu;
- 3) poziom lotu.

W ten sposób otrzymano obraz czasowej zajętości poziomów na poszczególnych korytarzach powietrznych.

Lotniska krajowe zostały ponumerowane liczbami od 1 do 11:

1. Gdańsk
2. Kraków
3. Koszalin
4. Katowice
5. Poznań
6. Rzeszów
7. Szczecin
8. Słupsk
9. Warszawa
10. Wrocław
11. Zielona Góra

Stwierdzono, że regularne loty krajowe zajmują poziomy od 70 do 240.

Te same czynności wykonano dla regularnych lotów zagranicznych, przyjmując jako lotnisko startu i lądowania radiolatarnie graniczne wlotowe i wylotowe, numerując je odpowiednio:

12. Frydlant
13. Słubice
14. Starżawa
15. Lenów
16. Jabłonka
17. Darłowo
18. Kmiecin
19. Suwałki

Regularne loty zagraniczne zajmują poziomy od 240 do 410.

Łącząc oba te zbiory otrzymano czasową zajętość poziomów i lotnisk w FIR Warszawa stanowiącą zbiór ograniczeń dla planowanego rozkładu.

Paski z lotami dodatkowymi wprowadzono w postaci tablic: START, LOT, LEVEL jako zbiór danych wejściowych do planowania rozkładu lotów.

### 3. Zakończenie

Wyniki obliczeń numerycznych [4] oraz łatwość uzyskiwania wielu wariantów rozkładu lotów wskazują na możliwe kierunki zastosowań tego algorytmu. Wydaje się celowe stosowanie tej metody układania rozkładu lotów dla operatywnego planowania lotów dodatkowych, przyjmując rozkład lotów regularnych jako sztywne ograniczenie. Przemawia za tym:

- duża liczba lotów dodatkowych w stosunku do lotów z rozkładu regularnego,
- konieczność częstego (codziennego) planowania lotów dodatkowych.

### LITERATURA

- [1] Piasecki S. et al.: A computer system of flight management. Modelling Simulation & Control, vol 3, No.3, pp.1-8,1982.
- [2] Piasecki S.: Teoria organizacji w świetle analizy systemowej jako teoria języka problemowo zorientowanego. Prace IBS PAN, Warszawa 1982, ss.1-115.
- [3] Rydel J.: Harmonogram przewozów lotniczych. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej s. Automatyka z.95/88.
- [4] Rydel J.: Nowe metody optymalizacji procesów transportowych. Opracowanie ZBO IBS PAN-10/89.

Recenzent: Doc.dr.h.inż. F.Marecki

Wpłynęło do Redakcji do 1990-04-30.

### SOLUTION OF SCHEDULING TASKS ON AN EXAMPLE OF AIR TRANSPORTATION

#### S u m m a r y

The authors considered a vehicle scheduling problem in air transportation. Some ideas for constructing airplane time-tables are given. An algorithm with a "moveable horizon" for planning additional flights (charters) is proposed. This algorithm has been tested and the results are presented. Some ideas of a computer implementation of this algorithm in air-traffic enterprise are given.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКА ПОЛЁТОВ НА ПРИМЕРЕ АВИАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

## Р е з ю м е

В статье представлен вопрос по решению задач построения графика в авиатранспорте. В связи с большой размерностью таких задач предложен алгоритм с "подвижным горизонтом" для оперативного построения графиков нерегулярных /чартерных/ перевозок. Представлены принципы использования компьютерной реализации такого алгоритма авиационным учреждением.