

Marek MALARSKI¹

PEWIEN ALGORYTM MODYFIKACJI ZAKŁÓCONEJ ROTACJI STATKÓW POWIETRZNYCH

Streszczenie. Linie lotnicze nieustannie narażone są na zakłócenia działań operacyjnych spowodowane zmiennymi warunkami pogodowymi oraz niespodziewanymi awariami samolotów. Wymusza to podejmowanie decyzji taktycznych prowadzących do zmian w planowanym rozkładzie lotów, planowanej rotacji floty oraz załóg. Wpływ tych zakłóceń na planowany rozkład lotów oraz rotacje może być różny, zależnie od elastyczności rozkładu lotów i algorytmu modyfikacji zakłóconej rotacji statków powietrznych.

SOME ALGORITHM OF DESTROYED AIRCRAFTS ROTATION MODIFICATION

Summary. Airline operations are subject to constant disturbance due to changing weather conditions and random defects of airplanes. It enforces tactical decisions which lead to changes in the flight schedule and fleet/crew rotation. Needless to say, the disturbance impact on the adopted flight schedule and rotations differs in scale depending on their flexibility.

1. WPROWADZENIE

Podstawowym kryterium oceny działalności przedsiębiorstwa transportu lotniczego jest zdolność do wytworzenia zysku, tj. nadwyżki wpływów nad kosztami. Koszty eksploatacyjne w transporcie lotniczym są znacznie wyższe niż w pozostałych gałęziach transportu, ponieważ:

- nakłady początkowe na zakup sprzętu są bardzo duże,
- koszty utrzymania sprzętu oraz bazy remontowej są wysokie, głównie ze względu na znaczne skomplikowanie konstrukcji statków powietrznych,
- zużycie paliwa na jednostkę odległości jest większe niż w innych środkach transportu,
- koszty budowy oraz utrzymania portów lotniczych są znacząco duże.

Produktem, jaki oferuje na rynku przedsiębiorstwo transportu lotniczego, jest usługa regularnego przewozu lotniczego – osób oraz towarów. Podstawowym zaś elementem przynoszącym bezpośredni dochód jest rejs lotniczy, tj. operacja wykonania jednego lub kilku odcinków trasy lotu, oznaczona tym samym numerem (indeksem) rejsu. Realizacja planu lotów to przypisanie statków powietrznych do konkretnych numerów rejsów – szeregowanie zadań – nazywane popularnie rotacją statków powietrznych.

¹ Zakład Inżynierii Transportu Lotniczego, Wydział Transportu, Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa, +48 22 660 7339, mma@it.pw.edu.pl

2. PLANOWANIE PRACY LINII LOTNICZEJ

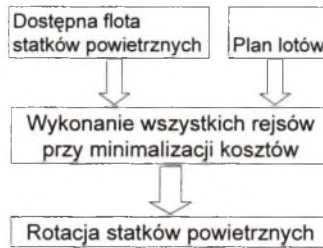
Systemy planowania lotów powinny spełniać następujące dwie funkcje:

- wyznaczać cykliczne okresowe plany lotów statków powietrznych,
- wyznaczać na bieżąco plan realizacji lotów, w przypadku gdy występują trudności w realizacji planu cyklicznego wynikłe z przyczyn technicznych, meteorologicznych lub innych losowych.

Celem każdego takiego systemu jest poprawa wykorzystania statków powietrznych przy pełnej realizacji ekonomicznie uzasadnionych zapotrzebowań przewozowych. Przy opracowaniu sezonowych planów lotów o cyklu tygodniowym zakładamy z reguły, że funkcja kryterium jest wyrażona sumą zysków przedsiębiorstwa pomniejszoną o koszty eksploatacji i amortyzacji sprzętu.

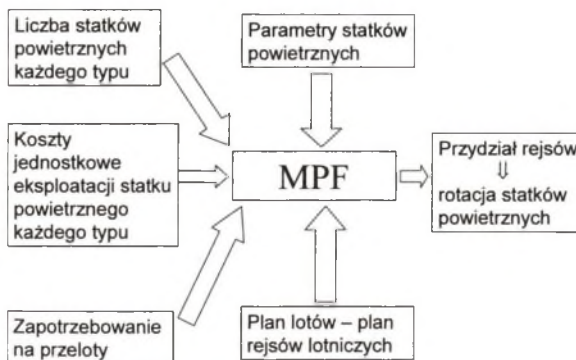
Całość problemu planowania pracy linii lotniczej dekomponujemy standardowo na etapy:

- wyznaczanie rejsów (planowanie lotów),
- wyznaczanie tygodniowych rotacji statków powietrznych,
- wyznaczanie rozkładu lotów i bieżąca korekta realizacji rotacji zakłóconych.



Rys. 1. Planowanie rotacji statków powietrznych linii lotniczej

Fig. 1. Rotation planning of airline aircrafts



Rys. 2. Schemat problemu wyznaczania rotacji statków powietrznych MPF

Fig. 2. Problem of aircrafts rotation investigation scheme

W etapie pierwszym wyznaczamy plan lotów - rejsy lotnicze realizujące przewidywane zapotrzebowanie na przeloty. W drugim etapie wyznaczamy zbiór

tygodniowych rotacji statków powietrznych przy maksymalizacji zysków przedsiębiorstwa lotniczego. Rotacja samolotu jest to przypisanie konkretnego egzemplarza samolotu do konkretnego numeru rejsu (rys. 1 i 2). Zagadnienie prawidłowego wyznaczenia rotacji samolotów jest zagadnieniem kluczowym dla optymalnego wykorzystania posiadanej floty lotniczej. Liczba wyznaczonych rotacji równa jest liczbie statków powietrznych niezbędnych do obsługi wyznaczonego rozkładu lotów. Linie lotnicze nieustannie narażone są na zakłócenia działań operacyjnych spowodowane zmiennymi warunkami pogodowymi oraz niespodziewanymi awariami statków powietrznych. Wymusza to podejmowanie decyzji taktycznych prowadzących do zmian w planowanym rozkładzie lotów i planowanej rotacji floty. Bieżąca realizacja planu lotów sprowadza się więc do:

- kontroli realizacji zaplanowanej rotacji,
- uaktualniania rotacji z powodu niewielkich odstępstw od planu,
- zmian rotacji wywołanych większymi zakłóceniami.

3. MODYFIKACJA ROTACJI PO WYPADNIĘCIU STATKU POWIETRZNEGO Z EKSPLOATACJI

Możliwe jest zastosowanie jednej z czterech metod postępowania, w przypadku kiedy wystąpią zakłócenia w realizacji wyznaczonej wcześniej rotacji statków powietrznych (planu realizacji rejsów) spowodowane poprzez wyłączenie z użycia jednego lub kilku egzemplarzy statków powietrznych z przyczyn technicznych.

- a. Zastąpienie jednego bądź kilku uszkodzonych statków powietrznych egzemplarzami rezerwowymi (w przypadku gdy są takie dostępne).
- b. Modyfikacja zaplanowanej rotacji (planu lotów), tak aby żaden z zaplanowanych rejsów nie był odwołany, lecz ze świadomym wprowadzeniem opóźnienia pewnej liczby rejsów.
- c. Odwołanie pewnej liczby zaplanowanych rejsów przy punktualnej realizacji pozostałych.
- d. Odwołanie pewnej liczby zaplanowanych rejsów z jednoczesnym świadomym wprowadzeniu opóźnienia pewnej liczby rejsów spośród pozostałych.

W zależności od wielkości floty przewoźnika, dopuszczalnych nakładów na minimalizację zakłócenia oraz polityki firmy preferowane są różne z przedstawionych metod. Najczęściej występuje przypadek (b), tzn. zakładamy, że żaden z przewidywanych w planie rejsów nie zostanie odwołany, a modyfikacja rotacji umożliwi obsługę „wypadniętych rejsów” [1], [2]. W tym artykule przyjmujemy założenie, że obsługujące daną siatkę połączeń egzemplarze statków powietrznych są tego samego typu lub posiadają tę samą pojemność Qac^{kt} (maksymalną liczbę pasażerów na pokładzie).

Oznaczamy przez $flt_1, flt_2, \dots, flt_j, \dots, flt_m$ kolejne rejsy rotacji. Dla każdego rejsu flt_j znany jest planowany czas odlotu (*block-off*) $tdep(flt_j)$, a także planowany czas $tdep(flt_{j+1})$, w którym dany statek powietrzny jest gotów do wykonania następnego rejsu flt_{j+1} w rotacji. Czas $tdep(flt_{j+1}) - tdep(flt_j)$ jest sumą czasu potrzebnego na wykonanie rejsu flt_j oraz czasu $tgst(kt, ap_i)$ niezbędnego na przygotowanie statku powietrznego do rejsu flt_{j+1} . Przy budowie nowej rotacji (zmodyfikowanej) niezbędne jest spełnienie warunku: *żaden statek powietrzny nie może wystartować do lotu wcześniej, niż zostało to pierwotnie zaplanowane w planie lotów*. Zatem nowy czas odlotu $tdep(flt_j^{mod})$ (*block-off*) dla zmodyfikowanej rotacji otrzymuje warunek (1):

$$tdep(flt_j^{\text{mod}}) \geq tdep(flt_j) \quad \text{dla: } j=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

Dla nowej, zmodyfikowanej rotacji statku powietrznego czas $tdep(flt_{j+1}^{\text{mod}})$, kiedy po wykonaniu rejsu flt_j , statek powietrzny jest gotów do wykonania następnego rejsu, dany jest (2):

$$tdep(flt_{j+1}^{\text{mod}}) = tdep(flt_j^{\text{mod}}) + tdep(flt_{j+1}) - tdep(flt_j) \quad \text{dla: } j=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

Opóźnienie startu $\Delta tdep(flt_j^{\text{mod}})$ dla rejsu flt_j dane jest zależnością (3):

$$\Delta tdep(flt_j^{\text{mod}}) = tdep(flt_j^{\text{mod}}) - tdep(flt_j) \quad \text{dla: } j=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

Przy analizie zagadnienia można założyć, że opóźnienie nie ulega zmianie ani podczas lotu, ani podczas obsługi w porcie lotniczym. Uwzględnienie ewentualnych dodatkowych opóźnień jest możliwe w późniejszym etapie. Uwzględniając przewidywaną liczbę pasażerów $Qpas(flt_j)$, w rejsie flt_j , można wyznaczyć całkowity „koszt” opóźnienia $cdl(flt_j)$ (4) w pasażero-godzinach

$$cdl(flt_j) = \Delta tdep(flt_j^{\text{mod}}) \cdot Qpas(flt_j) \quad \text{dla: } j=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

Całkowite opóźnienie dla danej siatki połączeń wynosi wdl (5)

$$wdl = \sum_{j=1}^m cdl(flt_j) \quad (5)$$

Ponieważ należy dążyć do minimalizacji opóźnienia na całej siatce połączeń, zadanie można zdefiniować następująco: tak dobrać zmodyfikowane czasy startów $\{\Delta tdep(flt_j^{\text{mod}})\}$ dla rejsów $\{flt_j\}$, aby zminimalizować (6)

$$\min_{\{\Delta tdep(flt_j^{\text{mod}})\}} wdl = \sum_{j=1}^m (tdep(flt_j^{\text{mod}}) - tdep(flt_j)) \cdot Qpas(flt_j) \quad (6)$$

przy warunku: $tdep(flt_j^{\text{mod}}) \geq tdep(flt_j)$ dla: $j=1, 2, \dots, m$.

4. REALIZACJA METODY MODYFIKACJI ROTACJI UWZGLĘDNIAJĄCEJ WYPADNIĘTE REJSY

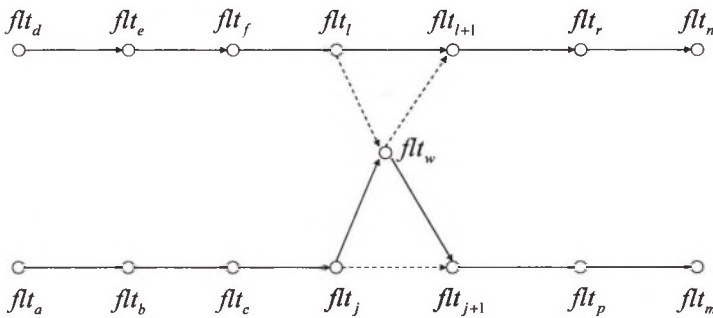
Przyjmujemy oznaczenia:

- $zac(kt)$ - liczba statków powietrznych kt -tego typu niezbędnych do realizacji pierwotnego planu rotacji (planu lotów); $0 \leq zac(kt) \leq kt_{\max}$,
- zm - liczba wycofanych statków powietrznych,
- $(zac(kt) - zm)$ - liczba statków powietrznych dyspozycyjnych,

kt_{max} - liczba statków powietrznych kt -tego typu we flocie przewoźnika,
 FLT^{rot} - zbiór rejsów rotacji.

W metodzie rejsy lotnicze $flt_j \in FLT^{rot}$ przedstawiamy jako wierzchołki w grafie $GF(FLT^{rot}, UF)$ (rys. 3). Zbiór gałęzi UF grafu $GF(FLT^{rot}, UF)$ zawiera łuki skierowane (flt_{j_1}, flt_{j_2}) (7) od wierzchołka flt_{j_1} do wierzchołka flt_{j_2} , jeśli dany rejs flt_{j_1} kończy się w tym porcie, gdzie rozpoczyna się rejs flt_{j_2}

$$(flt_{j_1}, flt_{j_2}) \in UF \tag{7}$$



Rys. 3. Graf $GF(FLT^{rot}, UF)$ metody modyfikacji rotacji

Fig. 3. Graph $GF(FLT^{rot}, UF)$ of rotation modification method

Zakładamy ponadto, że każdy z pozostających do dyspozycji statków powietrznych może wykonać przynajmniej jeden „wypadnięty rejs” flt_w , po wykonaniu którego statek ten wraca do pierwotnej rotacji. W przyjętym zapisie oznacza to, że do grafu $GF(FLT^{rot}, UF)$ dochodzą dodatkowe wierzchołki flt_w . Do zbioru gałęzi UF dodajemy więc łuki (flt_{j_1}, flt_w) łączące wierzchołki flt_{j_1} z odpowiednimi „wypadniętymi rejsami” (wierzchołkami flt_w). Rejsy do zrealizowania przez zbiór $(zac(kt) - zm)$ dyspozycyjnych statków powietrznych mogą być przedstawione jako odpowiednia ścieżka qs w grafie $GF(FLT^{rot}, UF)$ (8):

$$qs = \{(flt_o, flt_b), (flt_b, flt_c), \dots, (flt_{j_1}, flt_w), (flt_w, flt_{j_2}), \dots, (flt_p, flt_m)\} \tag{8}$$

Całkowity „koszt opóźnienia” pasażerów w rejsie flt_{j_2} wykonanym po rejsie flt_{j_1} oszacowuje równanie (9):

$$\Delta cdl(flt_{j_1}, flt_{j_2}) = \begin{cases} 0 & \text{– jeżeli } tdep(flt_{j_2}^{mod}) \leq tdep(flt_{j_1}) \\ (tdep(flt_{j_2}^{mod}) - tdep(flt_{j_1})) \cdot Qpas(flt_{j_2}) & \text{– jeżeli } tdep(flt_{j_2}^{mod}) > tdep(flt_{j_1}) \end{cases} \tag{9}$$

$\Delta cdl(flt_{j_1}, flt_{j_2})$ można traktować jako długość łuku (flt_{j_1}, flt_{j_2}) . Zatem całkowity „koszt opóźnienia” pasażerów dla całej siatki połączeń $Cdl(FLT^{rot})$ równa się długości ścieżki qs danej równaniem (10):

$$Cdl(FLT^{rot}) = \sum_{(flt_{j_1}, flt_{j_2}) \in FLT^{rot}} \Delta cdl(flt_{j_1}, flt_{j_2}) \quad (10)$$

5. PODSUMOWANIE

Zadanie wyznaczenia zmodyfikowanej rotacji statków powietrznych w przypadku wyłączenia przynajmniej jednego ze statków można traktować jako zadanie wyznaczenia ścieżki minimalnej w grafie $GF(FLT^{rot}, UF)$ (10). Ponieważ graf $GF(FLT^{rot}, UF)$ jest grafem skierowanym acyklicznym, zadanie to można rozwiązać prostym algorytmem programowania dynamicznego (jednokrotne cechowanie wierzchołków grafu). Algorytm taki pomyślnie przetestowano dla danych rzeczywistych, a wybrany wynik podano m.in. w [3].

Zagadnienie operacyjnego zarządzania procesem eksploatacji w przewozach lotniczych jest pod względem obliczeniowym zagadnieniem złożonym. Obliczenia testowe wykonano na danych rzeczywistych, pochodzących z rozkładu lotów Polskich Linii Lotniczych LOT SA.

Literatura

1. AIMS - Airline Information Management Systems, <http://aims-inc.com>
2. Malarski M.: Modelowanie procesów ruchu lotniczego dla kontroli i planowania lotów. Prace Naukowe PW Transport z.49, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2002.
3. Malarski M., Maźbic-Kulma B.: Problem modyfikacji rotacji samolotów uwzględniającej „wypadnięte rejsy”. Transport XXI wieku tom II, Warszawa 2004, s. 233-240.
4. Orlin J.B.: Minimizing the Number of Vehicles to Meet a Fixed Periodic Schedule, An Application of Periodic Posits Operations Research, vol. 30, No 4, 1982.
5. Teodorovič D.: Optimal Dispatching Strategy on a Airline Network After a Schedule Perturbation, European Journal of Operations Research No 15, 1984.