

Jan BORGON, Marek MALARSKI, Jacek SKORUPSKI

Politechnika Warszawska

Andrzej SŁODOWNIK

Polskie Linie Lotnicze LOT SA

WYBRANE ZAGADNIENIA STEROWANIA ROTACJĄ W CYKLU EKSPLOATACYJNYM SAMOLOTÓW

Streszczenie. W artykule przedstawiono definicje cyklu eksploatacyjnego samolotów, metody harmonogramowania samolotów - wyznaczania tzw. rotacji oraz omówiono zagadnienie wyznaczania bezpieczeństwa rozkładu lotów. Przedstawiono charakterystykę wpływu zakłóceń na czas trwania cyklu eksploatacyjnego. Na tej podstawie określono miarę rezerwy wskaźnika bezpieczeństwa wykonania rozpatrywanego rozkładu lotów. Następnie zasygnalizowano zagadnienie sterowania rotacją w cyklu eksploatacyjnym.

SOME PROBLEMS OF AIRPLANE ROTATION CONTROL IN OPERATIONAL CYCLE

Summary. In the paper definitions of airplane operations cycle are presented, method of aircraft operations scheduling (so called rotation) is given and a problem of determining airplane schedule safety is also defined. Characteristics of disturbances influence on operations cycle time is presented. Reserve of airplane schedule safety index is determined. Then a problem of rotation control is mentioned.

1. Lotniczy cykl eksploatacyjny - pojęcia podstawowe

Podczas eksploatacji statków powietrznych (SP) można dostrzec zjawisko powtarzania się charakterystycznych zdarzeń. Zjawisko to jest związane z cyklem start - lot - lądowanie - obsługa itp. Różnorodność możliwych zdarzeń jest tutaj duża i utrudnia analizę procesów eksploatacyjnych. Trudność tę można ominąć przez standaryzację terminologii dotyczącej tych procesów, której istotą jest wprowadzenie pojęcia „lotniczy cykl eksploatacyjny” [6]. Dla potrzeb tego artykułu dalej zdefiniowano kilka podstawowych pojęć związanych z lotniczym cyklem eksploatacyjnym. Lotniczy cykl eksploatacyjny jest to uporządkowany zbiór przebiegów eksploatacyjnych, tzn. przebiegów lotu oraz przebiegów obsługi SP, wyznaczony przez cele eksploatacji SP.

przebieg lotu - to uporządkowany zbiór faz lotu wyznaczony przez techniczne cele lotu (np. start, manewrowanie wg jednej określonej procedury, lądowanie itp.);

przebieg obsługowy - uporządkowany zbiór faz obsługowych wyznaczonych przez techniczne cele obsługiwanego (np. obsługa bieżąca, obsługa hangarowa, obsługa liniowa itp.).

Fazę eksploatacyjną, podobnie jak przebieg eksploatacyjny można podzielić na dwie fazy:

fazę lotu - jako lot SP wyznaczony przez doraźne cele lotu, mający jednorodny charakter (np. lot po prostej, lot po łuku, ruch na ziemi - kołowanie itp.),

fazę obsługową - jako czynność obsługową wyznaczoną przez doraźne cele obsługiwanego, mającą jednorodny charakter (np. obsługę płytową - handling, diagnozowanie, przywracanie sprawności technicznej SP itp.).

Można wyróżnić zbiór stanów eksploatacyjnych S , określających sprawność samolotu, np. samolot w pełni sprawny, samolot uszkodzony zdolny do lotu, samolot niesprawny. Oznaczając przez F zbiór faz, każdemu samolotowi realizującemu lotniczy cykl eksploatacyjny można przypisać ciąg par $(f,s) \in F \times S$, określających fazę lotniczego cyklu eksploatacyjnego oraz stan eksploatacyjny samolotu.

Rotacja samolotu - sekwencja następujących po sobie przebiegów wykonywanych tym samym samolotem niezależnie od oznaczenia rejsu. Tym samym pojęciem określa się także rotację w ujęciu globalnym, czyli np. rotację dzienną, tygodniową lub sezonową. Zagadnienie prawidłowego wyznaczenia rotacji samolotów jest zagadnieniem kluczowym dla optymalnego wykorzystania posiadanej floty lotniczej, a więc minimalizacji kosztów wykonania lotów. Zagadnienie wyznaczenia rotacji samolotów jest formą ogólnego zagadnienia harmonogramowania.

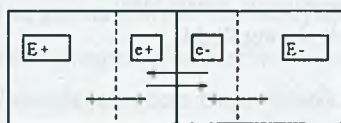
2. Gotowość samolotów pracujących w złożonym systemie eksploatacyjnym

Samolot w procesie eksploatacji przebywa w różnych stanach eksploatacyjnych. Stany eksploatacyjne $T_i(T)$ charakteryzuje się wartością oczekiwaną czasu przebywania samolotu w stanie eksploatacyjnym T_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$; n -liczba stanów eksploatacyjnych samolotu) oraz sumarycznym czasem przebywania samolotu w określonym stanie obsługi.

Gotowością samolotu nazywa się zdolność samolotu do terminowego przystąpienia do realizacji zadania lotniczego oraz wykonywania zadań lotniczych w zadanym czasie T . Miarami gotowości są funkcje utworzone na zbiorze stanów eksploatacyjnych. Stany eksploatacyjne można podzielić na dwa podzbiory: podzbiór stanów gotowości i podzbiór

stanów niegotowości. Do stanów gotowości zalicza się takie stany eksploatacyjne, w których samolot terminowo może przystąpić do realizacji zadania lotniczego. Gotowość mierzona prawdopodobieństwem przebywania obiektu w podzbiorze stanów gotowości wyznacza się wykorzystując modelowanie eksploatacji procesem semi-markowskim.

Obiekty techniczne w procesie eksploatacji mogą znajdować się w różnych stanach eksploatacyjnych. Z punktu widzenia niezawodności niektóre ze stanów zalicza się do stanów zdatności, inne do stanów niezdatności. Przykładowy model ogólny obiektu przedstawia rys.1.



E+ - podzbiór stanów zdatności samolotu

E- - podzb. stanów niezdatności samolotu

e+ - podzbiór stanów E+, z którego samolot przechodzi do zbioru E-

e- - podzbiór stanów E-, z którego samolot przechodzi do zbioru E+

Rys.1. Ogólny model stanów samolotu

Fig.1. General model of plane states

Przykładowy model bezpieczeństwa samolotu w czasie lotu w tym ujęciu przedstawiono na rys.2.

Równania Kołmogorowa dla tego modelu (odpowiednie prawdopodobieństwa stanów) wyglądają następująco:

$$R'_L(t) = -\lambda_{LS}(t) \cdot R_L(t) + \mu_{LS}(t) \cdot Q_{LS}(t) - \lambda_{LZB}(t) \cdot R_L(t) + \mu_{LZB}(t) \cdot P_{LZB}(t) \quad (1)$$

$$Q'_{LS}(t) = \lambda_{LS}(t) \cdot R_L(t) + \mu_{LS}(t) \cdot Q_{LS}(t) \quad (2)$$

$$P'_{LZB}(t) = \lambda_{LZB}(t) \cdot R_L(t) + \mu_{ZB}(t) \cdot P_{LZB}(t) - \lambda_{LB}(t) \cdot P_{LZB}(t) \quad (3)$$

$$Q'_B(t) = -\lambda_{LB}(t) \cdot R_{LZB}(t) \quad (4)$$

$$R_L(t) = Q_{LS}(t) + P_{LZB}(t) + Q_B(t) = 1 \quad (5)$$

$$R_L(0) = 1 ; Q_{LS}(0) = 0 ; P_{LZB}(0) = 0 ; Q_B(0) = 0 \quad (6)$$

gdzie: λ_{LS} - intensywność zawodności sprawności,

λ_{ZB} - intensywność zawodności zagrożenia bezpieczeństwa,

λ_{LB} - intensywność zawodności bezpieczeństwa,

μ_{LS} - intensywność napraw niesprawności,

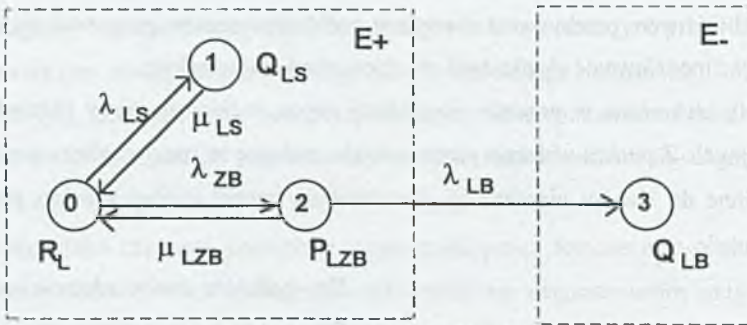
μ_{ZB} - intensywność napraw zawodności zagrożenia bezpieczeństwa,

R_L - prawdopodobieństwo przebywania samolotu w stanie sprawności,

P_{LZB} - prawdopodobieństwo przebywania samolotu w stanie zagrożenia bezpieczeństwa,

Q_{LS} - prawdopodobieństwo przebywania samolotu w stanie zagrożenia sprawności,

Q_{LB} - prawdopodobieństwo przebywania samolotu w stanie niezdatności.

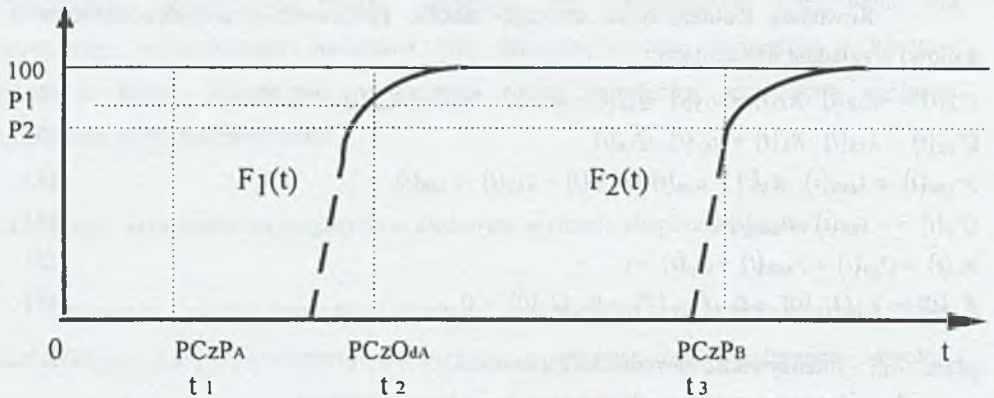


Rys.2. Model bezpieczeństwa samolotu w czasie lotu

Fig.2. Model of plane safety during flight

3. Planowanie i realizacja podstawowego cyklu eksploatacyjnego

Podstawowy cykl eksploatacyjny jest to przelot samolotu pomiędzy parą portów wraz z obsługą w porcie odlotu. Realizacje czasów trwania poszczególnych faz podstawowego cyklu eksploatacyjnego są wielkościami losowymi, które można opisać za pomocą dystrybuant - rys.3.



Rys.3. Przykładowe dystrybuanty podstawowego cyklu eksploatacyjnego samolotu

Fig.3. Example of distribution functions in basic operational cycle

gdzie: $PCzP_A$ - planowany czas przylotu do portu A

$PCzOd_A$ - planowany czas odlotu z portu A

$PCzP_B$ - planowany czas przylotu do portu B

- $F_1(t)$ - dystrybuanta czasu postoju w porcie A
- $F_2(t)$ - dystrybuanta czasu blokowego lotu z A do B
- P_1 - zakładany poziom punktualności odlotu z portu A
- P_2 - zakładany poziom punktualności przylotu do portu B

Ponieważ rozkład lotów z założenia zakłada, że odlot nie może się odbyć wcześniej niż w rozkładowo planowanym czasie, wówczas dla $t \leq t_2$ dystrybuanta $F_1(t) = 0$ (rozkład obcięty). Znając postać $F_1(t)$ i $F_2(t)$ można obliczyć dystrybuantę czasu trwania podstawowego cyklu eksploatacyjnego $F_3(t)$. W pierwszym przybliżeniu zakładać można, że $F_1(t)$ i $F_2(t)$ są niezależne, wówczas $F_3(t)$ jest iloczynem $F_1(t)$ i $F_2(t)$. Dystrybuanty $F_1(t)$, $F_2(t)$ i $F_3(t)$ są podstawowymi charakterystykami przebiegów oraz podstawowego lotniczego cyklu eksploatacyjnego. Charakterystyki te są wyznaczane w sposób doświadczalny. Celem modelowania jest ocena niezawodności wykonania cyklu w zależności od poziomu zakłóceń.

Z każdego stanu $S_i \in E_+$ cyklu eksploatacyjnego można przejść do stanu zawodności sprawności $S_i^a \in E_+$ lub zawodności bezpieczeństwa $S_i^b \in E_-$. Zakładamy, że stan S_i^b jest stanem pochłaniającym, tzn. że po przejściu do zbioru stanów E_- nie jest możliwe przejście do stanów E_+ . Przy takim założeniu stany E_- reprezentują sytuacje, do których przejście przerywa podstawowy cykl eksploatacyjny i należy go definiować od początku. Stan zawodności bezpieczeństwa jest z założenia stanem, z którego przejście do stanu E_+ jest niemożliwe. Natomiast stan zawodności sprawności może być zdefiniowany jako odwracalny i może być modelowany jako przedłużona obsługa w porcie, przy zastosowaniu tego samego modelu.

4. Analiza cyklu eksploatacyjnego samolotu

Fazy podstawowego cyklu eksploatacyjnego dzielą się na fazy użytkowania (loty) i fazy obsługi. Do faz użytkowania zaliczymy między innymi: kołowanie przedstartowe, start i wznoszenie, przelot, wyczekiwanie w powietrzu, schodzenie, lądowanie, kołowanie po wylądowaniu. Do faz obsługowych można zaliczyć między innymi: obsługę przed lotem, obsługę między lotami, obsługową przerwę stabilizującą. Dla potrzeb modelowania cyklu eksploatacyjnego przyjmuje się, że każdy i -ty stan cyklu charakteryzowany jest wartością oczekiwaną czasu przebywania samolotu w i -tym stanie, prawdopodobieństwem przejścia

samolotu P_{ij} z i-tego do j-tego stanu eksploatacyjnego oraz prawdopodobieństwem $P_i(0)$ przebywania samolotu w i-tym stanie w chwili $t=0$.

Wartość oczekiwana czasu $\bar{\tau}$ przebywania samolotu w zbiorze stanów E_+ cyklu eksploatacyjnego pod warunkiem, że w chwili początkowej $t=0$ znajdował się on w i-tym stanie opisana jest układem równań algebraicznych.

$$\bar{\tau} = \bar{T}_i + \sum_{j=1}^N P_{ij} \bar{\tau}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

gdzie:

- \bar{T}_i - wartość oczekiwana czasu przebywania samolotu w i-tym stanie,
- P_{ij} - prawdopodobieństwo przejścia samolotu do j-tego stanu pod warunkiem, że znajduje się on w i-tym stanie,
- N - liczność zbioru stanów E_+ .

Wartość oczekiwana czasu przebywania samolotu w zbiorze stanów E_+ cyklu eksploatacyjnego dana jest wzorem:

$$\bar{\tau} = \sum_{k=1}^N \tau_k P_k(0), \quad (8)$$

gdzie: $P_k(0)$ - prawdopodobieństwo początkowe przebywania samolotu w k-tym stanie.

Rozwiązując układ równań algebraicznych (7) i korzystając ze wzoru (8), wyznaczamy wartość oczekiwaną $\bar{\tau}$ czasu trwania cyklu eksploatacyjnego.

W realnym cyklu eksploatacyjnym występują zarówno stany eksploatacyjne zgodne z intencją użytkowników systemu, lecz również zakłócenia. Można do nich zaliczyć: uszkodzenia urządzeń, blokadę całości lub części lotniska, zmianę warunków meteorologicznych na trasie itp. Czynniki te powodują wystąpienie dodatkowych nieintencjonalnych stanów cyklu eksploatacyjnego. Występujące zakłócenia w istotny sposób mogą wpływać na czas przebywania systemu w poszczególnych stanach, jak również na prawdopodobieństwo przejścia do innych stanów. Schematycznie lotniczy cykl eksploatacyjny przedstawiono na rys.4.

Oznaczmy przez $\bar{\Theta}_z$ wartość oczekiwaną czasu przebywania samolotu w zbiorze stanów E_+ podstawowego cyklu eksploatacyjnego, pod warunkiem wystąpienia zakłóceń z .

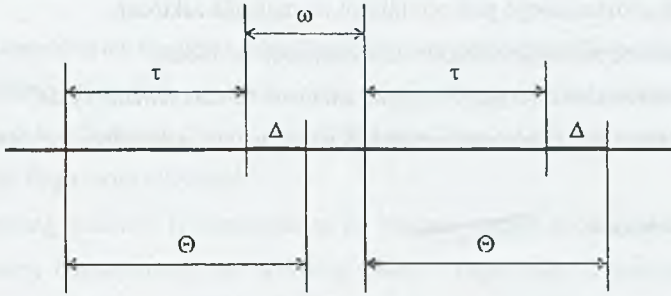
Wartość $\bar{\Theta}_z$ wyznaczona jest z układu równań (7) i (8) po podstawieniu $T_i(z)$, $P_{ij}(z)$.

gdzie:

$T_i(z)$ - wartość oczekiwana czasu przebywania samolotu w i-tym stanie, pod warunkiem wystąpienia zakłócenia z ,

$P_{ij}(z)$ - prawdopodobieństwo przejścia z i-tego do j-tego stanu, pod warunkiem wystąpienia zakłócenia z .

$z = 1, 2, \dots, Z$ Z - liczba możliwych kompleksów zakłóceń.



Rys.4. Lotniczy cykl eksploatacyjny

Fig.4. Aircraft operation cycle

Oznaczając przez Q_z prawdopodobieństwo wystąpienia kompleksu zakłóceń z ,

otrzymujemy:
$$\bar{\Theta} = \sum_{z=1}^Z (Q_z \cdot \bar{\Theta}_z) \quad (9)$$

Utwórzmy różnicę:
$$\bar{\Delta} = \bar{\Theta} - \bar{\tau}, \quad (10)$$

gdzie:

- Δ - charakterystyka wpływu zakłóceń na czas trwania cyklu,
- τ - wartość oczekiwana czasu przebywania samolotu w zbiorze stanów E_+ podstawowego cyklu eksploatacyjnego,
- $\bar{\Theta}$ - wartość oczekiwana czasu przebywania samolotu w zbiorze stanów E_+ cyklu eksploatacyjnego pod warunkiem wystąpienia zakłóceń.

Oznaczmy czas pomiędzy końcem cyklu i-tego a początkiem cyklu i+1-ego przez ω .

Stosunek
$$A = \frac{\omega - \Delta}{\omega}$$

jest miarą wskaźnika bezpieczeństwa wykonania rozpatrywanego rozkładu lotów. Jeśli $A=1$, wówczas rezerwa czasu jest maksymalna, jeśli $A=0$ - brak jest rezerwy czasu. Dla $A < 0$ mamy do czynienia z naruszeniem rozkładu lotu. Maksymalizacja wskaźnika A powinna stanowić jeden z celów procesu eksploatacji samolotów.

Proponuje się następujący algorytm analizy sterowania rotacją w cyklu eksploatacyjnym:

- wyznaczenie z doświadczenia zakresu wartości oczekiwanych czasów przebywania samolotu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych,
- wyznaczenie z doświadczenia zakresu prawdopodobieństw przejść między poszczególnymi stanami,
- wyznaczenie wartości oczekiwanej czasu przebywania samolotu w zbiorze stanów E. cyklu eksploatacyjnego pod warunkiem wystąpienia zakłóceń,
- wyznaczenie prawdopodobieństwa wystąpienia zakłóceń,
- wyznaczenie charakterystyki wpływu zakłóceń na czas trwania cyklu,
- wyznaczenie wskaźnika bezpieczeństwa punktualnego wykonania rozkładu lotów.

5. Podsumowanie

Zmiany na rynku przewozów lotniczych spowodowane procesem deregulacji zaostrzyły walkę konkurencyjną pomiędzy przewoźnikami i zaowocowały gwałtownym rozwojem systemów wspomagania decyzji na każdym szczeblu zarządzania przedsiębiorstwem lotniczym. W przewozach lotniczych poszukiwania nowych skutecznych sposobów zarządzania idą głównie w kierunku tworzenia zintegrowanych systemów sterowania procesem eksploatacji. Wybrane fragmenty analizy lotniczego cyklu eksploatacyjnego przedstawiono w tym artykule. Nie omówiono tu dalszych kierunków postępowania:

- metod wyznaczania rotacji optymalnych dla zadanych kryteriów ekonomicznych,
- analizy wrażliwości lotniczego cyklu eksploatacyjnego na zakłócenia,
- metod zmniejszania propagacji zakłóceń.

LITERATURA

1. Borgoń J., Malawko J.: Simulation Testing of Aircraft Operations Scheduling, Symposium on Operations Research (SOR'96), Braunschweig 09.'96, str.124.
2. Malarski M., Skorupski J.: Probabilistic Analysis of Air Traffic Controller Reliability, Symposium on Operations Research (SOR'97), Jena 09.'97, str. 182.
3. Malawko J., Słodownik A., Borgoń J.: Metoda określania niewykorzystanego potencjału sterowalności Lotniczego Systemu Transportowego LST, z uwzględnieniem zakłóceń rozkładowego cyklu eksploatacyjnego, VI Konferencja Naukowa Problemy Niezawodności Transportu, Jaszowiec '97, t.2 str. 187-194.
4. Mc Donnell Douglas: Operating Cost Briefing Manual, 05.'91.

5. Słodownik A., Malawko J., Polkowski J.: System minimalizacji bezpośrednich kosztów operacyjnych w PLL LOT, Warszawa 1991, opracowanie PLL LOT.
6. Olearczuk E., Sikorski M., Tomaszek H.: Eksploatacja samolotów (elementy teorii), MON, Warszawa 1978.

Recenzent: Dr hab.inż. Konrad Wojciechowski, prof.Pol.Śl.

Abstract

The paper describes an algorithm which has been developed to facilitate the modeling of aircraft operations scheduling processes. This methodology is the common project mutually elaborated by Technical University of Warsaw, Faculty of Transport and LOT Polish Airlines - the flag carrier of Poland.

Each aircraft operating schedule is concerned as air transport cycle and is determined by means of performing consecutively the operating phases. Those can be grouped in the following way: phases of utilization (flight) and phases of servicing. Of these two groups the former includes, e.g. pre-take-off taxiing, take-off and climb, cruising, holding, descent, landing, taxiing after the landing; whereas the latter comprises the preflight maintenance, turnaround servicing, and servicing that fulfils the role of a stabilizing break in the operational use cycle. In practise, in case of the operating cycle that involves passenger transport phases of servicing and phases of utilization are taken into account, including base airport and airport of destination, as well as flight to the destination and back to the base one - respectively. For the needs of modeling the operating cycle and the operating phases are identified with operating states related to the aircraft. It has been assumed as the first approximation for modeling process, that the processes that occur within the operating cycles are the semi-Markov ones.

In the paper definitions of aircraft operations cycle are presented, method of aircraft operations scheduling (so called rotation) is given and a problem of determining airplane schedule safety is also defined. Characteristics of disturbances influence on operations cycle time is presented. Reserve of airplane schedule safety index is determined. Then problem for analysis of rotation control is mentioned.