

## OPRACOWANIE HARMONOGRAMU DOSTAW CZĘŚCI ZAMIENNYCH DLA FLOTY STATKÓW POWIETRZNYCH PRZY WYKORZYSTANIU SYMULACJI KOMPUTEROWEJ ICH PROCESU EKSPLOATACJI

### Streszczenie

*W artykule został opisany proces przygotowania harmonogramu dostaw części zamiennych dla statków powietrznych. W opisanym algorytmie harmonogram dostaw jest opracowany i oceniany przy wykorzystaniu symulacji komputerowej procesu eksploatacji zbioru statków powietrznych. Oprócz przedstawienia głównych punktów algorytmu w publikacji szczegółowo została opisana jedna z metod oceny przygotowanego harmonogramu.*

### WSTĘP

Zachowanie płynności dostaw odnawialnych zasobów magazynowych w procesie utrzymania wysokiego stopnia sprawności technicznej obiektów technicznych jest priorytetem działalności struktur logistycznych w przedsiębiorstwie lotniczym. Jedną z metod optymalizacji dostaw jest wykorzystanie symulacji procesu eksploatacji jako podstawy tworzenia harmonogramów dostaw części zamiennych.

W artykule przedstawiono algorytm uzyskania harmonogramu dostaw części zamiennych dla zbioru statków powietrznych przy wykorzystaniu wyników symulacji komputerowej ich procesu eksploatacji. Podczas analizy uwzględniono następujące elementy składowe symulacji procesu eksploatacji:

- kryteria wykonywania wymian agregatów w ramach czynności profilaktycznych i niesprawności statków powietrznych,
- profil eksploatacji każdego statku powietrznego odzwierciedlający sposób wykorzystania pojedynczego samolotu – intensywność i parametry wykonywanych lotów,
- odzwierciedlenie aktualnego stanu technicznego statku powietrznego i agregatów w danych wejściowych,
- zamodelowanie stanu magazynu oraz dostaw części zamiennych w ramach przygotowanego harmonogramu,
- ocena przygotowanego harmonogramu na podstawie wykonanych symulacji procesu eksploatacji statków powietrznych.

Uwzględnienie powyższych danych i oparcie założeń harmonogramu na danych historycznych z eksploatacji statków powietrznych w porównaniu z aktualnymi zapasami oraz planowanymi wymianami profilaktycznymi, może być podstawą jego optymalizacji i uzyskania wysokiego współczynnika sprawności w skali całej organizacji lotniczej

### 1. MOTYWACJA

Pomimo, że wymiany agregatów dla statków powietrznych powinny być wykonywane jako wymiany profilaktyczne stanowią one mniej niż 20% wszystkich wymian agregatów. Nawet w przypadku wymian profilaktycznych zaplanowanie terminów jest utrudnione ze względu na dużą różnorodność kryteriów obsługi profilaktycznych, ich różne metody wyznaczania oraz wpływ intensywności oraz rodzaju eksploatacji samolotu na aktualny stan techniczny agregatu. Przygotowanie prawidłowego modelu matematycznego zużycia poszczególnych obiektów technicznych/agregatów jest przedmiotem wielu badań i opracowań naukowych [1, 2, 3, 4]. Przedstawiony algorytm został oparty na założeniu, że modele te są dostępne i mogą zostać wykorzystane w przygotowaniu modelu matematycz-

nego do symulacji komputerowej procesu eksploatacji zbioru obiektów technicznych.

Wykorzystanie symulacji komputerowej, wykonanej na podstawie danych zebranych poprzez informatyczne systemy wsparcia eksploatacji statków powietrznych, pozwala przygotować harmonogram dostaw części zamiennych dla zróżnicowanych pod względem stanu technicznego i profilu eksploatacji zbioru samolotów. Celem przygotowania algorytmu było opracowanie metody optymalizacji dostaw części zamiennych dla złożonych obiektów technicznych zgodnie ze strategią just-in-time [5, 6].

### 2. ALGORYTM OPRACOWANIA OPTIMALNEGO HARMONOGRAMU DOSTAW CZĘŚCI ZAMIENNYCH

Algorytm uzyskania harmonogramu dostaw części zamiennych wykorzystuje symulację komputerową procesu eksploatacji statku powietrznego w celu uzyskania terminów wystąpienia zapotrzebowania na agregaty analizowanych typów. W algorytmie analizowane są jedynie agregaty krytyczne, czyli takie, których sprawność wpływa w sposób bezpośredni na bezpieczeństwo eksploatacji statku powietrznego – struktura szeregową. Symulacja komputerowa procesu eksploatacji jest elementem składowym algorytmu przygotowania, oceny i modyfikacji harmonogramu dostaw. Na rysunku 1. został przedstawiony w formie diagramu oraz opisany algorytm tworzenia optymalnego harmonogramu dostaw.

W opracowanym algorytmie uzyskania harmonogramu dostaw części zamiennych wykorzystane są dwa rodzaje symulacji komputerowej: z ograniczonym i nieograniczonym magazynem. Symulacja komputerowa z wykorzystaniem nieograniczonego magazynu służy do opracowania harmonogramów początkowych, które następnie są modyfikowane przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych [7, 8, 9]. Przygotowane harmonogramy są oceniane za pomocą wyników symulacji komputerowej z ograniczonym stanem magazynu.

W celu uzyskania najlepszego harmonogramu dostaw części zamiennych zostały wykorzystane algorytmy genetyczne, w którym pojedynczym obiektem podlegającym modyfikacji jest harmonogram. Symulacja komputerowa procesu eksploatacji zbioru statków powietrznych z nieograniczonym magazynem została zastosowana do przygotowania puli harmonogramów początkowych, a na podstawie wyników symulacji z uwzględnieniem wielkości zapasów w magazynie wykonywana jest ocena i modyfikacja harmonogramów.

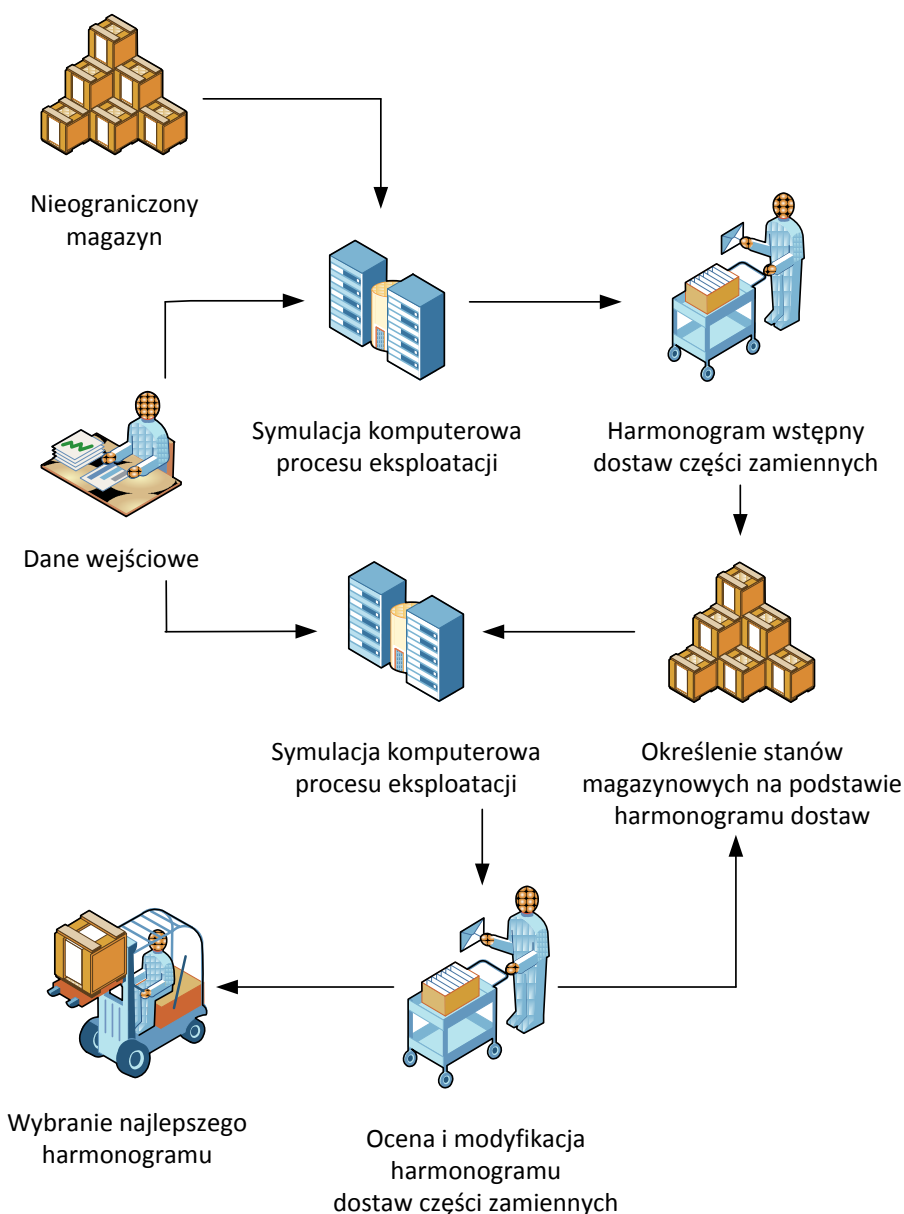
Algorytm uzyskania optymalnego harmonogramu został zbudowany z następujących kroków:

1. Import danych wejściowych, składających się ze struktury złożonego obiektu technicznego, jego profilu eksploatacji, aktualnego stanu technicznego oraz kryteriów wymian profilaktycznych agregatów, z których statek powietrzny jest złożony. Import danych wejściowych wykonywany jest w ramach każdej symulacji w celu zapewnienia identycznych warunków początkowych dla każdej symulacji.
2. Przygotowanie puli harmonogramów początkowych na podstawie wyników symulacji procesu eksploatacji floty statków powietrznych z nieograniczonym magazynem.
3. Ocena harmonogramów zakupów części zamiennych przy wykorzystaniu symulacji komputerowej uwzględniającej stan magazynu, który jest zwiększany zgodnie z badanym harmonogramem.
4. Adaptacja populacji harmonogramów poprzez ich selekcję, modyfikację i krzyżowanie.
5. Wybranie optymalnego harmonogramu dostaw zgodnie z przyjętą funkcją oceny.  
W dalszej części dokładniej zostały opisane wymienione powyżej kroki algorytmu.

## 2.1. Przygotowanie modelu procesu eksploatacji statków powietrznych

Pierwszym krokiem opracowania harmonogramu dostaw części zamiennych jest analiza i opracowanie modelu eksploatacji statku powietrznego. Model ten uwzględnia zasady wymian profilaktycznych agregatów uzależnione zarówno od czasu kalendarzowego, jak i od intensywności oraz rodzaju eksploatacji poszczególnych obiektów technicznych. Dla każdego agregatu obowiązkowym elementem jest jego charakterystyka niezawodnościowa, gdyż pomimo zastosowania obsługi i wymian profilaktycznych nadal wykrywane są uszkodzenia agregatu w trakcie eksploatacji.

Drugim krokiem w tym punkcie jest odzwierciedlenie w danych wejściowych dla każdego statku powietrznego jego indywidualnego profilu eksploatacji (intensywność lotów, charakterystyka przystoi dla każdego z parametrów eksploatacyjnych, metody wyznaczania złożonych parametrów eksploatacyjnych). Poprzez modyfikację profilu eksploatacji możliwe jest odzwierciedlenie historycznego lub planowanego typu eksploatacji, co umożliwi określenie zmian harmonogramu dostaw po zmianie intensywności, typu lub warunków eksploatacji.



**Rys. 1.** Diagram uzyskania optymalnego harmonogramu dostaw części zamiennych przy wykorzystaniu symulacji komputerowej procesu eksploatacji zbioru statków powietrznych. Opracowanie własne.

**2.2. Zastosowanie symulacji komputerowej do opracowania i modyfikacji harmonogramów dostaw**

Harmonogram początkowy uzyskiwany jest na podstawie wyników pojedynczej symulacji procesu eksploatacji z nieograniczonym magazynem. Każde zgłoszone w trakcie symulacji zapotrzebowanie jest jedną pozycją w tworzonemu harmonogramie zakupów i opisane jest za pomocą dwóch niezbędnych dla harmonogramu danych – terminu wystąpienia zapotrzebowania oraz identyfikatora typu części zamiennej.

Symulacja komputerowa procesu eksploatacji zbioru statków powietrznych wykorzystywana jest do oceny i modyfikacji przygotowanych harmonogramów części zamiennych. W ramach modyfikacji harmonogramu wykonywane jest dodawanie, odejmowanie lub modyfikacja terminów dostaw na podstawie wielokrotnej symulacji procesu eksploatacji, uwzględniającej początkowy stan magazynu oraz dostawy części zamiennych zaplanowane w ramach modyfikowanego harmonogramu. Ocena harmonogramu została opisana dokładnie poniżej.

**3. OCENA HARMONOGRAMU DOSTAW CZĘŚCI ZAMIENNYCH PRZY WYKORZYSTANIU SYMULACJI KOMPUTEROWEJ**

Wszystkie harmonogramy - zarówno początkowy, jak i harmonogramy otrzymane podczas modyfikacji - podlegają ocenie. Celem algorytmu jest znalezienie takiego harmonogramu dostaw, dla którego terminy dostarczenia części zamiennych będą zbliżone do strategii just-in-time, czyli minimalizowany jest zarówno czas oczekiwania obiektu technicznego na części zamiennie, jak i czas przechowywania ich w magazynie. W trakcie symulacji śledzeniu podlegają wielkości parametrów, które następnie są wykorzystywane do oceny harmonogramu i są to: łączny czas niesprawności samolotów oraz łączny czas przechowywania zasobów w magazynie.

**3.1. Czas niesprawności statku powietrznego**

Podstawowym parametrem zbieranym w trakcie symulacji jest czas niesprawności statku powietrznego, czyli czas jaki upłynął od chwili wystąpienia zapotrzebowania na brakującą część zamienną do czasu usprawnienia obiektu. Czas określający koniec tego okresu jest czasem usprawnienia obiektu, a nie czasem dostarczenia niesprawnej części zamiennej, gdyż usprawnienie samolotu to wymiana wszystkich niesprawnych jego agregatów. Na rysunku 2. przedstawiono zasady wyznaczenia pojedynczego czasu niesprawności pojedynczego statku powietrznego (obektu technicznego).

Dla każdego statku powietrznego zbierane są wartości długości okresów jego niesprawności  $CN_{ipw}$ , które sumowane są w łączny czas niesprawności samolotu  $CN_{iw}$  według wzoru:

$$CN_{iw} = \sum_{p=1}^{P_{iw}} CN_{ipw} \tag{1}$$

gdzie:

$CN_{ipw}$  – długość p-tego okresu niesprawności i-tego statku powietrznego podczas w-tej symulacji,

$P_{iw}$  – liczba okresów niesprawności i-tego statku powietrznego w-tej symulacji,

$CN_{iw}$  – łączny czas niesprawności i-tego statku powietrznego w-tej symulacji.

Dla pojedynczej symulacji obliczany jest łączny czas niesprawności zbioru statków powietrznych według następującej zależności:

$$CN_w = \sum_{i=1}^N CN_{iw} \tag{2}$$

gdzie:

$CN_w$  – łączny czas niesprawności zbioru statków powietrznych w-tej symulacji,

$N$  – liczba statków powietrznych.

Parametrem oceniającym harmonogram jest łączny czas niesprawności statków powietrznych podczas wszystkich symulacji oceniających harmonogram. Ten czas wyznaczany jest zgodnie z wzorem:

$$CN = \sum_{w=1}^W CN_w \tag{3}$$

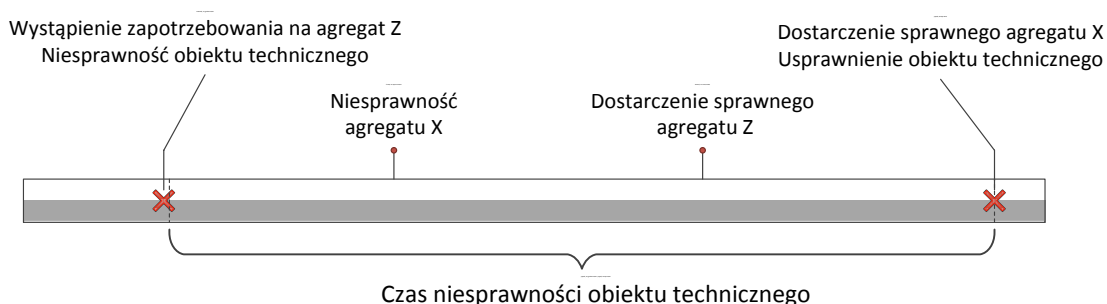
gdzie:

$CN$  – suma czasów niesprawności wszystkich statków powietrznych podczas wszystkich symulacji oceniających harmonogram,

$W$  – liczba symulacji oceniających harmonogram.

**3.2. Czas przechowywania zasobów w magazynie**

Drugim parametrem wykorzystywanym do oceny harmonogramu jest łączny czas przechowywania części zamiennych (zasobów) w magazynie. Czas przechowywania zasobu w magazynie to czas od chwili dostarczenia zasobu do magazynu (dla zasobów ze stanu wejściowego magazynu jest to czas rozpoczęcia symulacji) do czasu montażu zasobu na statku powietrznym (dla niewykorzystanych zasobów będzie to czas zakończenia symulacji).



**Rys. 2.** Zasada wyznaczania pojedynczego czasu niesprawności statku powietrznego. Opracowanie własne.

Dla pojedynczej symulacji obliczany jest łączny czas przechowywania wszystkich egzemplarzy wszystkich typów zasobów w magazynie:

$$CM_w = \sum_{i=1}^O \sum_{j=1}^{S_{iw}} CM_{ijw} \quad (4)$$

gdzie:

$CM_w$  – łączny czas przechowywania części zamiennych w magazynie w trakcie  $w$ -tej symulacji,

$O$  – liczba typów zasobów przechowywana w magazynie,

$S_{iw}$  – liczba egzemplarzy  $i$ -tego typu przechowywana w magazynie podczas  $w$ -tej symulacji,

$CM_{ijw}$  – czas przechowywania  $j$ -tego egzemplarza  $i$ -tego typu zasobu w magazynie podczas  $w$ -tej symulacji.

Parametrem oceniającym harmonogram będzie łączny czas przechowywania zasobów w magazynie podczas wszystkich symulacji oceniających harmonogram. Ten czas wyznaczany jest zgodnie z wzorem:

$$CM = \sum_{w=1}^W CM_w \quad (5)$$

gdzie:

$CM$  – suma czasów przechowywania zasobów w magazynie dla wszystkich symulacji oceniających harmonogram,

$CM_w$  – łączny czas niesprawności zbioru obiektów technicznych  $w$ -tej symulacji.

### 3.3. Funkcja oceny harmonogramu – ważona suma czasu niesprawności statków powietrznych oraz czasu przechowywania zasobów w magazynie

Przy wykorzystaniu parametru czasu niesprawności obiektów technicznych oceniane jest dopasowanie harmonogramu dostaw do zgłoszonych zapotrzebowań na zasoby w celu zapewnienia gotowości statków powietrznych do lotów. Natomiast czas przechowywania zasobów w magazynie służy do oceny dopasowania harmonogramu do minimalizacji czasów przechowywania części zamiennych w magazynie. Jedną z możliwych funkcji dopasowania jest ważona suma czasu niesprawności statków powietrznych oraz czasu przechowywania zasobów w magazynie, która przedstawiona jest za pomocą zależności:

$$OH = w_n CN + w_m CM \quad (6)$$

gdzie:

$w_n$  – waga dla łącznego czasu niesprawności obiektów technicznych,

$w_m$  – waga dla łącznego czasu przechowywania zasobów w magazynie.

Wykorzystanie wag dla poszczególnych elementów funkcji oceny służy do określenia ważności poszczególnych kryteriów przy ocenie harmonogramów dostaw. Przykładowo, jeśli waga dla czasu niesprawności będzie większa od wagi dla łącznego czasu przechowywania zasobów, w trakcie selekcji faworyzowane będą elementy populacji zapewniające większą gotowość obiektów technicznych do pracy. Wagi mogą zostać także zastosowane do zmniejszenia dysproporcji pomiędzy wartościami czasów niesprawności i czasów magazynowania.

Wartość wag powinna podlegać weryfikacji i dostosowaniu do badanego zbioru obiektów technicznych i powinna zależeć od ich liczby oraz liczby typów zasobów przechowywanych w magazynie. Rozwój przedstawionego algorytmu można wykonać poprzez zastosowanie innych metod oceny harmonogramów, uwzględniających inne parametry oceny, zastosowanie innej funkcji.

## PODSUMOWANIE

Podstawowym celem stosowania opisanej metody jest utrzymanie dodatniej wartości współczynnika wzrostu sprawności technicznej w skali całej organizacji lotniczej. Optymalizacja i właściwa symulacja procesów logistycznych w oparciu o dane historyczne eksploatacji wszystkich obiektów technicznych organizacji daje możliwość osiągnięcia założonych poziomów sprawności i utrzymania ich na akceptowalnym poziomie.

Przedstawione rozwiązanie uzyskania harmonogramu dostaw części zamiennych dla zbioru złożonych obiektów technicznych może być zastosowane w różnych dziedzinach gospodarki. Zdefiniowane metody określania zasad wymian profilaktycznych oraz możliwość określenia profilu eksploatacji każdego obiektu technicznego pozwalają na opisanie zasad eksploatacji wielu urządzeń. Umożliwienie definiowania parametrów wykonywanych operacji modyfikacji i selekcji harmonogramów pozwala na modyfikację zaimplementowanego algorytmu uzyskania optymalnego harmonogramu.

Przedstawione rozwiązanie może być rozwijane poprzez definiowanie nowych metod modyfikacji harmonogramów, określenie i zaimplementowanie następnych funkcji oceny dopasowania harmonogramu oraz implementację dodatkowych warunków harmonogramu dostaw.

## BIBLIOGRAFIA

1. Praca zbiorowa pod redakcją Żurek J., Wybrane problemy sterowania zapasami, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2007.
2. Tomaszek H., Żurek J., Kaleta R. i Zieja M., Nowe elementy w probabilistycznym modelowaniu zużycia powierzchniowego i zmęczenia wybranych elementów konstrukcji lotniczych w aspekcie niezawodności i trwałości, Prace naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, nr 32, str. 179-204, Warszawa 2013.
3. Żurek J., Tomaszek H., Klimaszewski S., Zieja M., Zarys probabilistycznej metody określania trwałości zmęczeniowej wybranych elementów konstrukcji statku powietrznego dla zachowania wymaganego poziomu bezpieczeństwa lotów, Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, nr 27, str. 165-183, Warszawa 2010.
4. Kustroń K., Cieślak Ł., Wyznaczanie optymalnego czasu wymiany nieodnawialnego komponentu samolotu, Journal of KON-BiN, nr. 2, str. 45-58, Warszawa 2012.
5. Jay J., Automated JIT based materials management for lot manufacture, International Journal of Operations & Production Management, nr 16, str. 62-75, 1996.
6. Das A., Handfield R. B., Just-in-time and logistics in global sourcing: an empirical study, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, nr 27, str. 244-259, 1997.
7. Goldberg D.E., Algorytmy genetyczne i ich zastosowania, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, 2003.
8. Figalska E., Algorytmy ewolucyjne i ich zastosowania, Zeszyty naukowe, str. 81-92, 2006.

9. Wierchoń S., Algorytmy genetyczne, Sztuczne systemy immunologiczne. Teoria i zastosowania., Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2001.

## **DEVELOPING A SCHEDULE OF REPLACEMENT PART DELIVERY USING A COMPUTER SIMULATION OF AIRCRAFT FLEET OPERATION**

### *Abstract*

*This article describes the process of aircraft replacement parts delivery schedule preparation. In the described algorithm the delivery schedule is developed and evaluated using a computer simulated process of operating a set of aircraft. Besides presenting the main features of the algorithm, this publication describes in details one of the methods of schedule evaluation.*

Autorzy:

mgr inż. **Anna Bryzek** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych,  
Zakład Informatycznego Wsparcia Logistyki – anna.bryzek@itwl.pl  
mgr inż. **Janusz Niczyj** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych,  
Zakład Informatycznego Wsparcia Logistyki – janusz.nicznyj@itwl.pl