AN ECONOMIC ASPECT OF SHAPING RELIABILITY AND SAFETY OF THE 'PILOT-AIRCRAFT' SYSTEM

EKONOMICZNY ASPEKT KSZTAŁTOWANIA NIEZAWODNOŚCI I BEZPIECZEŃSTWA SYSTEMU „PILOT – STATEK POWIETRZNY”

Mariusz Zieja, Mirosław Zieja

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
Air Force Institute of Technology

mariusz.zieja@itwl.pl; miroslaw.zieja@itwl.pl

Abstract: *An economic factor is what should be given careful consideration throughout the aircraft service process. This is what significantly adds to the question of aircraft utility value. Any aircraft of even exceptionally good engineering properties may show rather poor utility value if it proves extremely expensive while in operation. If significance of economic issues throughout the process of operating military aircraft remains underestimated, it may straightforward lead to false if not disastrous solutions. Rational decisions on increasing expenditures on improvement in the operational use of military aircraft are expected to result in: substantial increase in operational readiness of aircraft, significant increase in aircraft reliability, increase in the ratio of effectiveness for the operational use of aircraft. Any increase in the above-mentioned fundamental rates of aircraft operation will provide some rise in the level of safety for the aircrew.*

Keywords: *safety, reliability, aircraft, effectiveness*

Streszczenie: *W procesie eksploatacji statków powietrznych konieczne jest uwzględnienie czynnika ekonomicznego, jako nieodzownego dopełnienia zagadnienia wartości użytkowej samolotu. Statek powietrzny o bardzo właściwościach technicznych może mieć niską wartość użytkową, jeżeli będzie zbyt kosztowny w eksploatacji. Niedocenianie znaczenia względów ekonomicznych w procesie eksploatacji wojskowych statków powietrznych może prowadzić w praktycznych warunkach do błędnych, a nieraz zgubnych w następstwach rozwiązań. Racjonalne zwiększenie nakładów na doskonalenie eksploatacji wojskowych statków powietrznych powinno wpływać na: wzrost gotowości statków powietrznych, wzrost niezawodności statków powietrznych, wzrost wskaźnika efektywności użytkowania statków powietrznych. Wzrost wyżej wymienionych podstawowych wskaźników eksploatacji statków powietrznych zapewni wzrost poziomu bezpieczeństwa załogi statku powietrznego.*

Słowa kluczowe: *bezpieczeństwo, niezawodność, statek powietrzny, skuteczność*

1. Wprowadzenie

W procesie eksploatacji wojskowych statków powietrznych konieczne jest uwzględnienie czynnika ekonomicznego jako nieodzownego dopełnienia zagadnienia wartości użytkowej samolotu. Statek powietrzny o bardzo dobrych właściwościach technicznych może mieć niską wartość użytkową, jeżeli będzie zbyt kosztowny w eksploatacji. Niedoceniając znaczenia względów ekonomicznych w procesie eksploatacji wojskowych statków powietrznych może prowadzić do błędnych rozwiązań i decyzji w obszarze zarządzania bezpieczeństwem lotów lotnictwa państwowego.

Ze względu na dużą złożoność systemu lotniczego jednoznacznie nie można określić zależności bezpieczeństwa załogi od ponoszonych nakładów finansowych na eksploatację wojskowych statków powietrznych.

2. Wpływ poniesionych kosztów eksploatacyjnych na bezpieczeństwo lotów

Celem wyznaczenia optymalnych nakładów finansowych na eksploatację statku powietrznego przy zachowaniu określonego poziomu niezawodności gwarantującego bezpieczeństwo pilota koszty eksploatacji systemu lotniczego (pilot-statek powietrzny) potraktujemy jako sumę nakładów finansowych poniesionych na utrzymanie gotowości systemu lotniczego oraz nakładów finansowych związanych z jego zawodnością. Zatem, całkowite koszty eksploatacji systemu lotniczego można wyrazić wzorem:

$$K = \frac{\Delta K}{\Delta t} = \frac{dK}{dt} = K_g + \xi, \quad (1)$$

gdzie: K_g - całkowite koszty poniesione na utrzymanie gotowości systemu lotniczego uwzględniające wykonywanie lotów w procesie szkolenia lotniczego,

t - nalot statków powietrznych,

ξ - zmienna losowa wynikająca ze specyfiki danego systemu lotniczego.

W tym przypadku można przyjąć, że:

$$\xi = \lambda \gamma, \quad (2)$$

gdzie:

λ - intensywność powstawania zdarzeń lotniczych dla systemu „pilot - statek powietrzny”,

γ - wartość szkody powstałej w zaistnieniu zdarzenia lotniczego.

Wykorzystując zależność (1) poszukuje się rozkładu kosztów jako funkcji nalotu statku powietrznego. W procesie szukania rozkładu kosztów wykorzystujemy funkcję charakterystyczną. Funkcja charakterystyczna dla rozpatrywanego procesu narastania kosztów przyjmuje następującą postać:

$$\varphi(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega K} g(K, t) dK = E[e^{i\omega K(t)}] \quad (3)$$

gdzie:

ω - parametr o wartościach rzeczywistych,
 i - jednostka urojona.

W przedziale czasu o długości Δt następuje zmiana kosztów. W związku z tym możemy przyjąć:

$$\varphi(\omega, t + \Delta t) - \varphi(\omega, t) = E[e^{i\omega K(t+\Delta t)} - e^{i\omega K(t)}] = E[e^{i\omega(K(t+\Delta t) - K(t))} - 1]e^{i\omega K(t)} \quad (4)$$

Przyjmijmy oznaczenie:

$$X = i\omega[K(t + \Delta t) - K(t)]. \quad (5)$$

Wykorzystując zależność (1) możemy napisać:

$$\frac{dK}{dt} = c + \delta.$$

Stąd,

$$\Delta K = (c + \delta)\Delta t.$$

Uwzględniając zależność (2) otrzymujemy:

$$\Delta K = (c + \lambda\gamma)\Delta t. \quad (6)$$

Wykorzystując zależność (6), to zależności (5) przyjmuje postać:

$$X = i\omega[c + \lambda\gamma]\Delta t. \quad (7)$$

Uwzględniając zależność (7) to wzór (4) przyjmuje następującą postać:

$$\varphi(\omega, t + \Delta t) - \varphi(\omega, t) = E[(e^X - 1)e^{i\omega K(t)}]. \quad (8)$$

Zależność $e^X - 1$ rozwijamy w szereg potęgowy Taylora ograniczając do drugiego wyrazu. Otrzymujemy:

$$e^X - 1 \approx X + \frac{X^2}{2} \quad (10)$$

Stąd otrzymujemy:

$$\varphi(\omega, t + \Delta t) - \varphi(\omega, t) = E[(X + \frac{X^2}{2})e^{i\omega K(t)}]. \quad (11)$$

W rzeczywistości zmienna losowa X ma pewien rozkład. Niech tym rozkładem będzie funkcja gęstości $f(X)$.

Ponieważ $X + \frac{X^2}{2}$ i $e^{i\omega K(t)}$ są niezależne zatem z własności wartości oczekiwanej otrzymujemy:

$$\varphi(\omega, t + \Delta t) - \varphi(\omega, t) = E\left[X + \frac{X^2}{2}\right]E[e^{i\omega K(t)}]. \quad (12)$$

Na mocy równania (3) otrzymujemy:

$$\varphi(\omega, t + \Delta t) - \varphi(\omega, t) = E\left[X + \frac{X^2}{2}\right]\varphi(\omega, t).$$

Ponieważ,

$$X = i\omega(c + \lambda\gamma)\Delta t,$$

zatem wartości oczekiwane przyjmują postać:

$$E\left[\frac{X}{\Delta t}\right] = i\omega \int_{X_d}^{X_g} (c + \lambda\gamma) f(X) dX,$$
$$E\left[\frac{X^2}{2\Delta t}\right] = \frac{1}{2}i^2\omega^2 \int_{X_d}^{X_g} (c + \lambda\gamma)^2 f(X) dX.$$

Oznaczając odpowiednio:

$$\int_{X_d}^{X_g} (c + \lambda\gamma) f(X) dX = c_1,$$
$$\int_{X_d}^{X_g} (c + \lambda\gamma)^2 f(X) dX = c_2.$$

Stąd, otrzymujemy równanie:

$$\frac{d\varphi(\omega, t)}{dt} = (i\omega c_1 - \frac{1}{2}\omega^2 c_2)\varphi(\omega, t). \quad (13)$$

Rozwiązaniem równania (13) jest funkcja charakterystyczna postaci:

$$\varphi(\omega, t) = e^{i\omega c_1 t - \frac{1}{2}\omega^2 c_2 t}. \quad (14)$$

Funkcja charakterystyczna postaci (14) jest funkcją charakterystyczną dla rozkładu normalnego. Ostatecznie otrzymujemy następującą funkcję gęstości dla kosztów eksploatacji statków powietrznych:

$$g(K, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi c_2 t}} e^{\frac{-(K - c_1 t)^2}{2c_2 t}}. \quad (15)$$

Stąd, wartość średnia kosztów eksploatacji statków powietrznych przyjmuje postać:

$$E[K(t)] = \int_0^{\infty} Kg(K, t) dK, \quad (16)$$

$$E[K]_t = c_1 t. \quad (17)$$

Gdzie:

$$c_1 = \int_{X_d}^{X^g} (c + \lambda\gamma) f(X) dX = (c + \lambda\gamma) \int_{X_d}^{X^g} f(X) dx. \quad (18)$$

Ponieważ,

$$\int_{X_d}^{X^g} f(x) dx = 1, \quad (19)$$

to wartość oczekiwana przyjmuje następującą postać:

$$E[K]_t = ct + \lambda\gamma t. \quad (20)$$

Drugi składnik kosztów tj. $\lambda\gamma t$ zależy od poziomu bezpieczeństwa lotów. Jeżeli w procesie szkolenia lotniczego będzie rzadziej dochodziło do zdarzeń lotniczych, to koszty eksploatacji statków powietrznych będą osiągały mniejsze wartości. Po przekształceniu zależności (20) otrzymujemy:

$$\lambda = \frac{E[K]_t - ct}{\gamma t} \quad (21)$$

Na podstawie zależności (21) można oceniać wpływ poniesionych eksploatacyjnych na poziom bezpieczeństwa lotów.

3. Wpływ kosztów eksploatacyjnych na bezpieczeństwo lotów z uwzględnieniem działań profilaktycznych

Na podstawie zaistniałych zdarzeń lotniczych oraz analizy procesu eksploatacji wojskowych statków powietrznych wdrażane są przedsięwzięcia profilaktyczne mające na celu poprawę bezpieczeństwa lotów. Dla procesu eksploatacji wojskowych statków powietrznych z uwzględnieniem zastosowanej profilaktyki wzór (1) można zapisać w następującej postaci [4]:

$$\frac{dK}{dt} = \bar{c} + \gamma \frac{\lambda}{1 + \beta t}, \quad (22)$$

gdzie

- $\bar{c}$ - całkowite koszty poniesione na utrzymanie gotowości systemu lotniczego uwzględniające wykonywanie lotów w procesie szkolenia lotniczego oraz wdrożenie przedsięwzięć profilaktycznych,
 γ - średnie koszty spowodowane zaistnieniem zdarzenia lotniczego,
 $\frac{\lambda}{1 + \beta t}$ - intensywność powstawania zdarzeń lotniczych z uwzględnieniem zastosowanej profilaktyki w funkcji nalotu statków powietrznych,
 β - współczynnik skuteczności zastosowanej profilaktyki,
 t - nalot statków powietrznych.

Z zależności (22) można określić przyrost kosztów eksploatacji w przedziale czasu o długości Δt . Wzór przyjmuje następującą postać:

$$\Delta \bar{K} = (\bar{c} + \lambda \frac{\lambda}{1 + \beta t}) \Delta t. \quad (23)$$

Wykorzystując funkcję charakterystyczną dla opisu przyrostu kosztów eksploatacji w przedziale czasu o długości Δt otrzymujemy:

$$\varphi(\omega, t + \Delta t) - \varphi(\omega, t) = E[e^{i\omega \bar{K}(t + \Delta t)} - e^{i\omega \bar{K}(t)}] = E[e^{i\omega(\bar{K}(t + \Delta t) - \bar{K}(t))} - 1]e^{i\omega \bar{K}(t)} \quad (24)$$

Oznaczamy:

$$\bar{X} = i\omega[\bar{K}(t + \Delta t) - \bar{K}(t)].$$

Stąd,

$$\begin{aligned} \Delta \bar{K} &= \bar{K}(t + \Delta t) - \bar{K}(t), \\ \bar{X} &= i\omega(\bar{c} + \gamma \frac{\lambda}{1 + \beta t}) \Delta t. \end{aligned} \quad (25)$$

Uwzględniając (25) to wzór (24) można przedstawić w następującej postaci:

$$\varphi(\omega, t + \Delta t) - \varphi(\omega, t) = E[(e^{\bar{X}} - 1)e^{i\omega \bar{K}(t)}]. \quad (26)$$

Stosując podobne przekształcenia jak w zależnościach (9) do (12) otrzymujemy następującą zależność:

$$\frac{\varphi(\omega, t + \Delta t) - \varphi(\omega, t)}{\Delta t} = E[\frac{\bar{X}}{\Delta t} + \frac{\bar{X}^2}{2\Delta t}] \varphi(\omega, t)$$

Ponieważ,

$$\bar{X} = i\omega(\bar{c} + \gamma \frac{\lambda}{1 + \beta t})\Delta t$$

to wartości oczekiwane przyjmują następującą postać:

$$E[\frac{\bar{X}}{\Delta t}] = i\omega \int_{\bar{X}_d}^{\bar{X}^g} (c + \lambda\gamma) f(\bar{X}) d\bar{X},$$

$$E[\frac{\bar{X}^2}{2\Delta t}] = \frac{1}{2} i^2 \omega^2 \int_{\bar{X}_d}^{\bar{X}^g} (c + \lambda\gamma)^2 f(\bar{X}) d\bar{X}.$$

Oznaczając odpowiednio:

$$\int_{\bar{X}_d}^{\bar{X}^g} (\bar{c} + \gamma \frac{\lambda}{1 + \beta t}) f(\bar{X}) d\bar{X} = \bar{c}_1,$$

$$\int_{\bar{X}_d}^{\bar{X}^g} (\bar{c} + \gamma \frac{\lambda}{1 + \beta t})^2 f(\bar{X}) d\bar{X} = \bar{c}_2.$$

Stąd, otrzymujemy równanie:

$$\frac{d\varphi(\omega, t)}{dt} = (i\omega\bar{c}_1(t) - \frac{1}{2}\omega^2\bar{c}_2(t))\varphi(\omega, t). \quad (27)$$

Rozwiązaniem równania (27) jest funkcja charakterystyczna postaci:

$$\varphi(\omega, t) = e^{i\omega\bar{c}_1(t) - \frac{1}{2}\omega^2\bar{c}_2(t)}. \quad (28)$$

Funkcja charakterystyczna postaci (28) jest funkcją charakterystyczną dla rozkładu normalnego. Ostatecznie otrzymujemy następującą funkcję gęstości dla kosztów eksploatacji statków powietrznych:

$$g(\bar{K}, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \int_0^t c_2(t) dt}} e^{\frac{-(\bar{K} - \int_0^t c_1(t) dt)^2}{2 \int_0^t c_2(t) dt}}. \quad (29)$$

Zatem ,wartość średnia kosztów eksploatacji statków powietrznych z uwzględnieniem stosowanej profilaktyki będzie dana wzorem:

$$\hat{E}[\bar{K}]_t = \int_0^t \bar{c}_1(t) dt. \quad (30)$$

Ponieważ,

$$\int_0^t \bar{c}_1(t) dt = \bar{c} + \lambda \gamma \int_0^t \frac{1}{1 + \beta t} dt = \bar{c} + \frac{\lambda \gamma}{\beta} \ln(1 + \beta t) \quad (31)$$

to wartość oczekiwana przyjmuje następującą postać:

$$\hat{E}[\bar{K}]_t = \bar{c} + \frac{\lambda \gamma}{\beta} \ln(1 + \beta t) \quad (32)$$

Zatem intensywność powstawania zdarzeń lotniczych z uwzględnieniem zastosowanej profilaktyki można oszacować na podstawie następującej zależności:

$$\lambda = \frac{[\hat{E}[\bar{K}]_t - \bar{c}] \beta}{\gamma \ln(1 + \beta t)} \quad (33)$$

4. Podsumowanie

Dla przedstawionej w artykule metody zysk z udoskonalenia procesu eksploatacji wojskowych statków powietrznych (wdrożenia przedsięwzięć profilaktycznych) dla nalotu równego t będzie wynosił:

$$E[z] = E[K]_t - \hat{E}[\bar{K}]_t. \quad (34)$$

Zatem,

$$E[z] = ct + \lambda \gamma t - (\bar{c} + \frac{\lambda \gamma}{\beta} \ln(1 + \beta t)) \quad (35)$$

Zatem, jeżeli

$$E[z] > 0,$$

to zastosowane działania profilaktyczne, okazały się skuteczne. Średnie koszty eksploatacji statków powietrznych zmniejszyły się o wartość $E[z]$.

Przedstawiona w artykule metoda uzależnia całkowite koszty eksploatacji systemu lotniczego (pilot-statek powietrzny) od jego niezawodności poprzez zmienną losową ξ .

Koszty eksploatacji wojskowych statków powietrznych zostały przedstawione na rys. 1, gdzie:

- Q - prawdopodobieństwo zaistnienia zdarzenia lotniczego,
- $E[\xi]$ - wartość oczekiwana kosztów zależnych od zaistniałych zdarzeń lotniczych,
- $E[K_g]$ - wartość oczekiwana całkowitych kosztów poniesionych na utrzymanie gotowości systemu lotniczego uwzględniających wykonywanie lotów w procesie szkolenia lotniczego,
- $E[K]$ - wartość oczekiwana całkowitych kosztów eksploatacji wojskowych statków powietrznych,

Rys. 1 Koszty związane z niezawodnością systemu lotniczego

5. Bibliografia

- [1] DeLurgio S.A.: Forecasting principles and applications. University of Missouri-Kansas City. Irwin/McGraw-Hill, 1998.
- [2] Tomaszek, H., Wróblewski, M.: The essentials of assessing the air armament systems' operational effectiveness. Warszawa: Dom Wydawniczy-Bellona 2001.
- [3] Tomaszek, H., Żurek, J., Jasztal, M.: Prognozowanie uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu lotów statków powietrznych. Radom: NITE 2008.
- [4] Zieja M., Zieja M.: Metoda oceny bezpieczeństwa lotów z wykorzystaniem danych z procesu eksploatacji. Materiały XXXIX Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 2011.

Maj. Mariusz Zieja PhD, Eng. graduated from Military University of Technology in 2000 (M.Sc. Eng. in Mechatronics with specialization in Aircraft Avionics). In 2008 he achieved PhD in Mechanical Engineering. He is engaged in development and implementation of IT systems to support aircraft maintenance, safety and reliability management. Since 2002 he has been working for Air Force Institute of Technology.

Miroslaw Zieja PhD, graduated from University of Lodz in 2004 (M.Sc. in Mathematics with specialization in Informatics). In 2009 achieved PhD in Mechanical Engineering. Since 2004 he has been working as an IT specialist for Air Force Institute of Technology. At present he is engaged in development and implementation of IT systems to support aircraft maintenance, safety and reliability management.