Mariusz ZIEJA, Mirosław ZIEJA
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa

METODA OCENY BEZPIECZEŃSTWA LOTÓW Z WYKORZYSTANIEM DANYCH Z PROCESU EKSPLOATACJI

Słowa kluczowe

Bezpieczeństwo lotów, niezawodność, proces Poissona, równanie Fokkera-Plancka.

Streszczenie

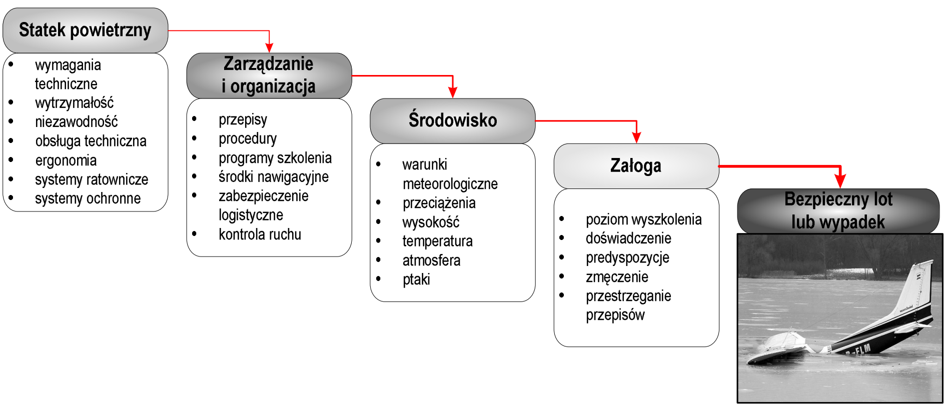
W związku z wdrożeniem do eksploatacji w lotnictwie Sił Zbrojnych RP systemu informatycznego TURAWA obecnie niezwykle ważnym problemem jest konieczność kompleksowego wykorzystania gromadzonych danych. W artykule przedstawiono metodę oceny bezpieczeństwa lotów z wykorzystaniem danych z procesu eksploatacji wojskowych statków powietrznych, gromadzonych przez system TURAWA. Opracowana metoda pozwala:

- ocenić poziom bezpieczeństwa systemu lotniczego,
- wyznaczyć intensywność powstawania zawodności systemu lotniczego,
- prognozować stan bezpieczeństwa systemu lotniczego w procesie eksploatacji statków powietrznych,
- wyznaczyć bezpośrednie przyczyny obniżenia poziomu bezpieczeństwa systemu lotniczego,
- ocenić skuteczność wdrożonych przedsięwzięć profilaktycznych,
- ocenić stan bezpieczeństwa systemu lotniczego w czasie rzeczywistym.

Wprowadzenie

Na podstawie systemowego ujęcia problemu bezpieczeństwa lotów w postaci łańcucha (rys. 1) można stwierdzić, że bezpieczeństwo lotów uwarunkowane jest następującymi czynnikami:

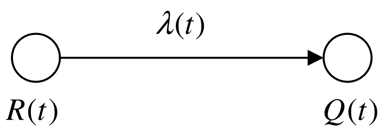
- stanem niezawodnościowym statku powietrznego (uszkodzeniami poszczególnych elementów funkcjonalnych zespołów, instalacji i urządzeń statku powietrznego),
- stanem niezawodnościowym pilota (błędami popełnianymi przez załogę),
- stanem niezawodnościowym urządzeń naziemnych ubezpieczających lot statku powietrznego,
- stanem niezawodnościowym personelu obsługującego urządzenia naziemne ubezpieczające lot statku powietrznego (błędami popełnianymi przez nawigatorów, kontrolerów ruchu lotniczego itp.),
- oddziaływaniem niesprzyjających warunków otoczenia: warunków klimatycznych (temperatura, burzliwość atmosfery itp.) i przyrodniczych (stan lotniska, zwierzęta, wyładowania atmosferyczne i inne).



Rys. 1. Łańcuch bezpieczeństwa

1. Ocena poziomu bezpieczeństwa systemu lotniczego

Główną ideę oceny bezpieczeństwa systemu lotniczego przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Graf identyfikujący poziom bezpieczeństwa systemu lotniczego

gdzie:

$R(t)$ – bezpieczeństwo systemu lotniczego (prawdopodobieństwo niewystąpienia wypadku lotniczego),

$Q(t)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku lotniczego,

$\lambda(t)$ – intensywność przejścia systemu lotniczego ze stanu bezpieczeństwa w stan zawodności systemu lotniczego.

Wykorzystując przyjęte oznaczenia, bezpieczeństwo systemu lotniczego można opisać równaniem

$$R(t) = 1 - Q(t).$$

Po prostych przekształceniach otrzymujemy układ jednorodnych równań liniowych różniczkowych

$$\begin{aligned} R'(t) &= -R(t)\lambda(t) \\ Q'(t) &= \lambda(t)R(t) \end{aligned} \tag{1.1}$$

Rozwiązanie układu równań różniczkowych (1.1) dla warunków początkowych $R(0) = 1$, $Q(0) = 0$ można przedstawić w postaci [4]:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \tag{1.2}$$

$$Q(t) = \int_0^t \lambda(t)R(t)dt \tag{1.3}$$

2. Wyznaczenie intensywności powstawania zawodności systemu lotniczego

W procesie eksploatacji statków powietrznych powstanie sytuacji zagrażającej życiu pilota jest zdarzeniem rzadkim. Zatem ilościowy opis zawodności systemu lotniczego wymaga przyjęcia pewnych założeń. Prawdopodobieństwo powstania zdarzenia lotniczego w pewnym przedziale czasu jest wprost proporcjonalne do analizowanego przedziału czasu oraz liczby eksploatowanych statków powietrznych, dla których może zaistnieć zdarzenie. Na podstawie powyższego stwierdzenia można napisać:

$$P_1(t, t + \Delta t) = \lambda N(t)\Delta t + 0(\Delta t) \tag{2.1}$$

gdzie:

$P_1(t,t+\Delta t)$	–	prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia lotniczego zagrażającego życiu pilota w przedziale czasu Δt;
$N(t)$	–	liczba eksploatowanych statków powietrznych, w których może zaistnieć rozważane zdarzenie lotnicze;
λ	–	intensywność powstawania zdarzeń zagrażających życiu pilota w systemie lotniczym;
Δt	–	przyjęty przedział czasu eksploatacji statków powietrznych (lub wielkość nalotu statku powietrznego).

Następnie do opisu powstawania zdarzeń lotniczych w procesie eksploatacji statków powietrznych można wykorzystać postulaty Poissona.

Niech $P_n(t)$ oznacza prawdopodobieństwo, że w przedziale czasu (0, t) wystąpiło n zdarzeń lotniczych. Korzystając z postulatów procesu Poissona, można napisać następujący układ równań:

$$P_0(t+\Delta t) = P_0(t)(1-\lambda N(t)\Delta t) \tag{2.2}$$
$$P_n(t+\Delta t) = P_n(t)(1-\lambda N(t)\Delta t) + P_{n-1}(t)\lambda N(t)\Delta t \quad \text{dla} \quad n>0$$

Zatem na mocy definicji pochodnej otrzymano:

$$P_0^{'}(t) = -\lambda N(t)P_0(t) \tag{2.3}$$
$$P_n^{'}(t) = -\lambda N(t)P_n(t) + \lambda N(t)P_{n-1}(t)$$

Rozwiązanie układu równań (2.3) przyjmuje postać:

$$\begin{cases} P_0(t) = e^{-\lambda\int_0^t N(t)dt} \\ \vdots \\ P_n(t) = \dfrac{1}{n!}\left[\lambda\int_0^t N(t)dt\right]^n e^{-\lambda\int_0^t N(t)dt} \end{cases}$$

Zatem dla pojedynczego egzemplarza statku powietrznego prawdopodobieństwo powstania uszkodzenia systemu lotniczego będzie wynosiło:

$$q = 1 - e^{-\lambda t} \tag{2.4}$$

gdzie:

q – prawdopodobieństwo powstania awarii w systemie lotniczym;
t – nalot statku powietrznego w ciągu wykonywania zadania.

Ponieważ λ dla uszkodzenia tego typu jest małe, to $e^{-\lambda t}$ można rozwinąć w szereg Taylora. Stąd otrzymano:

$$q \cong \lambda \hat{t} \tag{2.5}$$

gdzie: $\hat{t}$ – czas trwania jednego lotu.

Do wyznaczenia estymatora parametru λ zastosowano metodę największej wiarygodności. Stąd:

$$\hat{\lambda} = \frac{n_1 + n_2 + ... + n_i}{T_1 + T_2 + ... + T_i} \tag{2.6}$$

Estymatorem $\hat{\lambda}$ nieznanej intensywności powstawania zdarzeń lotniczych λ jest średnia liczba wzajemnie niezależnych zdarzeń lotniczych przypadająca na jednostkę pracy badanych elementów systemu lotniczego. Reasumując, wzór na wartość oczekiwaną zdarzeń lotniczych przyjmuje postać:

$$E_t[n] = \lambda \cdot t \tag{2.7}$$

gdzie:

λ – jest szacowane na podstawie zależności (2.6),
t – nalot zrealizowany przez system lotniczy.

3. Prognozowanie stanu bezpieczeństwa systemu lotniczego w procesie eksploatacji statków powietrznych

W celu zmniejszenia liczby zdarzeń lotniczych zaistniałych w procesie eksploatacji statków powietrznych wdraża się odpowiednie przedsięwzięcia profilaktyczne. Proces występowania zdarzeń lotniczych podczas eksploatacji statków powietrznych jest procesem losowym. Jednak można stwierdzić, iż intensywność powstania zdarzeń lotniczych jest proporcjonalna do wskaźnika wypadkowości w systemie lotniczym oraz odwrotnie proporcjonalna do wskaźnika skuteczności stosowanej profilaktyki. Zatem intensywność pojawienia się zdarzenia lotniczego przyjmuje postać:

$$\gamma(t_N) = \frac{\lambda}{1 + \beta t} \tag{3.1}$$

gdzie:

t – planowany nalot dla badanego personelu lotniczego,

λ – wskaźnik wypadkowości w systemie lotniczym, intensywność powstawania zdarzeń w systemie lotniczym,

β – wskaźnik skuteczności zastosowanej profilaktyki.

Ponadto prawdopodobieństwo wzrostu liczby zdarzeń lotniczych w przedziale nalotu Δt spełnia następującą zależność:

$$\gamma(t)\Delta t \leq 1 \tag{3.2}$$

Mając określoną funkcję intensywności powstawania zdarzeń lotniczych (uszkodzenia systemu lotniczego), można prognozować bezpieczeństwo systemu lotniczego z użyciem równań różnicowych. Zatem w pierwszej kolejności należy opisać dynamikę narastania liczby zdarzeń lotniczych. Niech $U_{k,t+\Delta t}$ oznacza prawdopodobieństwo powstania k zdarzeń lotniczych do chwili t w procesie eksploatacji statków powietrznych.

Zatem dynamikę narastania zdarzeń lotniczych można opisać następującym równaniem:

$$U_{k,t+\Delta t} = (1-\gamma(t)\Delta t)U_{k,t} + \gamma(t)\Delta t U_{k-1,t} \tag{3.3}$$

gdzie:

k – liczba zdarzeń lotniczych do chwili t,

$\gamma(t)$ – funkcja intensywności wypadków lotniczych, równanie (3.1).

Równanie (3.3) w zapisie funkcyjnym przyjmuje następującą postać:

$$U(k,t+\Delta t) = (1-\gamma(t)\Delta t)U_{(k,t)} + \gamma(t)\Delta t U(k-1,t) \tag{3.4}$$

Otrzymane równanie różnicowe (3.4) przekształcono w równanie różniczkowe cząstkowe. Z równania (3.4) po zastosowaniu wzoru Taylora dla $n=2$ oraz $n=1$ otrzymano równanie różniczkowe cząstkowe. Zarys przekształcenia równania (3.4) w równanie różniczkowe cząstkowe przedstawia się następująco. Przyjęto następujące przybliżenia[3]:

$$u(k-1,t) = u(k,t) - \frac{\partial u(k,t)}{\partial k}1 + \frac{\partial^2 u(k,t)}{2\partial k^2}1^2 \tag{3.5}$$

$$u(k,t+\Delta t)=u(k,t)+\frac{\partial u(k,t)}{\partial t}\Delta t.$$

Podstawiając zależności (3.5) do równania (3.4), otrzymano:

$$u(k,t)+\frac{\partial u(k,t)}{\partial t}\Delta t=(1-\gamma(t)\Delta t)u(k,t)+\gamma(t)\Delta t(u(k,t)-\frac{\partial u(k,t)}{\partial k}+\frac{\partial^2 u(k,t)}{2\partial k^2}$$

Stąd

$$\frac{\partial u(k,t)}{\partial t}=-\gamma(t)\frac{\partial u(k,t)}{\partial k}+\frac{1}{2}\gamma(t)\frac{\partial^2 u(k,t)}{\partial k^2} \tag{3.6}$$

Dla przedstawienia rozwiązania równania (3.6) skorzystano z rozwiązania równania Fokkera-Plancka następującej postaci [3]:

$$\frac{\partial \overline{u}(k,t)}{\partial t}=-b\frac{\overline{u}(k,t)}{\partial k}+\frac{1}{2}a\frac{\partial^2 \overline{u}(k,t)}{\partial k^2} \tag{3.7}$$

Szukano rozwiązania szczególnego równania (3.7) takiego, które przy $t\to 0$ jest zbieżne do tzw. funkcji Diraca, tj. $\overline{u}(k,t)\to 0$ dla $k\neq 0$ i $\overline{u}(k,t)\to +\infty$, ale w ten sposób, że całka funkcji $\overline{u}(k,t)$ jest równa jedności dla $t>0$.

Dla wyżej podanego warunku, rozwiązanie równania (3.7) przyjmuje następującą postać [5]:

$$\overline{u}(k,t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi at}}e^{-\frac{(k-bt)^2}{2at}} \tag{3.8}$$

Ponieważ rozwiązaniem równania (3.7) jest funkcja (3.8), to rozwiązanie równania (3.6) można przedstawić w następującej postaci:

$$u(k,t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi A(t)}}e^{-\frac{(k-B(t))^2}{2A(t)}} \tag{3.9}$$

gdzie:

$B(t)$ – wartość oczekiwana zdarzeń lotniczych,

$A(t)$ – wariancja,

$\sqrt{A(t)}$ – średnie odchylenie standardowe.

Zatem:

$$B(t)=\int_0^t \gamma(t)dt=\lambda\int_0^t \frac{dt}{1+\beta t}=\lambda(\frac{1}{\beta}\ln(1+\beta t)),$$

$$B(t)=\frac{\lambda}{\beta}\ln(1+\beta t) \quad \text{dla} \quad \beta\neq 0,$$

$$A(t)=B(t).$$

Funkcja (3.9) posiada cechy funkcji gęstości, gdyż:

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_0^{\infty} u(k,t)dkdt=1$$

Reasumując, wzór na wartość oczekiwaną zdarzeń lotniczych z uwzględnieniem zastosowanej profilaktyki przyjmuje następującą postać:

$$E_t[n]=B(t)=\frac{\lambda}{\beta}\ln(1+\beta t) \tag{3.10}$$

Podsumowanie

W przedstawionej metodzie oceny bezpieczeństwa systemu lotniczego wyznaczono:

- oszacowanie funkcji intensywności powstawania zdarzeń lotniczych

$$\hat{\lambda}=\frac{n_1+n_2+...+n_i}{T_1+T_2+...+T_i} \tag{2.6}$$

- równanie typu Fokkera-Plancka opisujące dynamikę narastania zdarzeń lotniczych

$$\frac{\partial u(k,t)}{\partial t}=-\gamma(t)\frac{\partial u(k,t)}{\partial k}+\frac{1}{2}\gamma(t)\frac{\partial^2 u(k,t)}{\partial k^2} \tag{3.6}$$

- wskaźnik wartości oczekiwanej zdarzeń lotniczych bez uwzględnienia działań profilaktycznych

$$E_t[n]=\lambda\cdot t \tag{2.7}$$

- wskaźnik wartości oczekiwanej zdarzeń lotniczych z uwzględnieniem działań profilaktycznych

$$E_t[n] = B(t) = \frac{\lambda}{\beta}\ln(1+\beta t) \tag{3.10}$$

Odpowiednie zaadaptowanie przedstawionej metody do systemu informatycznego TURAWA umożliwi:

- ilościową ocenę poziomu bezpieczeństwa lotów w procesie eksploatacji statków powietrznych,
- weryfikację przedsięwzięć szkoleniowych, organizacyjnych i eksploatacyjnych ukierunkowanych na utrzymanie wymaganego poziomu bezpieczeństwa lotów,
- wspomaganie procesów decyzyjnych w dziedzinie bezpieczeństwa lotów.

Bibliografia

1. DeLurgio S.A.: Forecasting principles and applications. University of Missouri-Kansas City. Irwin/McGraw-Hill, 1998.
2. Jaźwiński J., Żurek J., Smalko Z.: Wybrane problemy prognozowania stanów niezawodnościowych obiektów technicznych. Materiały XXXI Zimowej Szkoły Niezawodności, Szczyrk 2003.
3. Tomaszek H., Wróblewski M.: The essentials of assessing the air armament systems' operational effectiveness. Warszawa: Dom Wydawniczy-Bellona 2001.
4. Tomaszek H., Żurek J., Jasztal M.: Prognozowanie uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu lotów statków powietrznych. Radom: NITE 2008.
5. Zieja M., Żurek J.: Prognozowanie trwałości wybranych urządzeń osprzętu lotniczego w aspekcie procesów starzenia. ITWL, Warszawa 2008.
6. Żurek J., Tomaszek H.: Zarys metody oceny niezawodności statku powietrznego z uwzględnieniem uszkodzeń sygnalizowanych i katastroficznych (nagłych). Materiały XXXIII Zimowej Szkoły Niezawodności, Szczyrk 2005.

Recenzent:
Marek MALARSKI

A method of flight safety assessment using operational data

Key words

Flight safety, reliability, Poisson process, Fokker-Planck equation.

Summary

The paper has been written in connection with the TURAWA system implementation in the aviation of Armed Forces of the Polish Republic. At present, the necessity of complex analyses of gathered data is the most important problem. In the paper, a method of flight safety assessment using operational data gathered in the TURAWA system has been presented. The developed method allows to

- assess a flight safety level,
- determine reasons for flight safety decrease,
- forecast a flight safety level in aircraft operation, and
- assess effectiveness of preventive measures.