

**Józef ŻUREK**

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa

## **WYBRANE METODY OCENY BEZPIECZEŃSTWA W LOTNICTWIE**

### **Słowa kluczowe**

Bezpieczeństwo, transport lotniczy, ryzyko zagrożeń.

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono wybrane metody oceny zagrożeń bezpieczeństwa w transporcie lotniczym. Identyfikacja i analiza zagrożeń jest aktywną metodą zarządzania bezpieczeństwem w transporcie lotniczym. Ocena bezpieczeństwa lotów prowadzi się według kryteriów statystycznych, probabilistycznych oraz sztucznych sieci neuronowych. W zależności od przyjętego kryterium określa się metody i wskaźniki bezpieczeństwa lotów, umożliwiające ocenę stanu bezpieczeństwa w systemie transportowym.

Ocena stanu bezpieczeństwa i możliwość analizy ze względu na przyczyny zagrożeń umożliwia doskonalenie strategii zarządzania bezpieczeństwem eksploatacji statków powietrznych, organizacji lotów oraz udoskonalenie programów szkolenia lotniczego.

### **Wprowadzenie**

Bezpieczeństwo w transporcie lotniczym rozumiemy jako właściwość systemu, umożliwiającego działanie w danych warunkach środowiskowych, bez wypadków i niepożądanych zdarzeń.

Badania stanu bezpieczeństwa systemów najogólniej można sprowadzić do analizy czynników takich jak:

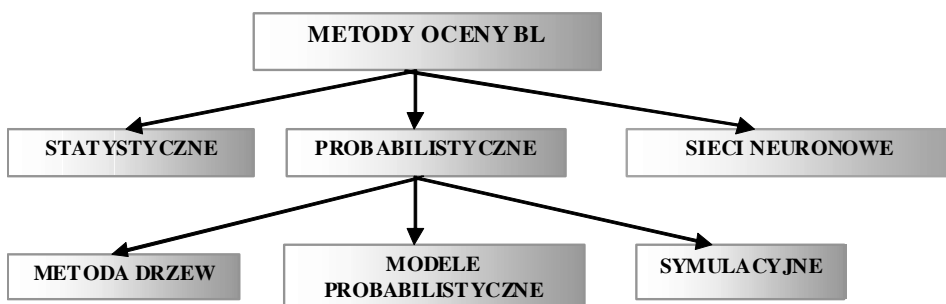
- ryzyko zagrożeń bezpieczeństwa powstałe w systemie transportowym i jego otoczeniu;
- możliwość przeciwdziałania występującym zagrożeniom i ich skutkom przez system transportowy oraz przez zewnętrzne systemy ratownicze;
- wzajemne relacje występujące między zagrożeniem bezpieczeństwa a skutecznością przeciwdziałania i skutecznością łagodzenia skutków zaistniałych zdarzeń.

Lotniczy system transportowy, będący przedmiotem analizy, z punktu widzenia bezpieczeństwa zawiera podsystemy takie jak: obiekt techniczny, załoga lub operator, ośrodek kierowania lub zabezpieczenia działań.

Każdy z wymienionych podsystemów jest generatorem zagrożeń, których przyczyną mogą być: zakłócenia zewnętrzne (np. klimatyczno-przyrodnicze) i zakłócenia wewnętrzne pochodzące od właściwości organizacyjnych, funkcjonalnych, „czynnika ludzkiego” oraz destrukcji zużyciowo-starzeniowej techniki, a także innych niedoskonałości systemu. Identyfikacja i analiza zagrożeń oraz ocena powiązanego ryzyka jest aktywną metodą zarządzania bezpieczeństwem w transporcie lotniczym. Zagrożenia, które zostały zidentyfikowane w trakcie gromadzenia danych, są wykorzystywane do oceny ryzyka zagrożeń bezpieczeństwa.

## 1. Metody oceny bezpieczeństwa lotów (BL)

Ocenę bezpieczeństwa lotów prowadzi się według kryteriów statystycznych, probabilistycznych oraz sztucznych sieci neuronowych. W zależności od przyjętego kryterium określa się metody i wskaźniki bezpieczeństwa lotów, umożliwiające ocenę jego stanu.



Rys.1. Klasyfikacja metod oceny bezpieczeństwa lotów

## 2. Oceny statystyczne

W procesie oceny statystycznej określa się wskaźniki czasowe, bezwzględne lub względne reprezentujące wybrane zdarzenia.

Podstawowymi wskaźnikami bezpieczeństwa lotów, zalecanymi przez Międzynarodową Organizację Lotnictwa Cywilnego (International Civil Aircraft Organisation – ICAO) są wskaźniki ( $K_T$ ); ( $K_L$ ); charakteryzujące liczbę  $n_k$  wypadków lotniczych przypadającą na 100 000 godzin lotu albo na 100 mln km lotu [1]:

$$K_T = \frac{n_k}{T} 10^5; \quad K_N = \frac{n_k}{N} 10^5; \quad K_L = \frac{n_k}{L} 10^8;$$

albo stosunek liczby śmiertelnych ofiar  $K_l$  katastrof lotniczych przypadającą na 1 mln przewiezionych pasażerów lub na 100 mln pasażerokilometrów [1]:

$$K_{l_1} = \frac{l_{pas}}{A_{pas}} 10^6; \quad K_{l_2} = \frac{l_{pas}}{A_{pas-km}} 10^8;$$

- gdzie: T – sumaryczny nalot w godzinach lotu statków powietrznych (SP) w rozpatrywanym okresie;  
 N – sumaryczna liczba lotów statków powietrznych (SP) w rozpatrywanym okresie;  
 L – nalot (w kilometrach) w analizowanym okresie;  
 $l_{pas}$  – liczba ofiar śmiertelnych w rozpatrywanym okresie;  
 $A_{pas}$  – liczba pasażerów przewiezionych w tym okresie;  
 $A_{pas-km}$  – liczba pasażero-kilometrów w tym okresie.

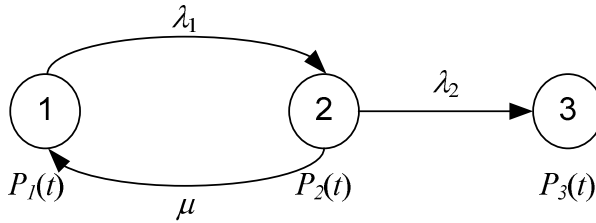
W państwach, członkach ICAO wykorzystuje się również wskaźniki cząstkowe charakteryzujące poszczególne fazy lotu (np.: start, lądowanie, inne).

## 3. Modele probabilistyczne

Modele probabilistyczne stosuje się do oceny bezpieczeństwa lotu z uwzględnieniem zagrożeń (uszkodzeń SP lub innych zakłóceń w przestrzeni powietrznej) oraz użycia systemów nadmiarowych w celu uniknięcia wypadku lotniczego. W ujęciu probabilistycznym do analizy wykorzystuje się często procesy Markowa.

Lot statku powietrznego został sprowadzony do trzech stanów, którym przypisujemy odpowiednio prawdopodobieństw przebywania w tych stanach rys. 2, gdzie:

- $P_1(t)$  – prawdopodobieństwo lotu w niezakłóconego (stan zdatności statku);  
 $P_2(t)$  – prawdopodobieństwo lotu zakłóconego z możliwością użycia systemów nadmiarowych (ratowniczych);  
 $P_3(t)$  – prawdopodobieństwo awarii lub wypadku lotniczego;  
 $\lambda; \mu$  – intensywności przejścia między stanami.



Rys. 2. Trzystanowy model lotu statku powietrznego

Dla tak określonego modelu lotu można ułożyć następujący układ równań różniczkowych Kołmogorowa:

$$\begin{cases} P_1'(t) = -\lambda_1 P_1(t) + \mu P_2(t) \\ P_2'(t) = \lambda_1 P_1(t) - (\mu + \lambda_2) P_2(t) \\ P_3'(t) = \lambda_2 P_2(t) \end{cases}$$

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymaliśmy:

$$\begin{cases} P_1(t) = \frac{r_1 + \lambda_1}{r_1 - r_2} e^{r_2 t} - \frac{r_2 + \lambda_1}{r_1 - r_2} e^{r_1 t} \\ P_2(t) = \frac{(r_1 + \lambda_1)(r_2 + \lambda_1)}{\mu(r_1 - r_2)} [e^{r_2 t} - e^{r_1 t}] \\ P_3(t) = \frac{\lambda_2(r_1 + \lambda_1)(r_2 + \lambda_1)}{\mu(r_1 - r_2)} \left[ \frac{1}{r_2} e^{r_2 t} - \frac{1}{r_1} e^{r_1 t} \right] - \frac{\lambda_2}{\mu r_1 r_2} (r_2 + \lambda_1)(r_1 + \lambda_1) \end{cases}$$

gdzie:

$$r_1 = \frac{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu) - \sqrt{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 + 2\mu(\lambda_1 + \lambda_2) + \mu^2}}{2}$$

$$r_2 = \frac{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu) + \sqrt{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 + 2\mu(\lambda_1 + \lambda_2) + \mu^2}}{2}$$

Przedstawione rozwiązanie spełnia warunki początkowe, suma wyznaczonych prawdopodobieństw jest równa jedności. Pozostało sprawdzić, jaki jest przebieg wyznaczonych funkcji dla dużych  $t$  ( $t \rightarrow \infty$ ).

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_1(t) = \frac{r_1 + \lambda_1}{r_1 - r_2} \lim_{t \rightarrow \infty} e^{r_2 t} - \frac{r_2 + \lambda_1}{r_1 - r_2} \lim_{t \rightarrow \infty} e^{r_1 t}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_2(t) = \frac{(r_1 + \lambda_1)(r_2 + \lambda_1)}{\mu(r_1 - r_2)} \left[ \lim_{t \rightarrow \infty} e^{r_2 t} - \lim_{t \rightarrow \infty} e^{r_1 t} \right]$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_3(t) = \frac{\lambda_2(r_1 + \lambda_1)(r_2 + \lambda_1)}{\mu(r_1 - r_2)} \left[ \frac{1}{r_2} \lim_{t \rightarrow \infty} e^{r_2 t} - \frac{1}{r_1} \lim_{t \rightarrow \infty} e^{r_1 t} \right] - \frac{\lambda_2}{\mu r_1 r_2} (r_2 + \lambda_1)(r_1 + \lambda_1)$$

Ponieważ:

$$r_1 = -\frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu) + \sqrt{(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu)^2 - 4\lambda_1\lambda_2}}{2} < 0$$

$$r_2 = -\frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu) - \sqrt{(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu)^2 - 4\lambda_1\lambda_2}}{2} < 0$$

Więc

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{r_1 t} = \lim_{t \rightarrow \infty} e^{\frac{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu) - \sqrt{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 + 2\mu(\lambda_1 + \lambda_2) + \mu^2}}{2} t} = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{r_2 t} = \lim_{t \rightarrow \infty} e^{\frac{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu) + \sqrt{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 + 2\mu(\lambda_1 + \lambda_2) + \mu^2}}{2} t} = 0$$

I co za tym idzie

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_1(t) = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_2(t) = 0$$




$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_3(t) = -\frac{\lambda_2}{\mu r_1 r_2} (r_2 + \lambda_1)(r_1 + \lambda_1) = 1$$

Interesującym zagadnieniem jest wyznaczanie prognozowanego przedziału czasu do osiągnięcia stanu pochłaniającego.

#### 4. Analiza metodą drzewa uszkodzeń

Metoda drzewa uszkodzeń polega na dekompozycji zdarzenia (np. wypadku lotniczego) na elementy łańcucha przyczynowo-skutkowego w ten sposób, że u podstawy drzewa uszkodzeń znajdują się elementarne zdarzenia mogące powodować przyczynę zdarzenia stanowiącego wierzchołek drzewa. Do zobrazowania drzewa uszkodzeń stosuje się określone operatory logiczne. Analizę metodą drzewa uszkodzeń zastosowano po raz pierwszy w firmie Bell Telephone Laboratories do analizy niezawodności zapłonu raket. W tabeli 1 przedstawiono symbole operatorów stosowane przy sporządzaniu drzewa uszkodzeń [3].

Tabela 1. Przykładowe wybrane symbole stosowane w drzewach uszkodzeń

Lp.	Nazwa operatora	Symbol operatora	Opis operatora
1	Operator I iloczyn logiczny	wejście  wyjście	Sygnal na wyjściu pojawia się tylko wtedy, na wejściu podane zostaną wszystkie sygnały
2	Operator LUB suma logiczna	wejście  wyjście	Sygnal na wyjściu pojawia się wówczas, jeżeli na wejściu podany zostanie jeden lub więcej sygnałów
3	Operator wykluczający	wejście  wyjście	Sygnal na wyjściu pojawia się, gdy na wejściu podawany jest tylko jeden sygnał

#### 5. Analiza metodami symulacyjnymi

Symulacja to metoda eksperymentalnego badania modeli systemów, której istotną cechą jest dokonywanie wielokrotnych prób w celu uzyskania danych pozwalających na materialne odwzorowania ciągów stanów badanych.

Rodzaj odwzorowywanych stanów i sposobów odwzorowywania odbywa się w zależności od celu badań.

Ze względu na rodzaje matematycznych modeli systemów, symulację można dzielić na:

- symulację deterministyczną;
- symulację stochastyczną.

Badanie systemów za pomocą symulacji odbywa się na następujących etapach[1]:

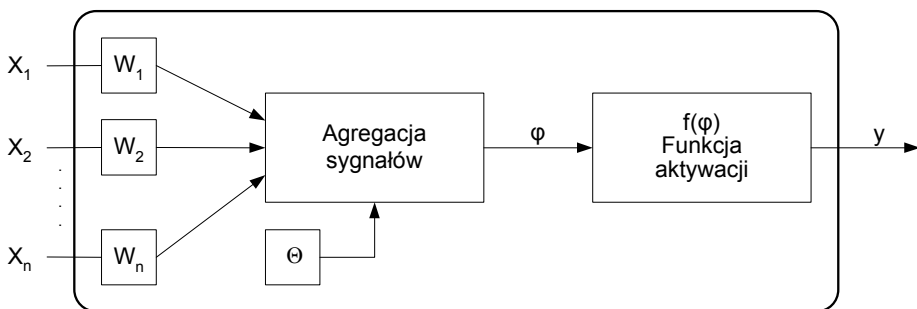
- koncepcja myślowego modelu  $M_0$  danego systemu,
- odwzorowanie tego modelu  $M_0$  w matematyczny model  $M(M_0)$  tego systemu:  $f : M_0 \rightarrow M(M_0)$ ,

- odwzorowanie matematycznego modelu  $M(M_0)$  na (lub gdy to nie jest możliwe to w) symulacyjny model  $M_s[M(M_0)]$  systemu:  

$$g : M(M_0) \rightarrow M_s[M(M_0)],$$
- przeprowadzenie eksperymentu symulacyjnego i otrzymanie wyników odwzorowujących ciągi stanów symulacyjnego modelu  $M_s[M(M_0)]$  systemu w formie zbiorów wartości liczbowych,
- opracowanie otrzymanych wyników w formie zależności logicznych lub matematycznych,
- dokonanie tak zwanej weryfikacji modelu, polegającej na ocenie wiarygodności otrzymanych wyników przez przeprowadzenie odpowiedniej analizy,
- akceptacja modelu symulacyjnego lub jego modyfikacja.

## 6. Sztuczne sieci neuronowe

Możliwe jest również zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do prognozowania przyszłych stanów urządzeń lotniczych z zadaniem horyzontem czasowym na podstawie aktualnego i przeszłych stanów. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych eliminuje konieczność rozwiązywania zagadnień i umożliwia wnioskowanie o zachowaniu urządzeń lotniczych przebiegu procesów na podstawie zgromadzonych w bazach danych informacji bez konieczności identyfikacji zależności funkcyjnych pomiędzy danymi (np. metodami analizy statystycznej). Sztuczne sieci neuronowe są zbudowane z połączonych ze sobą i zwykle ułożonych w warstwy neuronów. Każdy z neuronów posiada tylko jedno wyjście oraz dowolną liczbę wejść (rys. 3) [3].



Rys. 3. Przykładowa struktura sztucznego neuronu:  $X$  – sygnały wejściowe,  $y$  – sygnał wyjściowy,  $w$  – wagi połączeń,  $\Theta$  – wartość progę

Pojedynczy neuron realizuje przekształcenie danych wejściowych w sygnał wyjściowy zgodnie z zależnością:

$$y = f(\varphi) = f_T(A(x_i, w_i), \Theta),$$

gdzie: A – funkcja agregacji.

## 7. Ocena ryzyka zagrożeń bezpieczeństwa

Z zagadnieniem oceny ryzyka powiązane są następujące terminy:

- prawdopodobieństwo** wystąpienia zagrożenia,
- skutki** lub potencjalne konsekwencje,
- ryzyko zagrożenia** (inny wymiar prawdopodobieństwa).

Bazując na ocenie ryzyka można przeprowadzić jego wartościowanie i określić poziom akceptowalności poszczególnych zagrożeń.

Tabela 2. Prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń

PRAWDOPODOBIENSTWO ZDARZENIA		
4	<b>Możliwe</b>	Może wystąpić raz lub kilka razy podczas operacji lotniczych.
3	<b>Sporadyczne</b>	Nie występuje pojedynczo, ale występuje, gdy połączymy kilka systemów.
2	<b>Bardzo rzadkie</b>	Sporadycznie występuje.
1	<b>Nieosiągalne</b>	Nie powinien nigdy wystąpić w całym życiu floty

Tabela 3. Intensywność efektów zdarzeń

INTENSYWNOŚĆ ODDZIAŁYWANIA		
4	<b>Katastrofalna</b>	Utrata samolotu, dużo ofiar.
3	<b>Niebezpieczna</b>	Duża redukcja marginesów bezpieczeństwa skutkująca małą liczbą ofiar.
2	<b>Większa</b>	Znacząca redukcja marginesów bezpieczeństwa.
1	<b>Mniejsza</b>	Zakłócenia, czy pewne ograniczenia w realizacji procedur.



Tabela 4. Macierz akceptowalności ryzyka

MACIERZ RYZYKA						
Intensywność oddziaływania	<b>Katastrofalna</b>	<b>4</b>	4 – Przegląd	8 – Akcja	12 – Akcja	16 – Akcja
	<b>Niebezpieczna</b>	<b>3</b>	3 – Akceptacja	6 – Przegląd	9 – Akcja	12 – Akcja
	<b>Większa</b>	<b>2</b>	2 – Akceptacja	4 – Przegląd	6 – Przegląd	8 – Akcja
	<b>Mniejsza</b>	<b>1</b>	1 – Akceptacja	2 – Akceptacja	3 – Akceptacja	4 – Przegląd
			<b>Niemożliwe - 1</b>	<b>Bardzo rzadkie - 2</b>	<b>Sporadyczne - 3</b>	<b>Możliwe - 4</b>
<b>Prawdopodobieństwo zdarzenia</b>						

Używając tabeli 4, można przypisać poszczególne poziomy akceptowalności:

- akceptowany – nie są wymagane żadne akcje korekcyjne,
- niepożądany (tolerowany) – ryzyko można osłabić,
- nieakceptowany – należy zredukować ryzyko.

### Zakończenie

Z uwagi na złożoność systemu lotniczego oraz losowy charakter powstawania zdarzeń lotniczych często występują trudności zbierania, ewidencji i archiwizacji danych opisujących poszczególne zdarzenia. Zasadnicze znaczenie ma przyjęty odpowiedni stopień szczegółowości opisu zdarzeń w systemie informatycznym, który determinuje głębokość prowadzonych analiz. Ocena stanu bezpieczeństwa i możliwość analizy ze względu na przyczyny zagrożeń umożliwia doskonalenie strategii zarządzania bezpieczeństwem eksploatacji statków powietrznych, organizacji lotów oraz udoskonalenie programów szkolenia lotniczego.

Przedstawiony przegląd metod oceny bezpieczeństwa z racji ograniczonych ram artykułu jest fragmentaryczny, ale prezentuje różne podejścia i cele ocen.

- Metody i kryteria statystyczne na ogół oceniają poziom bezpieczeństwa w czasie przeszłym i nie dają mocnych podstaw do prognozowania oraz rozwiązywania zagadnień optymalizacji.
- Metody probabilistyczne zapewniają dużą uniwersalność, dzięki czemu mogą dokładnie odzwierciedlić system lotniczy, a w szczególności wpływ na bezpieczeństwo czynników wewnętrznych i zewnętrznych.
- Mogą wystąpić trudności w doborze optymalnej sieci neuronowej z powodu braku gwarancji, że wektor wag zostanie wyznaczony na podstawie minimum globalnego.

Zastosowanie optymalnych i nowoczesnych metod oraz technik prognozy stycznych nie zastąpi racjonalnego myślenia i prawidłowo przeprowadzonego rozpoznania fizycznych uwarunkowań oraz prognozowanych przebiegów.

### **Bibliografia**

1. Żurek J., Jaźwiński J., Borgoń J., Klimaszewski S., Żmudziński Z.: Symulacyjne metody badania bezpieczeństwa lotów, . ASKON, Warszawa 1998.
2. Zieja M., Żurek J.: Prognozowanie trwałości wybranych urządzeń osprzętu lotniczego w aspekcie procesów starzeni, ITWL, Warszawa 2008.
3. De Lurgio S.A.: Forecasting principles and applications.
4. Zieja M.: „Metoda oceny bezpieczeństwa lotów z wykorzystaniem danych z procesu eksploatacji”. Praca doktorska, ITWL, Warszawa 2009.

Recenzent:

**Marek MALARSKI**

### **Review of the safety evaluation methods in aviation**

#### **Key-words**

Safety, aviation transport, risk factors.

#### **Summary**

Selected methods of safety risk evaluation in air transport are presented in this paper. Risk identification and risk analyses are active safety management methods in air transport. Flight safety evaluation is carried out according to statistical, probabilistic, and artificial neuron network criteria. Depending on an accepted criterion, flight safety methods and rates enabling to assess system safety-state are determined. Flight safety evaluation and the possibility to analyse risk factors allow a manager of the system to develop an aircraft safety management strategy. They also allow for the improvement of the organisation of flights and aviation training programs.