

Ryszard KALETA ORCID 0000-0003-4878-9656, ryszard.kaleta@itwl.pl
Józef ŻUREK ORCID 0000-0001-6333-3628, jozef.zurek@itwl.pl – corresponding author
Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych), Poland

ZWIĄZKI MIĘDZY NIEZAWODNOŚCIĄ I BEZPIECZEŃSTWEM LOTÓW

Relationship between dependability and flight safety

Streszczenie: Artykuł prezentuje wybrane z dorobku naukowego Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych metody oceny niezawodności i bezpieczeństwa techniki lotniczej. Badanie niezawodności i bezpieczeństwa zostało poprzedzone wdrożeniem własnego systemu informatycznego do wspomagania procesu eksploatacji, zawierającego moduły: ewidencji, banku danych i przetwarzania informacji eksploatacyjnych. System przetwarzania był wzbogacany opracowanymi modelami oraz algorytmami oceny. Ocena niezawodności i bezpieczeństwa wojskowych statków powietrznych odbywa się poprzez ewidencję uszkodzeń odpowiednio poklasyfikowanych ze względu na przyczyny i skutki, które umożliwiają wyznaczanie pewnych wskaźników i ich korelacje z incydentami oraz wypadkami lotniczymi. Istotnymi wskaźnikami oceny są parametr strumienia uszkodzeń, uszkodzalność, prawdopodobieństwo poprawnego wykonania operacji lotniczej z uszkodzeniem i bez uszkodzenia statku powietrznego. Uwzględnia się sprzyjające warunki lotu i występujące zakłócenia. Ocena korelacji między częstością uszkodzeń a prawdopodobieństwem pomyślnej operacji lotniczej pozwala ocenić związki między uszkodzalnością i bezpieczeństwem lotów.

Słowa kluczowe: niezawodność, bezpieczeństwo lotów, eksploatacja statku powietrznego

Abstract: This paper presents methods of dependability assessment and safety of aeronautical engineering selected from scientific achievements of the Air Force Institute of Technology. Studying dependability and safety was preceded by the implementation of the computer system used for the support of the operational process and consisting of the following modules: recording, database and module for processing of operational information. The processing system was provided with the developed models and assessment algorithms. The dependability and safety of military aircraft are assessed by registering defects appropriately classified into causes and effects that determine certain factors and their correlation with aircraft incidents and accidents. A significant assessment

factor is a failure flux parameter, damageability, and probability of performing an aircraft operation with or without failure to the aircraft. Favourable flight conditions and the occurring disruptions are taken into consideration. Correlation assessment between failure frequency and the probability of favourable operations enables us to evaluate the relationship between dependability and flight safety.

Keywords: dependability, flight safety, aircraft operation

Received: July 8, 2022/ Revised: September 21, 2022/ Accepted: October 30, 2023/ Published: December 28, 2023

1. Wprowadzenie

Statek powietrzny, w odróżnieniu od innych obiektów technicznych, wykonuje zadania niepodzielne w czasie, dlatego przed użyciem ma mieć rozpoznany stan techniczny z pomyślną prognozą utrzymania stanu zdatności w czasie realizacji zadania [1]. Rozpoznanie stanu technicznego oraz prognozowanie stanu zdatności w dowolnym momencie procesu eksploatacji nie może być aktem jednorazowym, lecz racjonalnie rozłożonym ciągiem zdarzeń na osi czasowej procesu eksploatacji danego statku powietrznego [2]. Ciąg kontroli diagnostycznych ma być dopasowany pod względem częstości i procedury do natury zużycia, starzenia poszczególnych elementów oraz układów funkcjonalnych. Należy też uwzględniać ryzyko błędów w ocenie stanu i zakłóceń lub uszkodzeń przypadkowych. Wymagania bezpiecznej eksploatacji techniki lotniczej obligują do utrzymania określonych nadmiarów w konstrukcji SP, np.: nadmiaru funkcji, mocy, informacji, struktury i zasobu funkcjonowania [3]. Nadmiary zabezpieczają konstrukcję przed zagrożeniem bezpieczeństwa w przypadku uszkodzeń i błędów w ocenie stanu zdatności. Rozróżniają też związki między niezawodnością i bezpieczeństwem. Ponieważ poziom niezawodności wpływa wprost na ryzyko zagrożeń bezpieczeństwa, to wciąż doskonalili się pod tym względem konstrukcję i metody diagnozowania. Dopasowanie programu diagnostycznego do charakterystyk niezawodności oraz identyfikacja zasobu funkcjonowania SP stanowi istotny problem eksploatacyjny i jest przedmiotem badań wielu ośrodków, które poszukują odpowiedzi na następujące pytania:

- Jakie kryteria oceny stanu technicznego należy stosować podczas dopuszczania SP do bezpiecznego i skutecznego lotu?
- Jak często i jakimi metodami oceniać ten stan?
- Jak przebiega trajektoria stanu technicznego w przedziale czasu użytkowania?
- Jakie związki istnieją między poziomem niezawodności oraz bezpieczeństwa a częstością i rodzajem obsługi profilaktycznych oraz napraw?
- Jaki związek istnieje między czasem użytkowania SP i czasem kalendarzowym a trwałością ?

Częściową odpowiedź na te pytania dają wykonane odpowiednie programy badawcze niezawodności i trwałości obiektów oraz ich elementów składowych. Badanie niezawodności i trwałości obiektów technicznych można prowadzić na dwa sposoby.

Pierwszy sposób to badania stanowiskowe wybranych egzemplarzy obiektów przy symulowanych obciążeniach i warunkach pracy, z równoczesnym diagnozowaniem stanu technicznego i rejestracją danych o przebiegu procesów destrukcji.

Drugi sposób to zastosowanie zewnętrznego centralnego komputerowego systemu śledzenia i analizy procesu eksploatacji całego zbioru obiektów, złożonego z systemu ewidencji zdarzeń eksploatacyjnych, zgromadzonych w banku danych, oraz z systemu przetwarzania informacji. Szczególne znaczenie ma system ewidencji informacji uzyskanych w trakcie kontroli diagnostycznych oraz wykrytych uszkodzeń z podziałem na rodzaje, objawy, przyczyny i skutki. Ewidencjonowane dane służą do wyznaczania charakterystyk niezawodności, bezpieczeństwa i dają możliwość szacowania zasobu funkcjonowania [4].

System przetwarzania informacji eksploatacyjnych, ze względów praktycznych (w celu motywowania użytkowników do starannego ewidencjonowania zdarzeń), powinien przetwarzać zgromadzone w banku dane na dwóch poziomach.

Pierwszy z nich jest niezbędny do wytwarzania dokumentów ewidencyjnych, sprawozdawczych i raportów użytecznych w zarządzaniu systemem eksploatacji.

Drugi poziom przetwarzania może wyznaczać wskaźniki niezawodności i parametry stosowane w przyjętych modelach do oceny trwałości, bezpieczeństwa itp. W ogólnym przypadku system przetwarzania może pracować na zbiorze informacji zawartych w zintegrowanej bazie centralnego banku danych. System ten, wykorzystując komputerowe narzędzia programowe, może sumować poszczególne przedziały czasowe funkcjonowania obiektu lub zbioru obiektów oraz ich przebywanie w poszczególnych stanach eksploatacyjnych, tworząc odpowiednie ciągi frakcji czasowych między wybranymi zdarzeniami. Podobne ciągi frakcji czasowych można tworzyć dla poszczególnych zespołów, podzespołów i części obiektu lub odpowiednich zbiorów części wielu obiektów.

Obserwowane frakcje czasu pracy obiektów między uszkodzeniami, obsługami, naprawami, a także innymi wybranymi zdarzeniami w locie oraz na ziemi pozwalają wyznaczyć szereg wskaźników eksploatacyjnych bezpieczeństwa i niezawodności. Przechowywane w banku danych eksploatacyjnych przedziały czasu przebywania obiektów i ich zespołów oraz części w poszczególnych stanach lub między wybranymi zdarzeniami lub klasami zdarzeń tworzą odpowiednie zbiory zmiennych losowych. Dane te służą do tworzenia probabilistycznego modelu procesu eksploatacji. Rozkłady tych zmiennych losowych mogą być opisane teoretycznymi modelami, których parametry charakteryzują poszczególne cechy jakościowe procesu eksploatacji i własności obiektów.

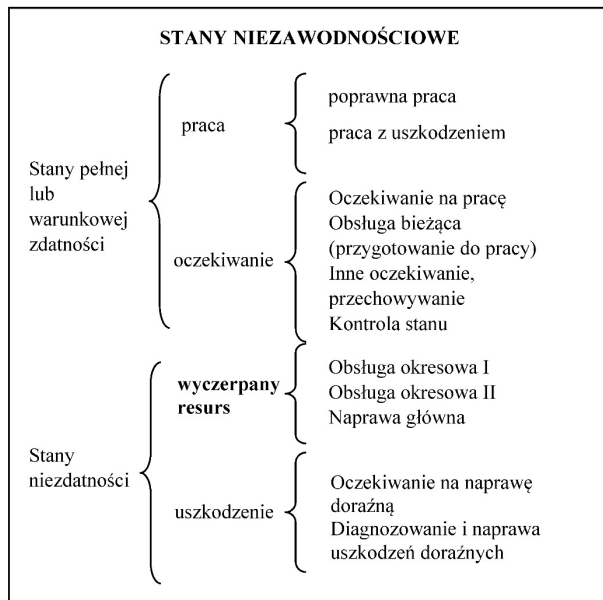
2. Wybrane wskaźniki niezawodności

Wskaźniki funkcyjne i liczbowe charakteryzujące niezawodność obiektów można podzielić na następujące klasy:

- probabilistyczne rozkłady czasu przebywania obiektu w poszczególnych stanach,

- chwilowe lub asymptotyczne prawdopodobieństwa przebywania obiektu w poszczególnych stanach,
- częstości przebywania obiektu w poszczególnych stanach,
- wyrażające skutki rzeczywiste lub oczekiwane przejścia obiektu do wyróżnionych stanów, czy też przebywania w tych stanach.

W modelu niezawodnościowym do oceny interesujących wskaźników należy określić tzw. przestrzeń fazową, będącą zbiorem stanów niezawodnościowych. Przykład zbioru stanów niezawodnościowych statku powietrznego przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Przykładowy zbiór stanów niezawodnościowych statku powietrznego

Zebrane w systemie ewidencji odpowiednie zbiory informacji umożliwią wybór wskaźników ocenowych, z punktu widzenia zawartości informacji, który może być poprzedzony analizą korelacyjną. Wspomniana analiza prowadzi do zawężenia liczby wskaźników i wyboru najistotniejszych. Przed analizą należy wybrać wskaźniki główne, charakteryzujące dany obiekt lub zjawisko, i wskaźniki objaśniające. Główne powinny charakteryzować się możliwie najmniejszą korelacją wzajemną, świadczącą o rozłączności reprezentowanych obszarów informacyjnych. Objaśniające powinny być silnie skorelowane z głównymi, aż do związków funkcyjnych włącznie. Silnie skorelowane poszerzają bazę informacyjną wskaźnika głównego.

Do badania niezawodności eksploatacyjnej może być wykorzystany pewien uniwersalny moduł systemu, rejestrujący podzbiór odpowiednio poklasyfikowanych zdarzeń eksploatacyjnych zaistniałych na wprowadzonych do systemu obiektach.

Wytwarzane raporty bieżące i zbiorcze dotyczące obiektów w wybranym okresie eksploatacji mogą wyznaczać wskaźniki niezawodności dla techniki lotniczej. Przykładowymi wskaźnikami mogą być: parametr strumienia uszkodzeń ω_{rj} elementu typu r [5].

Parametr strumienia uszkodzeń ω_{rj} elementu typu r określany jest jako średnia liczba jego uszkodzeń w jednostkowym j -tym przedziale czasu:

$$\omega_{rj} = \frac{n_{rj}(\Delta t)}{N_r \Delta t} \quad (1)$$

gdzie:

$n_{rj}(\Delta t)$ – liczba uszkodzeń elementu r -tego typu, powstałych w przedziale $[j\Delta t, (j+1)\Delta t]$ czasu jego pracy,

N_r – liczba elementów na początku badań j -tego przedziału,

Δt – długość przedziału czasu,

j – numer przedziału czasu $j = 0, 1, 2, \dots, j_{\max} - 1 = \frac{T}{\Delta t}$,

T – rozpatrywany horyzont czasowy.

Prowadzenie obliczeń według powyższego wzoru jest poprawne przy założeniu, że w czasie eksperymentu liczba badanych elementów $N_r = \text{const}$. Warunku tego nie można jednak spełnić w czasie badań prowadzonych w rzeczywistym czasie eksploatacji. Informacje o uszkodzeniach elementów przesyłane są od użytkowników eksploatujących statki powietrzne o różnym nalocie (czasie pracy). Zbiór elementów składowych N_r nie jest stały, ponieważ rozpatrujemy obiekty naprawialne i nie wszystkie jego elementy charakteryzują się jednakowym czasem pracy. Z tego względu w procesie eksploatacji rejestruje się liczbę $n_{rj}(\Delta t)$ uszkodzeń statku powietrznego o czasie pracy do uszkodzenia zawierającym się w przedziale $[j\Delta t, (j+1)\Delta t]$.

W związku z powyższym można wyznaczyć szereg oszacowań cząstkowych parametru strumienia uszkodzeń ω_{rj}^k elementu dla każdej liczby N_r^k statków powietrznych eksploatowanych w poszczególnych przedziałach czasu.

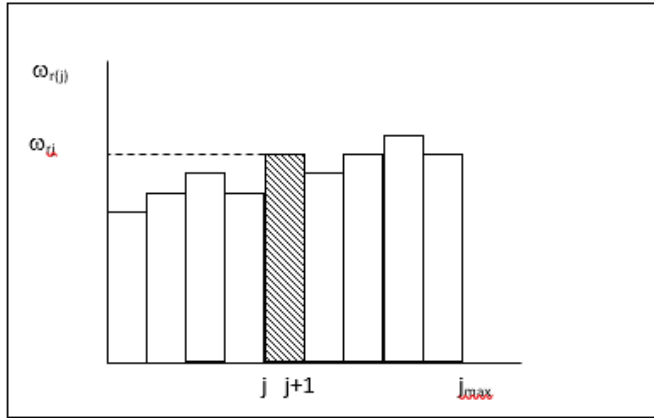
$$\omega_{rj}^k = \frac{n_{rj}^k(\Delta t)}{N_r^k \Delta t}, \quad k, j = j, j+1, \dots, j_{\max} - 1 \quad (2)$$

Wynikowy parametr strumienia uszkodzeń ω_{rj} można traktować jako pewną średnią ważoną oszacowań cząstkowych:

$$\omega_{rj} = \sum_{a=j}^{j_{\max}-1} p^k \omega_{rj}^k \quad (3)$$

gdzie: p^k – waga k -tego oszacowania cząstkowego.

Graficzną ilustrację parametru strumienia uszkodzeń przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Rozkład parametru strumienia uszkodzeń dla obiektów lotniczych

Przyjmując np., że waga ta jest proporcjonalna do liczby statków powietrznych eksploatowanych w przedziałach czasu $j\Delta t, (j+1)\Delta t, \dots, (j_{max}-1)\Delta t$, tzn.:

$$p^k = \frac{N^k}{\sum_{f=j}^{j_{max}-1} N^k} \quad (4)$$

więc

$$\omega_{rj} = \frac{\sum_{l=j}^{j_{max}-1} n_{rj}^k(\Delta t)}{\sum_{l=j}^{j_{max}-1} N^k \Delta t} = \frac{n_{rj}(\Delta t)}{N_j \Delta t} \quad (5)$$

gdzie:

$n_{rj}(\Delta t)$ – liczba uszkodzeń, powstałych w przedziale $[j\Delta t, (j+1)\Delta t]$ czasu pracy we wszystkich eksploatowanych statkach powietrznych r -tego typu,
 $N_j \Delta t$ – sumaryczny czas pracy wszystkich statków powietrznych r -tego typu eksploatowanych w przedziale czasu $[j\Delta t, (j+1)\Delta t]$.

Średnią wartość parametru strumienia uszkodzeń w przedziale czasu $(0, \Delta t)$ obliczyć można ze wzoru:

$$\bar{\omega}_{rj} = \frac{\sum_{p=0}^j n_{rp}}{\sum_{p=0}^j N_p \Delta t} \quad (6)$$

gdzie:

$\sum_{p=0}^j n_{rp}$ – liczba uszkodzeń, powstałych w przedziale $(0, \Delta t)$ czasu pracy we wszystkich eksploatowanych statkach powietrznych r -tego typu,

$\sum_{p=0}^j N_p \Delta t$ – sumaryczny czas pracy wszystkich statków powietrznych r -tego typu eksploatowanych w przedziale $(0, \Delta t)$.

Do obliczenia wartości granicznych parametru strumienia uszkodzeń wykorzystuje się związek pomiędzy funkcją gęstości prawdopodobieństwa czasu bezawaryjnej pracy $f(t)$, a parametrem strumienia uszkodzeń $w(t)$ [2].

$$w(t) = f(t) + \int_0^t w(t-\tau) f(\tau) d\tau \quad (7)$$

gdzie:

$w(t)$ – parametr strumienia uszkodzeń,

$f(t), f(\tau)$ – funkcje gęstości prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy obiektu.

$w(t-\tau)$ – wartość parametru strumienia uszkodzeń obiektu w chwili początkowej.

Przybliżoną wartość $w(t)$ wyliczamy z zależności:

$$w(t) = w(j\Delta t) = w_j = \frac{n_j(\Delta t)}{N\Delta t} \quad (8)$$

gdzie:

$w(t)$ – wartość wyżej opisana w chwili końcowej badania,

$n_j(\Delta t)$ – liczba obiektów, które uległy uszkodzeniu w j -tym przedziale czasu pracy $[j\Delta t, (j+1)\Delta t]$,

N – liczba eksploatowanych obiektów.

3. Klasyfikacja uszkodzeń techniki lotniczej

Technika lotnicza z założenia ma wysokie wymagania niezawodnościowe, które w praktyce realizowane są poprzez specjalne procedury kontroli i odpowiednie rozwiązania konstrukcyjne, polegające na wprowadzeniu nadmiarów struktury, wytrzymałości, mocy, informacji itp. Nadmiar strukturalny charakteryzuje się tym, że występują elementy lub układy funkcjonalne podstawowe i rezerwowe – zabezpieczające. W przypadku uszkodzenia układu podstawowego włączają się układy zabezpieczające. Zapewnia to wysoki poziom bezpieczeństwa lotów statków powietrznych. Pomimo tych zabezpieczeń i dużych starań służb technicznych zdarzają się awarie, które są przyczyną wypadków. Układy zabezpieczające stanowiące rezerwę systemów podstawowych zwiększają znacznie koszty wytwarzania i zmniejszają osiągi eksploatacyjne, takie jak udźwieg, zasięg, zużycie paliwa itp. Wymagają również specjalnego traktowania w procesie eksploatacji statków powietrznych, by przy bardzo małym prawdopodobieństwie użycia miały bardzo wysokie prawdopodobieństwo poprawnego funkcjonowania. Ważnym zagadnieniem jest bezbłądność ciągłej lub okresowej identyfikacji stanu zdadności układów konstrukcyjnych i systemów zabezpieczających, które bardzo rzadko są uruchamiane, więc nie są diagnozowane przez działanie. Dzięki tym systemom uszkodzenia zdarzające się w czasie lotu na ogół są bez następstw.

Prawdopodobieństwo powstania uszkodzenia obiektu w przedziale czasu $[a, b]$ oblicza się przez oszacowanie dwóch prawdopodobieństw opisanych w punktach a i b.

a) Oszacowanie prawdopodobieństwa powstania uszkodzenia obiektu typu r w locie

W celu oszacowania prawdopodobieństwa $\hat{P}l_r$ powstania uszkodzenia w locie obiektu typu r w przedziale czasu $[a, b]$ wprowadzamy funkcję pomocniczą x_{ij} .

$$x_{ij} = \begin{cases} 0 \rightarrow \text{gdy w } j\text{-tym locie } i\text{-tego obiektu nie powstało uszkodzenie} \\ 1 \rightarrow \text{gdy w } j\text{-tym locie } i\text{-tego obiektu powstało uszkodzenie} \end{cases}$$

$$\hat{P}l_r = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{l_i} x_{ij}}{\sum_{i=1}^N l_i} \quad (9)$$

gdzie:

l_i – liczba lotów odbytych przez i -ty obiekt typu r w przedziale czasu $[a, b]$,

N – liczba obiektów typu r eksploatowanych w przedziale czasu $[a, b]$.

- b) Oszacowanie prawdopodobieństwa uwzględniające różne przyczyny powstania uszkodzenia obiektu typu r .

W systemie ewidencji procesu eksploatacji wojskowych statków powietrznych wyróżniamy 12 typowych przyczyn zakłócenia operacji lotniczych. Zostały one pogrupowane w grupy A i B.

A	D	– niedyscyplinowanie członków załogi,
	B	– błąd pilotażowy,
	O	– niewłaściwa organizacja szkolenia lotniczego,
	U	– niewłaściwe ubezpieczenie lotów,
	E	– niewłaściwa eksploatacja statku powietrznego przez załogę,
	I	– inne,
	Z _m	– niewłaściwe zabezpieczenie materiałowo-techniczne,
X	– niewyjaśnione;	
B	T	– niewłaściwa obsługa techniczna,
	F	– błędy fabryczne,
	R	– błędy remontowe,
	I _t	– inne niewłaściwości techniczne.

Oznaczając rodzaj przyczyny symbolem β i wprowadzając funkcję pomocniczą $x_{\beta ij}$ możemy oszacować prawdopodobieństwo $\hat{P}l_{r\beta}$ – uszkodzenia w locie powstałego z przyczyny β .

$$x_{\beta ij} = \begin{cases} 0 & \rightarrow \text{gdy w } j\text{-tym locie } i\text{-tego obiektu nie powstało uszkodzenie} \\ & \text{z przyczyny } \beta \\ 1 & \rightarrow \text{gdy w } j\text{-tym locie } i\text{-tego obiektu powstało uszkodzenie} \\ & \text{z przyczyny } \beta \end{cases}$$

$$\hat{P}l_{r\beta} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{l_i} x_{\beta ij}}{\sum_{i=1}^N l_i} \quad (10)$$

oznaczenia l_i , N jak w zależności (9).

4. Związki między niezawodnością i bezpieczeństwem lotów

W miarę rozwoju techniki, związek pomiędzy uszkodzeniem a bezpieczeństwem lotów zaczął słabnąć. Przyczyną takiej sytuacji jest występowanie w strukturze systemu „człowiek–obiekt techniczny” różnego rodzaju nadmiarowości [6]. Istnienie nadmiaru powoduje, że wystąpienie uszkodzenia w takim systemie nie zawsze powoduje niepożądany skutek. Natomiast z powodu innych zakłóceń zdalny obiekt techniczny nie gwarantuje pomyślnej realizacji zadania [7].

Jedną z miar związku wskaźników nieuszkodzalności i bezpieczeństwa systemu może być współczynnik korelacji między uszkodzeniami obiektu i zdalności statku powietrznego do bezpiecznego zakończenia operacji lotniczej.

4.1. Model matematyczny problemu

Rozważmy dwie zmienne losowe: X – charakteryzującą uszkadzalność obiektu i Z – charakteryzującą pomyślne zakończenie zadania transportowego. Zmienne losowe X i Z opisane są w sposób następujący:

$$X = \begin{cases} 1 & \text{- nie występują uszkodzenia} \\ 0 & \text{- występują uszkodzenia z grupy B} \end{cases}$$

$$Z = \begin{cases} 1 & \text{- operacja lotnicza jest poprawnie wykonana} \\ 0 & \text{- operacja lotnicza jest przerwana incydem lub wypadkiem z grupy A} \end{cases}$$

Na tej podstawie można zdefiniować następujące wskaźniki niezawodnościowe i bezpieczeństwa:

$R = P(X=1)$ – wskaźnik nieuszkodzalności – prawdopodobieństwo niewystąpienia uszkodzenia,

$Q = P(X=0)$ – wskaźnik uszkadzalności – prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia,

$K = P(Z=1)$ – wskaźnik poprawnego lotu, prawdopodobieństwo wykonania zadania transportowego,

$S = P(Z=0)$ – wskaźnik zakłóconego lotu, prawdopodobieństwo niewykonania zadania transportowego.

Między zmiennymi losowymi X i Z , opisującymi stany niezawodnościowe obiektu i stany bezpieczeństwa systemu transportowego, występują następujące relacje:

$$\begin{aligned} P(Z = 1 / X = 1) &= K_R \\ P(Z = 0 / X = 1) &= S_R = 1 - K_R \end{aligned} \tag{11}$$

$$P(Z = 1 / X = 0) = K_Q$$

$$P(Z = 0 / X = 0) = S_Q = 1 - K_Q$$

gdzie:

K_R – warunkowy wskaźnik bezpiecznego systemu, w którym nie występują uszkodzenia (warunkowe prawdopodobieństwo wykonania zadania przez obiekt nieuszkodzony),

S_R – warunkowy wskaźnik zagrożonego systemu, w którym nie występują uszkodzenia (warunkowe prawdopodobieństwo niewykonania zadania przez obiekt nieuszkodzony z powodu innych zakłóceń – czynnik ludzki, środowisko),

K_Q – warunkowy wskaźnik bezpiecznego systemu, w którym występują uszkodzenia (warunkowe prawdopodobieństwo wykonania zadania przez obiekt uszkodzony),

S_Q – warunkowy wskaźnik zagrożonego systemu, w którym występują uszkodzenia (warunkowe prawdopodobieństwo niewykonania zadania przez obiekt uszkodzony).

Rozkład łączny zmiennych losowych X i Z , opisujących stany niezawodnościowe obiektu i stany bezpieczeństwa systemu transportowego realizującego operacje lotnicze, ma postać:

$$P_{KR} = P(Z = 1, X = 1) = R \cdot K_R$$

$$P_{SR} = P(Z = 0, X = 1) = R \cdot S_R \quad (12)$$

$$P_{KQ} = P(Z = 1, X = 0) = (1 - R) \cdot K_Q$$

$$P_{SQ} = P(Z = 0, X = 0) = (1 - R) \cdot S_Q$$

Prawdopodobieństwa brzegowe wyrażające ogólną skuteczność systemu dane są wzorami:

$$\begin{aligned} K &= R K_R + K_Q Q = K_R R + (1 - R) K_Q = K_Q + R(K_R - K_Q) = \\ &= K_Q + R(1 - S_R - K_Q) = K_Q + R(S_Q - S_R), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} S &= R S_R + Q S_Q = R S R + (1 - R) S_Q = S_Q + R(S_R - S_Q) = \\ &= S_Q + R(K_Q - K_R) = S_Q + R(1 - S_Q - K_Q), \end{aligned} \quad (14)$$

gdzie:

K – wskaźnik realizacji operacji lotniczych bez incydentów i zagrożeń bezpieczeństwa;

S – wskaźnik przerwanych operacji lotniczych z powodu incydentów i zagrożeń bezpieczeństwa.

Przykład 1

- Analizie poddano 1000 realizacji zadań transportowych ($N = 1000$). Stwierdzono, że:
- w liczbie $N_R = 950$ realizacji nie wystąpiły uszkodzenia,
 - w liczbie $N_{1,1} = 940$ realizacji nie wystąpiły uszkodzenia ($X = 1$) i zadanie zostało wykonane ($Z = 1$),
 - w liczbie $N_{1,0} = 10$ realizacji nie wystąpiło uszkodzenie ($X = 1$), a zadanie nie zostało wykonane z powodu innych zakłóceń ($Z = 0$),
 - w liczbie $N_{0,1} = 35$ realizacji wystąpiły uszkodzenia ($X = 0$), a zadanie zostało wykonane ($Z = 1$),
 - w liczbie $N_{0,0} = 15$ realizacji wystąpiło uszkodzenie ($X = 0$) i zadanie nie zostało wykonane ($Z = 0$).

Wykorzystując wymienione dane, można wyznaczyć następujące warunkowe wskaźniki skuteczności oraz nieuszkodzalności:

$$K_R = \frac{N_R - N_{1,0}}{N_R} = 0,9895; \quad S_R = 1 - K_R = 0,0105;$$

$$K_Q = \frac{N_{0,1}}{N_{0,1} + N_{0,0}} = 0,7; \quad S_Q = 1 - K_Q = 0,3;$$

$$R = \frac{N_{1,1} + N_{1,0}}{N} = \frac{950}{1000} = 0,95.$$

Obliczamy ogólny wskaźnik operacji lotniczych bez incydentów i zagrożeń K :

$$K_1 = K_Q + R(K_R - K_Q) = 0,7 + 0,95 \cdot 0,2895 = 0,9750$$

Z wyliczeń wynika, że prawdopodobieństwo wykonania zadania ($K_Q = 0,7$) przez system, w którym występują uszkodzenia jest mniejsze od prawdopodobieństwa wykonania zadania ($K_R = 0,9895$) przez system, w którym nie występują uszkodzenia.

Ogólny wskaźnik warunkowego bezpieczeństwa jest wysoki i wynosi $K_1 = 0,9750$, a wskaźnik nieuszkodzalności wynosi $R = 0,95$.

$$K_R > K_1; \quad \text{ i } \quad K_1 > R$$

Oznacza to, że w systemie występują nadmiary zabezpieczające i uszkodzenia są bez następstw.

Przykład 2

Rozważając inne przykłady realizacji zadań, dla których analiza przeprowadzonych obserwacji przedstawia się jak niżej:

$$N = 1000; N_R = 800; N_{1,1} = 750; N_{1,0} = 50; N_{0,1} = 195; N_{0,0} = 5.$$

w danym przypadku otrzymuje się następujące wyniki:

$$K_R = 0,9375; S_R = 0,0625; K_Q = 0,975; S_Q = 0,025; R = 0,80.$$

Ogólny wskaźnik bezpieczeństwa wynosi:

$$K_2 = K_Q + R(K_R - K_Q) = 0,975 - 0,03 \cdot 0,8 = 0,945$$

Prawdopodobieństwo bezpiecznej realizacji operacji lotniczych przez system, w którym występują uszkodzenia ($K_Q = 0,975$) jest większe od prawdopodobieństwa wykonania zadania bez uszkodzeń ($K_R = 0,9375$). Świadczy to o bezpiecznej konstrukcji statku powietrznego wyposażonego w urządzenia zabezpieczające. System lotniczy jest bezpieczny. Wskaźnik bezpieczeństwa jest znacząco większy od nieuszkodzalności $K_2 > R$.

4.2. Model matematyczny związku między nieuszkodzalnością i bezpieczeństwem lotów

Wartość oczekiwana i wariancje zmiennych losowych X i Z , opisujących stany niezawodnościowe obiektu i stany bezpieczeństwa systemu lotniczego, mają postać:

$$EX = P(X = 1) = R \tag{15}$$

$$\sigma_x = \sqrt{R(1-R)} \tag{16}$$

$$EZ = P(Z = 1) = K \tag{17}$$

$$\sigma_z = \sqrt{K(1-K)} \tag{18}$$

Związek pomiędzy wskaźnikami bezpieczeństwa i nieuszkodzalności wynikający ze wzorów (15)–(18) ma następującą postać:

$$EZ = EX(K_R - K_Q) + K_Q \tag{19}$$

Relacja pomiędzy odchyleniem standardowym nieuszkodzalności a odchyleniem standardowym bezpieczeństwa dana jest wzorem:

$$\sigma_X^2 = \frac{\sigma_Z^2 - [R^2 S_R K_R + (1-R)^2 S_Q K_Q]}{K_R K_Q - S_R S_Q} \quad (20)$$

Kowariancja pomiędzy zmiennymi losowymi X i Z dana jest wzorem:

$$\begin{aligned} \sigma_{XZ} &= E[(X-R)(Z-K)] = E(XZ) - E[X] \cdot E[Z] = R(1-R)(S_Q - S_R) = \\ &= R(1-R)(1-K_Q - S_R) = R(1-R)(K_R - K_Q) = \sigma_X^2 \frac{dK}{dS}, \end{aligned} \quad (21)$$

a korelacja między stanami niezawodnościowymi obiektu i stanami bezpieczeństwa systemu dana jest wzorem, jak niżej:

$$\begin{aligned} \rho_{XZ} &= \frac{\sigma_{XZ}}{\sigma_X \sigma_Z} = (S_Q - S_R) \sqrt{\frac{R(1-R)}{K(1-K)}} = (K_R - K_Q) \sqrt{\frac{R(1-R)}{K(1-K)}} = \\ &= (1-K_Q - S_R) \sqrt{\frac{R(1-R)}{K(1-K)}} = \frac{dK}{dS} \sqrt{\frac{R(1-R)}{K(1-K)}}. \end{aligned} \quad (22)$$

Ze wzoru (22) wynika, że:

1. Korelacja jest dodatnia ($\rho_{XZ} > 0$), gdy $S_Q > S_R, K_R > K_Q, S_R + K_Q < 1$.
2. Korelacja jest ujemna ($\rho_{XZ} < 0$), gdy $Q_Q < S_R, K_R < K_Q, S_R + K_Q > 1$.
3. Korelacja jest równa zero ($\rho_{XZ} = 0$) gdy $S_Q = S, K_R = K_Q, R_R + K_Q = 1$.

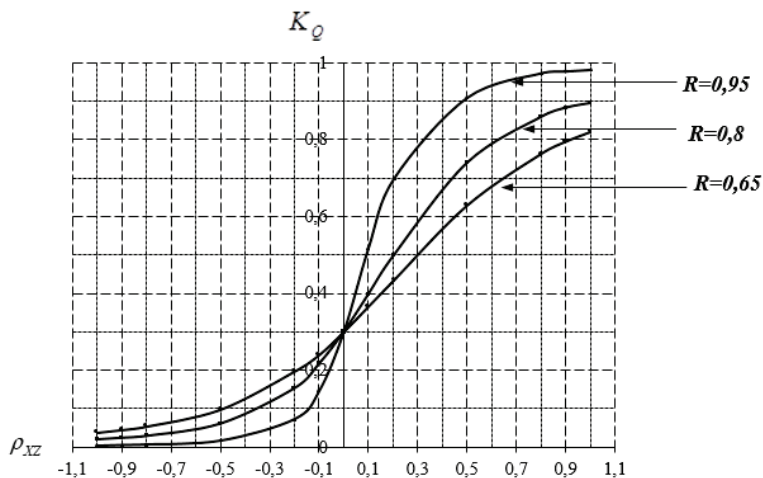
Rozwiązując równanie (22), wyznacza się zależność pomiędzy wskaźnikiem bezpieczeństwa systemu lotniczego K a wskaźnikiem nieuszkodzalności R . Zależność opisuje korelacja między stanami niezawodnościowymi i bezpieczeństwa ρ_{XZ} wobec uszkodzeń obiektu K_Q :

$$K = \frac{(1+2AK_Q) \pm \sqrt{(1+2AK_Q)^2 - 4(1+A)AK_Q^2}}{2(1+A)} \quad (23)$$

gdzie: $A = \frac{1-R}{R\rho_{XZ}^2}$.

We wzorze (23) znak „+” przyjmuje się, gdy $\rho_{XZ} > 0$, a znak „-” gdy $\rho_{XZ} < 0$.

Powyższa zależność pozwala na prezentację szeregu prawidłowości statystycznych, wynikających z modelu bezpieczeństwa i nieuszkodzalności systemu.



Rys. 3. Przebiegi funkcji K_Q dla $R = 0,65; 0,8; 0,95$

5. Wnioski

Korelacja między stanami niezawodnościowymi i bezpieczeństwa ρ_{XZ} z uwzględnieniem uszkodzeń obiektu (współczynnik K_Q) charakteryzuje związek między niezawodnością i bezpieczeństwem lotów. Z przedstawionej analizy wynika, że gdy współczynnik korelacji wzrasta, to i wskaźnik bezpieczeństwa rośnie. Wzrost bezpieczeństwa uzyskuje się poprzez wprowadzenie nadmiaru w strukturze funkcjonowania katastroficznych układów funkcjonalnych konstrukcji. Układy stanowiące rezerwę systemów podstawowych zwiększają znacznie koszty wytwarzania i zmniejszają osiągi eksploatacyjne, takie jak udźwig, zasięg, zużycie paliwa itp. Żeby układy zabezpieczające służyły niezawodnie, muszą być specjalnie traktowane w procesie eksploatacji statków powietrznych. Wymaga się, aby przy bardzo małym prawdopodobieństwie użycia miały bardzo wysokie prawdopodobieństwo poprawnego funkcjonowania. Pomimo tych zabezpieczeń i dużych starań służb technicznych zdarzają się awarie, które są przyczyną wypadków. Człowiek orzekający o stanie zdatości podstawowych i rezerwowych układów technicznych może popełnić błąd. Przykładami błędów są znane zdarzenia lądowania samolotu bez wypuszczonego podwozia na lotnisku w Warszawie i tragiczny przypadek katapultowania się pilota samolotu wojskowego, co było skutkiem błędnego diagnozowania układów zabezpieczających.

6. Literatura

1. Szczegółowe zasady funkcjonowania służby inżynierijno-lotniczej w JW1156.
2. J. Jaźwiński, Z. Smalko, J. Żurek, „Wskaźniki bezpieczeństwa konstrukcji mechanicznych.” In Proc. „Problemy niezawodności systemów: Materiały XXXV Zimowej Szkoły Niezawodności”, Szczyrk, 2007.
3. J. Żurek, „Niezawodność systemów technicznych wyposażonych w urządzenia zabezpieczające z wielokrotną próbą odparowania sytuacji niebezpiecznej”, ZEM, nr 1, 1997.
4. R. Kaleta, „Metoda analizy niezawodności eksploatacyjnej statków powietrznych na podstawie informacji zebranych z rzeczywistego procesu eksploatacji”, PhD thesis, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa, 2004.
5. J. Żurek, „Żywotność śmigłowców”. Warszawa: Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 2006.
6. E. Klich, „Wykorzystanie teorii systemowych w badaniu zdarzeń lotniczych”. In Proc. Materiały Konferencji naukowej „Rozwój Techniki, Technologii i Transportu w Lotnictwie”, Poznań 2012.
7. W. Jedynak, „Materiały konferencyjne PKBWL”, Warszawa 2014.