

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Ryszard Kaleta

**Zarys algorytmu wyznaczania wskaźników eksploatacyjnych
z doświadczenia**

Słowa kluczowe: wskaźnik eksploatacyjny, wskaźnik niezawodności, wskaźnik bezpieczeństwa, metoda bayesowska, funkcja wiodąca rozkładu

Zaprezentowano metodę wyznaczania wskaźników eksploatacyjnych z doświadczenia. Dokonano klasyfikacji wskaźników eksploatacyjnych. Przedstawiono metodę prezentacji wskaźników eksploatacyjnych z jednoczesną oceną tendencji ich zmian. Podano zasady zwiększania dokładności wskaźników eksploatacyjnych w miarę napływu informacji bieżącej oraz przykłady wyznaczania wskaźników funkcyjnych. Sformułowano wnioski.

**An Outline of Algorithm for Determining the Operating Rate
from Experience**

Key words: operating rate, reliability rate, safety rate, Bayesian method, leading distribution function

A method of determining reliability rates from real life experience has been presented in this paper. Then, reliability rates have been classified. Besides, a method of presentation of reliability rates together with the evaluation of the tendency of their changes has also been put forward. Some principles of increasing the accuracy of reliability rates in accordance with current information have been given. There is also an example of how to determine function rates. Finally, the author has formulated conclusions.

1. Wyznaczanie wskaźników eksploatacyjnych oparte na informacji źródłowej

1.1. Wskaźniki eksploatacyjnej niezawodności obiektu

Przez pojęcie wskaźnika niezawodności eksploatacyjnej obiektu rozumie się liczbową lub funkcyjną charakterystykę jego stanu niezawodnościowego (lub – w szczególnym przypadku – stanu eksploatacyjnego obiektu), utworzoną na zbiorze informacji o uszkodzeniach obiektu. Można wyróżnić wymienione niżej grupy wskaźników niezawodności eksploatacyjnej [5]:

1. Wskaźniki eksploatacyjne wykorzystywane do wyznaczania podstawowych wskaźników niezawodności. Są one wyznaczane na podstawie informacji zawartych w karcie eksploatacyjnej obiektu. Wskaźniki eksploatacyjne są oznaczone symbolem E_i ($i = 1, 2, \dots$), gdzie indeks i określa kolejny numer wskaźnika eksploatacyjnego. Wyróżnia się następujące podstawowe wskaźniki eksploatacyjne:
 - łączny czas pracy badanego zbioru obiektów w zadanym przedziale czasu eksploatacji (rok, kwartał);
 - łączna liczba uruchomień badanego zbioru obiektów (np. dla samolotów liczba starto-ładowań) w zadanym przedziale czasu eksploatacji;
 - łączna liczba obsłóg danego typu wykonywanych w zbiorze obiektów badanych w zadanym przedziale czasu eksploatacji;
 - struktura wiekowa badanego zbioru obiektów w zadanym przedziale czasu eksploatacji (w przypadku, gdy karta eksploatacyjna zawiera informacje o czasie pracy każdego badanego obiektu);
 - charakterystyki probabilistyczne procesu eksploatacji obiektu, np. modele matematyczne czasu przebywania obiektu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych, prawdopodobieństwa przebywania w określonych stanach eksploatacyjnych, prawdopodobieństwa przejścia od i -tego do j -tego stanu eksploatacyjnego ($i, j = 1, 2, \dots, N$), N – liczba różnych stanów eksploatacyjnych.
2. Bazowe wskaźniki niezawodności oznaczane symbolem U_i , gdzie i – numer kolejny wskaźnika. Można wyróżnić następujące bazowe wskaźniki niezawodności:
 - liczba uszkodzeń badanego zbioru obiektów w zadanym przedziale eksploatacji;
 - liczba uszkodzeń wykrytych w procesie funkcjonowania obiektu w zadanym przedziale czasu;

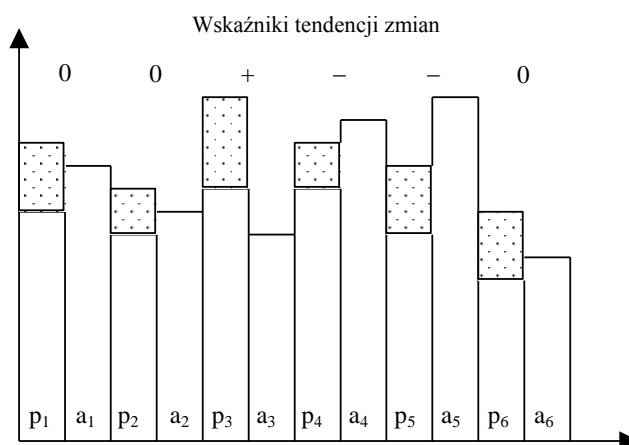
- liczba uszkodzeń występujących w procesie funkcjonowania obiektu, będących przyczyną określonych skutków dla bezpieczeństwa w zadanym przedziale czasu eksploatacji;
 - liczba uszkodzeń występujących w procesie funkcjonowania obiektu, będących przyczyną określonych skutków dla wykonania zadania w rozpatrywanym przedziale czasu eksploatacji;
 - liczba uszkodzeń określonego rodzaju, badanego zbioru obiektów w zadanym przedziale czasu;
 - liczba uszkodzeń naprawionych określoną metodą (wymiana, regulacja) badanego zbioru obiektów w zadanym przedziale czasu;
 - bazowe wskaźniki niezawodności, wyznaczone wg struktury wiekowej obiektów (w przypadku, gdy struktura ta jest wyznaczana).
3. Warunkowe wskaźniki niezawodności oznaczone symbolem U_{ij} , gdzie i – numer wskaźnika, j – numer wskaźnika odniesienia. Wskaźniki warunkowe są wyznaczone na podstawie wskaźników bazowych i są podawane zazwyczaj w procentach. Można wyróżnić przykładowo następujące warunkowe wskaźniki niezawodności:
- procentowy udział określonego rodzaju skutków dla bezpieczeństwa w odniesieniu do wszystkich uszkodzeń występujących w procesie funkcjonowania obiektu;
 - procentowy udział poszczególnego rodzaju uszkodzeń w stosunku do wszystkich rozpatrywanych uszkodzeń;
 - procentowy udział uszkodzeń określonego elementu odniesiony do wszystkich uszkodzeń obiektu.
- Tego typu wskaźniki wyznaczają relacje w układzie: „element – obiekt” i mogą być wykorzystane jako wagi służące do wyznaczania tak zwanych słabych ogniw obiektu.
4. Liczbowe bezwarunkowe wskaźniki niezawodności, oznaczane symbolem W_i , i – numer kolejny wskaźnika. Liczbowe wskaźniki niezawodności są wyznaczone jako stosunek bazowego wskaźnika niezawodności do wskaźnika eksploatacyjnego, np. liczba uszkodzeń obiektu przypadająca na jednostkę czasu pracy obiektu (albo jedno uruchomienie obiektu). Często są wykorzystywane wskaźniki będące odwrotnością wskaźnika W_i , np. czas pracy obiektu na jedno uszkodzenie. Wskaźniki te są oznaczane symbolem \bar{W}_i .
5. Funkcyjne wskaźniki niezawodności. Można wyróżnić następujące funkcyjne wskaźniki niezawodności: funkcja niezawodności – $R(t)$, funkcja intensywności uszkodzeń – $\lambda(t)$, funkcja wiodąca rozkładu – $A(t)$, funkcja odnowy – $H(t)$. Wyznaczone wartości chwilowe podanych funkcji pozwalają na graficzne zobrazowanie, które umożliwia wstępne dobranie matematycznego modelu rozkładu, a w wielu przypadkach jest wystarczający dla potrzeb prak-

tyki. Dla wymienionych klas wskaźników niezawodności są wyznaczane przedziały ufności.

1.2. Sposoby przedstawiania wskaźników niezawodności

Liczbowe wskaźniki niezawodności mogą być zestawione w tablicach lub przedstawione w postaci histogramu. Przy przedstawieniu liczbowych wskaźników niezawodności są również wyznaczane przedziały ufności. Liczbowe wskaźniki niezawodności są często zestawiane ze wskaźnikami z uprzednich analogicznych okresów czasowych. Często obok wskaźnika niezawodności jest podawany symbol tendencji zmian, wiążący obecny wskaźnik niezawodności ze wskaźnikiem niezawodności analogicznego okresu w przeszłości. Na rysunku 1 zamieszczono takie wskaźniki niezawodności dla sześciu zespołów obiektu w analogicznych przedziałach czasowych w przeszłości (p) i aktualnym (a) oraz zaznaczono tendencje zmian, ustalone według następującego algorytmu:

- 1) jeżeli wskaźnik $W_a > W_{pg}$, to występuje negatywna tendencja zmian (-), przy czym W_{pg} – górny przedział ufności dla wskaźnika z okresu poprzedniego;
- 2) jeżeli wskaźnik $W_a \in (W_{pd}, W_{pg})$, to brak tendencji zmian (0), przy czym W_{pd} – dolny przedział ufności dla wskaźnika z okresu poprzedniego;
- 3) jeżeli wskaźnik $W_a < W_{pd}$, to występuje pozytywna tendencja zmian (+).



Rys. 1. Wskaźniki typu „liczba uszkodzeń na jednostkę czasu” dla 6 obiektów z zaznaczeniem przedziałów ufności w analogicznych okresach w przeszłości (p) i aktualnych (a) oraz tendencji do zmian: negatywnej (-), pozytywnej (+), bez zmian (0)

Fig. 1 Rates like 'number of failures per unit of time' for 6 objects. There are confidence intervals in analogous past (p) and present (a) periods and the tendency to change: negative (-), positive (+) and without changes (0)

Dla wskaźników typu pozytywnego, np. niezawodność, wnioskowanie jest przeciwne. Wskaźnik negatywny, to wskaźnik „im więcej – tym gorzej” (zawodność, intensywność uszkodzeń).

Jako przykład zamieszczono jeden z uproszczonych algorytmów wnioskowania statystycznego, który zazwyczaj jest wystarczający w praktyce. W zestawieniach tabelarycznych wskaźniki mogą mieć zaznaczoną tendencję zmian w następujący sposób: $(-W)$ – negatywna tendencja zmian; $(+W)$ – pozytywna tendencja zmian; (W) – brak tendencji zmian. Wskaźniki tendencji zmian mogą być wykorzystywane do planowania przedsięwzięć zapobiegających. W przypadku zaobserwowania tendencji negatywnych, mogą być wykonywane przedsięwzięcia konstrukcyjno-eksploatacyjne, mające na celu poprawienie niezawodności zespołu. Na podstawie wyznaczonych wskaźników niezawodności, można ustalić najmocniejsze i najsłabsze ogniwa obiektu.

2. Wnioskowanie o modelach matematycznych rozkładu a priori

Dla wykorzystania metod bayesowskich istotne znaczenie odgrywa informacja a priori. Może ona występować w następujących postaciach:

- 1) funkcyjne wskaźniki eksploatacyjne,
- 2) punktowe wskaźniki eksploatacyjne,
- 3) przedziałowe wskaźniki eksploatacyjne.

Dla uzyskania określonego zbioru informacji rejestrowane są wskaźniki eksploatacyjne:

- w różnych przedziałach czasowych,
- w różnych regionach eksploatacji,
- w różnych instytucjach.

Wyznaczone wskaźniki eksploatacji W_1, W_2, \dots, W_n są porządkowane w ciąg niemalejący $W_{(1)} \leq W_{(2)} \leq \dots \leq W_{(n)}$. Dla poszczególnych wartości ciągu wskaźników, jest wyznaczana funkcja wiodąca rozkładu $\Lambda(W)$, względnie inny wskaźnik funkcyjny, np. dystrybuanta $F(W)$. Na podstawie uzyskanego wykresu wskaźnika funkcyjnego, korzystając z tablic [2], dobiera się wstępnie model matematyczny rozkładu.

Rozważmy opisaną metodę na przykładzie.

Przykład

Analiza wybranych wskaźników niezawodności i bezpieczeństwa dla samolotu myśliwskiego w zakresie urządzeń radioelektronicznych i osprzętu.

W wyniku obserwacji różnych zdarzeń lotniczych, zarejestrowano realizację w_{ij} ; $i = 1, 2, \dots, 5$; $j = 1, 2, 3, \dots, 20$ następujących wskaźników eksploatacyjnych:

- W_1 – nalot na uszkodzenie powodujące przesłankę do wypadku, na samolocie w zakresie urządzeń radioelektronicznych;
- W_2 – nalot na uszkodzenie powodujące przesłankę do wypadku, na samolocie w zakresie urządzeń osprzętu lotniczego;
- W_3 – nalot na uszkodzenie w locie, na samolocie w zakresie urządzeń osprzętu lotniczego;
- W_4 – nalot na uszkodzenie na samolocie w zakresie urządzeń osprzętu lotniczego;
- W_5 – nalot samolotu.

Dla przykładu na rysunku 2 przedstawiono dystrybuantę nalotu samolotu, wyznaczoną ze wzoru:

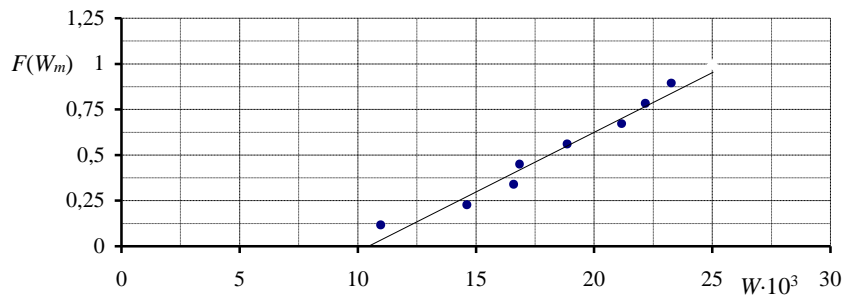
$$F(t_m) = \frac{m}{n+1}$$

Wykres wykonano według zebranych z doświadczenia danych, umieszczonych w tabeli 1.

Tabela 1

Zestawienie danych do rysunku 2
Data for Figure 2

Nalot [h]·10 ³	11,008	14,704	16,640	16,894	18,901	21,200	22,202	23,300
$F(t_m)$	0,112	0,223	0,334	0,445	0,556	0,667	0,778	0,889



Rys. 2. Wykres dystrybuanty dla czasu nalotu samolotu TS-11
Fig. 2. A graph of the cumulative distribution function of the TS-11 aircraft flight time

Istotną część dystrybuanty (wyznaczona przez punkty wykresu) w przybliżeniu jest linią prostą, z czego wynika, że wskaźnik ma rozkład równomierny:

$$F(W) = \frac{W - a}{b - a} \quad \text{dla } a < W < b \quad (4)$$

Parametry rozkładu można odczytać z wykresu rozwiązując równania:

$$F(a) = 0 \quad \text{i} \quad F(b) = 1 \quad (5)$$

Z wykresu można odczytać, że: $a = 11200$ h oraz $b = 25000$ h.

3. Kompleksowy algorytm wnioskowania o niezawodności statków powietrznych

Aktualnie są prowadzone prace nad stworzeniem algorytmu, który sekwencyjnie udoskonala dokładność wyznaczanych wskaźników eksploatacyjnych. Na rysunku 3 przedstawiono zarys takiego algorytmu. W algorytmie tym przewidziano następujące obszary:

- obszar „1” ujmuje informację eksploatacyjną z poprzednich lat (1, 2, ..., $n-1$). Jest to informacja źródłowa o zdarzeniach eksploatacyjnych, np. uszkodzeniach, wypadkach lotniczych, niewykonaniach zadań itp., oraz wskaźniki punktowe i funkcyjne wyznaczone na podstawie tej informacji;
- obszar „2” zawiera informację bieżącą z roku n . Jest to informacja o zdarzeniach eksploatacyjnych oraz o wskaźnikach punktowych i przedziałowych wyznaczonych na podstawie tej informacji;
- obszar „3”. Stosując algorytm bayesowski oraz algorytm łączenia informacji źródłowej o zdarzeniach eksploatacyjnych tworzymy nowy zestaw informacji;
- w obszarze „4” na podstawie utworzonego nowego zestawu informacji są tworzone wskaźniki punktowe i przedziałowe oraz funkcyjne, posiadające większą dokładność;
- w obszarze „5” wskaźniki wyznaczone w obszarze „4” są wykorzystywane do sterowania procesem eksploatacji statków powietrznych.

Rozważmy parę przykładów wykorzystania algorytmu [6].

Przykład 1

Z badań wstępnych wyznaczono wskaźnik przedziałowy $[\underline{W}_1, \overline{W}_1]$. W eksploatacji bieżącej obserwowano pracę N_2 obiektów (zadań), zaobserwowano m_2 zdarzeń. Łączne oszacowanie wskaźnika dane jest wzorem:

$$W_4 = \overline{W}_1 - \frac{m_2}{N_2} (\overline{W}_1 - \underline{W}_1) = \overline{W}_1 - W_2 (\overline{W}_1 - \underline{W}_2)$$

Warto zwrócić uwagę, że gdy $W_2 \rightarrow 0$, to $W_4 \rightarrow \overline{W}_1$, a gdy $W_2 \rightarrow 1$, to $W_4 \rightarrow \underline{W}_1$.

Przykładowo dla danych: $\overline{W}_1 = 0,8$; $\underline{W}_1 = 0,5$; $m_2 = 2$; $N_2 = 10$ otrzymamy $W_4 = 0,74$.



Rys. 3. Algorytm analizy wskaźników eksploatacyjnych
 Fig. 3 An algorithm for reliability rates analyses

Przykład 2

W badaniach wstępnych wyznaczono wskaźnik przedziałowy $[\underline{W}_1, \overline{W}_1]$. Z badań bieżących wyznaczono wskaźnik przedziałowy $[\underline{W}_2, \overline{W}_2]$. Łączny wskaźnik przedziałowy wyznaczymy ze wzoru:

$$\underline{W}_4 = \underline{W}_1 + \underline{W}_2(\overline{W}_1 - \underline{W}_1)$$

$$\overline{W}_4 = \underline{W}_1 + \overline{W}_2(\overline{W}_1 - \underline{W}_1)$$

Rozważmy niektóre dane liczbowe:

1) $\underline{W}_1 = 0,2$; $\overline{W}_1 = 0,8$

Z badań bieżących uzyskano: $\overline{W}_2 = 0,64$, $\underline{W}_2 = 0,4$.

Stąd uzyskujemy:

$$\underline{W}_4 = 0,2 + 0,4(0,8 - 0,2) = 0,44$$

$$\overline{W}_4 = 0,2 + 0,64(0,8 - 0,2) = 0,584$$

2) $\underline{W}_1 = 0,6$; $\overline{W}_1 = 0,8$

Z badań bieżących uzyskano: $\overline{W}_2 = 0,64$, $\underline{W}_2 = 0,4$.

Stąd uzyskujemy:

$$\underline{W}_4 = 0,6 + 0,4 \cdot 0,2 = 0,68$$

$$\overline{W}_4 = 0,6 + 0,64 \cdot 0,2 = 0,728$$

3) $\underline{W}_1 = 0,6$; $\overline{W}_1 = 0,8$;

Z badań bieżących uzyskano: $\underline{W}_2 = 0,4$; $\overline{W}_2 = 0,7$.

Stąd uzyskujemy:

$$\underline{W}_4 = 0,6 + 0,4(0,2) = 0,6 + 0,08 = 0,68$$

$$\overline{W}_4 = 0,6 + 0,7 \cdot 0,2 = 0,6 + 0,14 = 0,74$$

W pracy [6] wykazuje się, że uzyskane oszacowania charakteryzują się większą dokładnością.

Wnioski

1. Proponowany algorytm wymaga wyznaczenia modelu matematycznego rozkładu wskaźników niezawodności. Taka postać informacji apriorycznej pozwala wykorzystać metody bayesowskie do wyznaczenia wskaźników eksploatacyjnych.
2. Istniejący wieloletni bank informacji o uszkodzeniach statków powietrznych pozwala wyznaczyć modele matematyczne rozkładu dla wielu wskaźników punktowych i przedziałowych.

3. W istniejącym parku wojskowych statków powietrznych zdefiniowanych jest kilka tysięcy wskaźników eksploatacyjnych, co wskazuje na złożoność zastosowania danego algorytmu w praktyce.

Literatura

1. Jaźwiński J., Kaleta R., Żurek J., *Bayesian methods as applied to research into reliability of aeronautical systems*, Materiały Konferencyjne "Safety and Reliability International Conference" KONBiN 2003, Gdynia 2003.
2. Jaźwiński J., Migdalski J., Wieremiejczyk W., *Tablice statystyczne do oceny niezawodności obiektów nienaprawialnych*, Tom 1, ITWL, Warszawa 1971.
3. Jaźwiński J., Smalko Z., *Wykorzystanie rozkładu trójkątnego w modelowaniu bezpieczeństwa zadania transportowego*, Materiały VI Sympozjum Bezpieczeństwa Systemów, Kiekrz 1996.
4. Kiliński A., *Definicje opisowo-analityczne i wartościująco-normatywne podstawowych pojęć teorii niezawodności*, Prakseologia, nr 38, 1971.
5. *Poradnik inżyniera niezawodności*, pod red. J. Migdalskiego, Akademia Rolniczo-Techniczna Bydgoszcz, „Zetom”, Warszawa 1992.
6. Prohorenko V. A., Golikov V. F., *U et apriornoj informacii pri ocenke nadehnosti*. Nauka i Technika, Minsk 1979.

Praca zrealizowana w ramach grantu promotorskiego nr 5T12C 030 24.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. AM

dr hab. Zenon Zwierzewicz, prof. AM

Adres Autora

mgr inż. Ryszard Kaleta

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

ul. Księcia Bolesława 6, skr. p. 96, 01-494 Warszawa

tel.: (0 22) 685 30 25, fax. (0 22) 685 21 63

e-mail: airteam@itwl.polbox.pl