



## Wprowadzenie do oceny stanu gotowości do pracy i niezawodności użycia fotela katapultowego dla ratowania życia pilota

STANISŁAW SZAJNAR

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, Instytut Techniki Lotniczej,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zarys metody szacowania prawdopodobieństwa ratowania życia pilota przy pomocy fotela katapultowego w przypadku awarii (uszkodzenia) statku powietrznego. Założono, że efektywne użycie fotela katapultowego zależy głównie od:

- 1) jakości stanu technicznego fotela katapultowego w chwili potrzeby jego wykorzystania (stanu gotowości do użycia);
- 2) niezawodności działania w trakcie jego użycia w warunkach przewidywanych przez producenta do chwili otwarcia spadochronu;
- 3) jakości spadochronu gwarantującego miękkie lądowanie.

Przyjęto, że przez pojęcie jakości fotela katapultowego rozumie się zbiór własności określających stopień zdolności fotela katapultowego do zastosowania go zgodnie z przeznaczeniem.

Przedstawiono opisy prawdopodobieństwa zajścia poszczególnych zdarzeń oraz częstościowy opis gotowości fotela do pracy i realizacji zadania ratowania życia pilota.

**Słowa kluczowe:** mechanika, bezpieczeństwo, katapultowanie, fotel katapultowy

**Symbole UKD:** 629.735.33.067

### 1. Wstęp

Fotele katapultowe będące integralną częścią wojskowych statków powietrznych są złożonym urządzeniem lotniczym przeznaczonym do ratowania życia pilota w przypadku awarii lub celowego, destrukcyjnego działania przeciwnika.

Wymagają one specjalnego traktowania w procesie eksploatacji statków powietrznych, sprowadza się ono do:

- utrzymania ich w odpowiednim stanie gotowości do użycia w przypadku zagrożenia życia pilota;
- utrzymania ich na wysokim poziomie gotowości, tak aby w przypadku ich użycia w czasie awarii statku (zagrożenia życia pilota) umożliwić przeżycie pilotowi.

Efektywne użycie fotela katapultowego zależy głównie od:

- jakości stanu technicznego fotela katapultowego w chwili potrzeby jego wykorzystania (stanu gotowości do użycia);
- niezawodności działania w trakcie jego użycia w warunkach przewidywanych przez producenta do otwarcia spadochronu;
- jakości spadochronu gwarantującego miękkie lądowanie.

Przez pojęcie jakości fotela katapultowego rozumie się zbiór własności określających stopień zdolności fotela katapultowego do zastosowania go zgodnie z przeznaczeniem.

Realizacja zadania przez fotel katapultowy w tym ujęciu związana jest z następującymi zdarzeniami:

**A** — zdarzenie, że fotel katapultowy zamontowany na statku powietrznym nie ma uszkodzeń w chwili potrzeby jego użycia (czyli jest w stanie gotowości);

**B** — zdarzenie polegające na tym, że fotel katapultowy będzie pracował bez uszkodzeń w czasie katapultowania i w wyniku tego działania pilot wraz z fotelem znajdzie się w odpowiedniej odległości (bezpiecznej) od uszkodzonego statku powietrznego;

**C** — zdarzenie polegające na tym, że zadziała spadochron (rozwinie się główny spadochron ratunkowy) i umożliwi łagodne lądowanie pilotowi.

Fotel wykona zadanie, jeżeli w procesie katapultowania wystąpią wszystkie wyznaczone zdarzenia.

Miarą skutecznego katapultowania jest prawdopodobieństwo wykonania zadania i określić je można następująco:

$$P_{KS} = P(A) \cdot P(B/A) \cdot P(C/A \cap B), \quad (1)$$

gdzie:  $P_{KS}$  — prawdopodobieństwo skutecznego katapultowania;

$P(A)$  — prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia A — fotel katapultowy jest gotowy do działania w przypadku zagrożenia;

$P(B/A)$  — warunkowe prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia B

pod warunkiem zajścia zdarzenia A. Wzór obliczeniowy przyjmuje postać:

$$P(B/A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}; \quad (2)$$

$P(C/A \cap B)$  — warunkowe prawdopodobieństwo zdarzenia C (łagodne lądowanie pilota) pod warunkiem zajścia zdarzenia A i B.

Wzór obliczeniowy przyjmuje postać:

$$P(C/A \cap B) = \frac{P(A \cap B \cap C)}{P(A \cap B)}. \quad (3)$$

Podstawiając (2) i (3) do (1), otrzymujemy:

$$P_{ks} = P(A) \cdot \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \cdot \frac{P(A \cap B \cap C)}{P(A \cap B)} = P(A \cap B \cap C). \quad (4)$$

Naszym zadaniem będzie więc określenie wyżej wymienionych prawdopodobieństw.

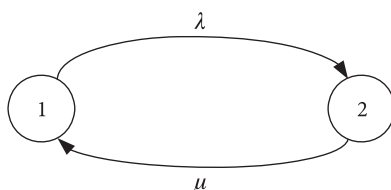
## 2. Wyznaczenie prawdopodobieństwa gotowości fotela do pracy (użycia)

Stan gotowości fotela katapultowego podlega odpowiedniej kontroli, polegającej na sprawdzeniu, czy parametry diagnostyczne posiadają odpowiednie wartości. W przypadku odstępstwa od wymagań fotel jest naprawiany.

Można więc wyznaczyć stan gotowości fotela do użycia (przygotowany do lotu statku powietrznego), gdy wszystkie parametry diagnostyczne co do wartości spełniają obowiązujące wymagania, oraz stan niegotowości, gdy wymagania nie są spełnione. W przypadku nieprzygotowania fotela do pracy podlega on naprawie.

Schemat utrzymania stanu gotowości fotela do pracy przedstawiony jest na rysunku 1.

Niech  $P_1(t)$  oznacza prawdopodobieństwo przebywania fotela katapultowego w stanie „1”, zaś  $P_2(t) = 1 - P_1(t)$  prawdopodobieństwo przebywania fotela w stanie „2”. Czas  $t$  jest czasem znajdowania się fotela w czasie eksploatacji (czyli staż fotela).



Rys. 1. Schemat utrzymania stanu gotowości fotela w procesie eksploatacji wojskowych statków powietrznych, gdzie: 1 — stan gotowości fotela; 2 — stan niegotowości fotela;  $\lambda$  — intensywność utraty stanu gotowości fotela;  $\mu$  — intensywność przywracania stanu gotowości fotela (naprawy)

Prawdziwe jest następujące równanie stanu:

$$P_1(t + \Delta t) = [1 - \lambda\Delta t] P_1(t) + \mu\Delta t P_2(t) + 0(\Delta t), \quad (5)$$

gdzie:  $\lambda\Delta t \leq 1$  — prawdopodobieństwo utraty stanu gotowości w przedziale czasu  $\Delta t$ ;  
 $[1 - \lambda\Delta t]$  — prawdopodobieństwo nienastąpienia stanu gotowości fotela w przedziale czasu o długości  $\Delta t$ ;  
 $\mu\Delta t$  — prawdopodobieństwo przywrócenia stanu gotowości w przedziale czasu o długości  $\Delta t$ ;  
 $0(\Delta t)$  — mała wielkość rzędu wyższego.

Po podzieleniu obu stron równania (5) przez  $\Delta t$  i uporządkowaniu zapisu i po przejściu do granicy  $\Delta t \rightarrow 0$ , otrzymujemy następujące równanie różniczkowe:

$$P_1'(t) = -\lambda P_1(t) + \mu P_2(t). \quad (6)$$

Podstawiając w równaniu (6) za  $P_2(t) = 1 - P_1(t)$ , otrzymujemy równanie:

$$P_1'(t) + (\lambda + \mu)P_1(t) = \mu. \quad (7)$$

Rozwiązanie równania (7) jest poszukiwanym prawdopodobieństwem przebywania fotela w stanie gotowości. Postać wzoru jest następująca:

$$P_1(t) = P(A) = \frac{\mu + \lambda e^{-(\lambda+\mu)t}}{\mu + \lambda}. \quad (8)$$

Przy  $t \rightarrow \infty$  otrzymujemy stacjonarną wartość prawdopodobieństwa przebywania fotela w stanie gotowości:

$$P(A) = K_g = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad (9)$$

gdzie:  $K_g$  — współczynnik gotowości określany jako prawdopodobieństwo przebywania fotela w stanie gotowości.

Dla rozkładu wykładniczego można napisać:

$$\lambda = \frac{1}{T_1}, \quad \mu = \frac{1}{T_2}, \quad (10)$$

gdzie:  $T_1$  — wartość średnia czasu przebywania fotela w stanie gotowości;  
 $T_2$  — wartość średnia czasu przebywania fotela w stanie niegotowości.

Stąd:

$$P(A) = \frac{\frac{1}{T_2}}{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}} = \frac{T_1}{T_1 + T_2}. \quad (11)$$

Gdy średni czas napraw fotela będzie mały, to zależność (11) można oszacować zależnością:

$$P(A) \approx \frac{T_1}{T_2} \approx 1. \quad (12)$$

### 3. Określenie prawdopodobieństwa zdarzenia $P(B/A)$

Jeżeli zdarzenie A zostało spełnione, to powstaje szansa zajścia zdarzenia B. Zdarzenie B będzie polegało na tym, że fotel będzie pracował bez uszkodzeń w pewnym przedziale czasu i w wyniku tego pilot znajdzie się w bezpiecznej odległości od uszkodzonego statku powietrznego, zapewniając wykonanie następnego etapu, tj. otwarcia spadochronu.

Zdarzenie B polega na wykonaniu następujących czynności:

- zadziałanie układów mocujących pilota do fotela,
- usunięcie wiatrochronu (owiewki),
- zadziałanie układu (układów) napędowego fotela,
- zadziałanie układu stabilizacji na torze lotu fotela,
- odblokowanie układów mocujących pilota do fotela,
- oddzielenie pilota od fotela.

W wyniku zajścia wyżej wymienionych czynności pilot znajdzie się w bezpiecznej odległości od uszkodzonego statku powietrznego w odpowiednim czasie.

Zdarzenie B będzie polegało na tym, że wszystkie wymienione czynności wykonane będą bez uszkodzenia w pewnym przyjętym czasie zwanym czasem katapultowania.

Dla określenia tego prawdopodobieństwa posłużymy się intensywnością uszkodzeń:

$$\chi(z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{P(z < Z \leq z + \Delta z / z < Z)}{\Delta z}, \quad (13)$$

gdzie:  $Z$  — zmienna losowa czasu do uszkodzenia podczas katapultowania (w trakcie realizacji zdarzenia B);  
 $z$  — wartość bieżąca czasu katapultowania;

$P(z < Z \leq z + \Delta z / z < Z)$  — warunkowe prawdopodobieństwo powstania uszkodzenia w przedziale czasu  $z < Z < Z + \Delta z$ , pod warunkiem że zmienna losowa  $Z$  jest większa od  $z$ , tj.  $Z > z$ ;  
 $\Delta z$  — przyrost czasu katapultowania.

Warunkowe prawdopodobieństwo można przedstawić w postaci:

$$P(z < Z < z + \Delta z / Z > z) = \frac{P(z < Z < z + \Delta z)}{P(Z > z)}. \quad (14)$$

Podstawiając (14) do (13), otrzymujemy:

$$\chi(Z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{P(z < Z < z + \Delta z)}{\Delta z P(Z > z)}. \quad (15)$$

W zależności (15) po przejściu do granicy  $\Delta z \rightarrow 0$  otrzymujemy:

$$\chi(z) \approx \frac{f(z)}{R(z)} = \frac{-R'(z)}{R(z)}. \quad (16)$$

Stąd otrzymujemy następujące równanie różniczkowe:

$$R'(z) + \chi(z)R(z) = 0. \quad (17)$$

Równanie (17) dla warunku początkowego  $R(z=0) = 1$  ma następujące rozwiązanie. Ponieważ warunek początkowy zakłada, że zostało wykonane zdarzenie B, więc:

$$R(z) = e^{-\int_0^z \chi(z) dz}, \quad (18)$$

gdzie:  $R(z)$  — prawdopodobieństwo wykonania zdarzenia B w przedziale czasu  $(0, z)$ .

Przyjmując, że czas wykonania zdarzenia B wynosi  $z = Z_k$  oraz że intensywność możliwości uszkodzenia (czyli niewykonania zdarzenia B) jest stała  $\chi^*$ , mamy:

$$P(B/A) = R_{Z_k} = e^{-\chi^* Z_k}. \quad (19)$$

Prawdopodobieństwo nieudanego katapultowania w przedziale czasu  $(0, Z_k)$  będzie:

$$Q_{Z_k} = 1 - e^{-\chi^* Z_k}. \quad (20)$$

Zależność (20) określa prawdopodobieństwo nieudanego katapultowania ograniczonego do zdarzenia B.

#### 4. Określenie prawdopodobieństwa zdarzenia C pod warunkiem zajścia zdarzenia A i B

Jeżeli zaszło zdarzenie A i następnie zdarzenie B, to wówczas stworzone są warunki, aby zrealizować zdarzenie C, tzn. spadochron otworzył się w bezpiecznej odległości od uszkodzonego statku i w wyniku tego procesu nastąpiło miękkie lądowanie pilota.

Zdarzenie C polega na wykonaniu następujących czynności:

- oddalenie się pilota od fotela, aby nie doszło do kolizji z rozwijanym spadochronem,
- zdjęcie pokrowca z upakowanego spadochronu,
- rozwinięcie się czaszy spadochronu,
- wyhamowanie prędkości opadania pilota na spadochronie.

W związku z powyższym wydaje się, że dla spadochronu (zdarzenia C) możemy zastosować ten sam sposób postępowania jak dla realizacji zdarzenia B.

Stąd prawdopodobieństwo  $P(C/A \cap B)$  możemy oszacować zależnością:

$$P(C/A \cap B) = e^{-\hat{\lambda} \hat{z}_s}, \quad (21)$$

gdzie:  $\hat{\lambda}$  — intensywność uszkodzenia (zakłócenia) procesu pracy spadochronu;  
 $\hat{z}_s$  — czas trwania procesu związanego z wykorzystaniem spadochronu.

Łączny czas katapultowania będzie wynosił:

$$\tau = Z_k + \hat{z}_s, \quad (22)$$

gdzie:  $\tau$  — czas katapultowania (zmienna losowa).

Wykorzystując otrzymane dotychczas cząstkowe zależności, można napisać zależność (1) w postaci:

$$P_{KS} = \frac{T_1}{T_1 + T_2} e^{-\chi^* Z_k} e^{-\hat{\lambda} \hat{z}_s}. \quad (23)$$

Jeżeli prawdopodobieństwo utrzymania fotela w stanie gotowości na poziomie  $P(A) = 1$ , to zależność (23) przyjmuje postać:

$$\hat{P}_{KS} = e^{-(\hat{\chi}^2 Z_k + \hat{\lambda} \hat{z}_s)}. \quad (24)$$

## 5. Częstościowy opis gotowości fotela do pracy i realizacji zadania ratowania życia pilota

Miarą skuteczności katapultowania określono zależność (1) o postaci:

$$P_{KS} = P(A) \cdot P(B/A) P(C/A \cap B).$$

Prawdopodobieństwo zajścia zdarzeń A, B i C można określić na podstawie częstości występowania tych zdarzeń przy dużej liczbie doświadczeń.

Niech  $n$  będzie liczbą statków powietrznych (na których znajdują się fotele katapultowe), które znalazły się w takiej sytuacji, że pilot zmuszony był do katapultowania.

Przed rozpoczęciem katapultowania  $m$  spośród  $n$  foteli okazało się sprawnych i można było przystąpić do katapultowania. Czyli prawdopodobieństwo gotowości fotela  $P(A)$  można oszacować:

$$P(A) = \frac{m}{n}. \quad (25)$$

Następnie okazało się, że z  $m$  foteli katapultowych tylko  $k$  wykonało zadanie (zostały wykonane czynności przewidziane do realizacji w zdarzeniu B).

Stąd prawdopodobieństwo  $P(B/A)$  można oszacować w postaci:

$$P(B/A) = \frac{k}{m}. \quad (26)$$

Z  $k$  foteli, które zrealizowały zdarzenie B, tylko w  $q$  wystąpiła prawidłowa praca spadochronu, czyli zostało wykonane zdarzenie C. Stąd:

$$P(C/A \cap B) = \frac{q}{k}. \quad (27)$$

Uwzględniając powyższe, to prawdopodobieństwo tego, że  $n$  foteli (użytych na statkach powietrznych) wykona zadanie, będzie można napisać w postaci:

$$P_{KS} = \frac{m}{n} \cdot \frac{k}{m} \cdot \frac{q}{k} = \frac{q}{n}, \quad (28)$$

gdzie:  $n \geq m \geq k \geq q$ .



Przeważnie w warunkach działań zbrojnych występuje deficyt czasu na przygotowanie sprzętu do lotu.

W tym przypadku do oceny skuteczności działania fotela trzeba użyć zależności (28).

Aby zwiększyć prawdopodobieństwo należytego działania należy nie dopuścić do tego, aby  $P(A)$  było mniejsze od jedności (czyli dostarczać na samolot w pełni sprawne fotele). W tym przypadku wzór (28) przyjmuje postać:

$$P'_{KS} = \frac{k}{m} \cdot \frac{q}{k} = \frac{q}{m}, \quad (29)$$

gdzie:  $P'_{KS} \geq P_{KS}$ .

Dla tak określonego prawdopodobieństwa należy jeszcze określić wartość średnią i wariancję.

## 6. Podsumowanie

W niniejszym opracowaniu przedstawiono zarys metody szacowania prawdopodobieństwa ratowania życia pilota przy pomocy fotela katapultowego w przypadku awarii (uszkodzenia) statku powietrznego. Przedstawione zależności wymagają dalszego analizowania przedstawionego zapisu w celu doskonalenia otrzymanych zależności. Fotel katapultowy jest systemem do awaryjnego stosowania tylko wtedy, gdy innych rozsądnych możliwości nie ma.

Bezpieczeństwo pilota w czasie lotu statku powietrznego zależy od niezawodności samego statku oraz fotela katapultowego.

Statek powietrzny i fotel pod względem niezawodnościowym tworzą strukturę równoległą. Wzór obliczeniowy bezpieczeństwa pilota można w tym przypadku przedstawić następująco:

$$P_{BP} = R_t(\tau) + (1 - R_t(\tau)) \cdot P_{KS}, \quad (30)$$

gdzie:  $P_{BP}$  — prawdopodobieństwo tego, że w pojedynczym wylocie pilot w przypadku awarii przeżyje;

$R_t(\tau)$  — prawdopodobieństwo niezawodnej pracy statku w czasie trwania lotu o długości  $\tau$ ;

$P_{KS}$  — prawdopodobieństwo udanego katapultowania określone zależnościami (24) lub (29).

## LITERATURA

- [1] H. TOMASZEK, S. STĘPIEŃ, *Probabilistyczna metoda opisu wzrostu pęknięcia i oceny trwałości elementów mechanicznych w ujęciu dwuwymiarowym*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 1, 129, 2002.
- [2] H. TOMASZEK, S. STĘPIEŃ, *Zarys metody oceny niezawodności wybranej klasy lotniczych obiektów technicznych na podstawie informacji diagnostycznych*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 2, 130, 2002.
- [3] H. TOMASZEK, S. STĘPIEŃ, *Zarys metody prognozy trwałości resztkowej wybranych typów obiektów lotniczych eksploatowanych zgodnie ze strategią według stanu technicznego*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 1, 137, 2004.
- [4] H. TOMASZEK, L. LOROCH, M. JASZTAŁ, *Modele powstawania uszkodzeń katastroficznych w urządzeniach lotniczych*, Problemy eksploatacji, 3, 2005, 193-202.
- [5] H. TOMASZEK, A. SKOMRA, S. STĘPIEŃ, *Zarys metody określania niezawodności wybranych systemów kierowania rakiet lotniczych*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 2, 142, 2005.
- [6] L. ŚNIEŻEK, S. STĘPIEŃ, P. KULEC, *A probabilistically approached forecast of the fatigue life of notched members*, Technical Science, 9, 2006.
- [7] H. TOMASZEK, R. SZCZEPANIK, M. JASZTAŁ, *Zarys metody określania rozkładu czasu narastania pęknięcia elementu do wartości granicznej w warunkach zmęczenia w procesie eksploatacji statku powietrznego*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, vol. 41, 3, 147, 2006, 81-89.
- [8] H. TOMASZEK, J. ŻUREK, M. JASZTAŁ, *A method of estimating the risk of a catastrophic failure to engine's rotating members as related to fatigue — an outline*, Journal of KONES Powertrain and Transport, 14, 2, Warszawa, 2007, 505-511.
- [9] H. TOMASZEK, J. ŻUREK, M. JASZTAŁ, *Prognozowanie uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu lotów statków powietrznych*, Wydawnictwo Naukowe ITE, Radom, 2008.
- [10] S. SZAJNAR, M. WOJTKOWIAK, *Problemy bezpieczeństwa załogi statku powietrznego w sytuacjach awaryjnych*, Wydawnictwo BIL-GRAF, Warszawa, 1999.

S. SZAJNAR

### Introduction to readiness state assessment and reliability of ejection seat used for pilot life rescue

**Abstract.** The outline of the assessment of probability pilot life rescue with ejection seat used during aircraft failure (damage) has been presented in this paper.

Author assumed that effective use of ejection seat depends on:

- 1) technical state of ejection seat at the instant of its use (readiness state);
- 2) reliability of using under manufacturer conditions before parachute opening;
- 3) quality of parachute ensuring soft landing.

Author assumed that quality of parachute was a set of properties determining the degree of ability to use it in accordance with its designation.

The paper presents description of the probability of taking place events and ejection seat readiness rate description and realization of pilot life rescue.

**Keywords:** mechanics, safety, ejection, ejection seat

**Universal Decimal Classification:** 629.735.33.067