

dr inż. Sławomir Stępień

Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Polska
E-mail: [sstepien@wat.edu.pl](mailto:ssstepien@wat.edu.pl), tel. +48 261 83 77 89

dr inż. Stanisław Szajnar

Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Polska
E-mail: sszajnar@wat.edu.pl, tel. +48 261 83 98 43

dr inż. Michał Jaształ

Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Polska
E-mail: mjaształ@wat.edu.pl, tel. +48 261 83 77 89

Problems of military aircraft crew's safety in condition of enemy counteraction Problemy bezpieczeństwa załogi wojskowego statku powietrznego w warunkach przeciwdziałania przeciwnika

Keywords: *military aircraft crew, safety, ejection seat, durability, probability.*

Abstract: The presented paper consists outline of the probabilistic method of evaluation of military aircraft crew's safety, which took into consideration enemy counteraction. The specific attention was focused on estimation of durability of ejection seat, which is a means of pilot's emergency escape from aircraft. The basis of the presented model is probability of pilot's danger to life for single sortie caused by enemy. Formulated differentiation equation characterises process of increment of successful sortie number. The equation after transformation into partial differential equation served for establishing of successful sortie distribution function and subsequently for calculation of crew safety indicators.

Słowa kluczowe: *załoga wojskowego statku powietrznego, bezpieczeństwo, fotel katapultowy, trwałość, prawdopodobieństwo.*

Streszczenie: W artykule przedstawiono zarys probabilistycznej metody oceny bezpieczeństwa załogi wojskowego statku powietrznego uwzględniającej niszcące działanie przeciwnika. Największą uwagę skupiono na szacowaniu trwałości fotela katapultowego jako środka do awaryjnego opuszczania samolotu przez pilota. Podstawą prezentowanego modelu jest prawdopodobieństwo powstania zagrożenia dla życia pilota w pojedynczym locie statku powietrznego spowodowane przeciwdziałaniem przeciwnika. Sformułowano równanie różnicowe charakteryzujące w ujęciu probabilistycznym proces przyrostu liczby udanych lotów bojowych statku powietrznego. Równanie to po przekształceniu w równanie różniczkowe cząstkowe, posłużyło do wyznaczenia funkcji rozkładu udanych lotów bojowych, a następnie wskaźników bezpieczeństwa załogi.

1. Wprowadzenie

Bezpieczeństwo załogi (pilota) statku powietrznego jest problemem złożonym. Złożoność problemu wynika z potrzeby ratowania życia załogi w warunkach dynamicznych związanych z powstaniem sytuacji awaryjnych, gdy czas na podjęcie decyzji może być bardzo krótki [1,8-9,16-17,]. Nie do pominięcia są więc również elementy „czynnika ludzkiego” [3,14]. Światowe piśmiennictwo dotyczące tej problematyki ma charakter interdyscyplinarny i odnosi się do tych zagadnień w sposób ogólny i często wyłącznie opisowy. W lotnictwie dla ratowania życia pilota w sytuacjach awaryjnych stosowane są specjalne urządzenia zwane fotelami katapultowymi (wyrzucanymi). Montowane są one tylko na wojskowych statkach powietrznych, co często może ograniczać dostęp do informacji na temat ich wykorzystania. Specjalistyczna literatura z tego zakresu nie jest więc zbyt obszerna.

W Polsce, prace o charakterze praktycznym i aplikacyjnym z tego zakresu prowadzone były głównie w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych, a przed laty również w Instytucie Lotnictwa, natomiast badania o charakterze analitycznym w Wojskowej Akademii Technicznej, w Wojskowym Instytucie Medycyny Lotniczej i na Politechnice Warszawskiej oraz w innych ośrodkach zajmujących się techniką lotniczą jak np. Politechnika Rzeszowska.

W literaturze światowej można znaleźć publikacje odnoszące się do różnych obszarów problematyki katapultowania. W szeregu z nich porusza się kwestie antropometryczne związane z katapultowaniem [4], kwestie medyczne oraz uwarunkowania jakie mogą wystąpić podczas katapultowania [2,3,7,10-14,22-24]. Występują również publikacje odnoszące się do zebranych doświadczeń z pola walki [13,22]. Jednym z kierunków badań jest także komputerowe modelowanie procesu katapultowania [5,6,9,15,25,26], które umożliwia symulowanie różnorodnych scenariuszy tego procesu, analizę warunków bezpiecznego opuszczania samolotu oraz badanie czynników oddziałujących na organizm pilota w różnych sytuacjach związanych z katapultowaniem. Ogromna różnorodność powstałych opracowań potwierdza interdyscyplinarność tematyki.

W literaturze krajowej, przeważająca część publikacji dotyczy problematyki medycznej procesu katapultowania i została opublikowana przez pracowników naukowych Wojskowego Instytutu Medycyny Lotniczej [23,24]. Dostępne są również instrukcje eksploatacyjne dla poszczególnych typów foteli katapultowych. Jednakże, niezwykle rzadko, publikowane są opracowania na temat ilościowej oceny bezpieczeństwa załogi w aspekcie użycia fotela katapultowego [18], która jest tematem niniejszego artykułu.

Obecnie na świecie stosuje się różne typy foteli katapultowych, na różnych rodzajach wojskowych statków powietrznych. Fotele katapultowe różnią się rozwiązaniami konstrukcyjnymi, gabarytami (wielkością, masą), przyjętym systemem stabilizacji, wyposażeniem ratowniczym oraz wyposażeniem dodatkowym [17,19]. Bezpośrednią inspiracją do prowadzenia badań w zakresie rozwoju foteli katapultowych jest potrzeba nieustannej modernizacji samolotów wojskowych w celu poprawy ich osiągnięć i efektywności działania, co pociąga za sobą konieczność doskonalenia podsystemów awaryjnego ich opuszczania [21]. W trakcie modernizacji pojawia się pytanie: W jaki sposób można określić bezpieczeństwo pilota wojskowego statku powietrznego wyposażonego w dany system ratowniczy?

Aktualnie, o tym jaki typ fotela jest zainstalowany na danym statku powietrznym decydują najczęściej: rodzaj statku powietrznego (kto jest jego producentem) i możliwości taktyczno-techniczne oraz uwarunkowania ekonomiczne. Zdarza się również, że na tym samym rodzaju statku powietrznego instalowane są różne typy foteli, które są wytwarzane przez różnych producentów. Ponadto, każdy z producentów ma w swojej ofercie od kilku do kilkunastu typów foteli co powoduje znaczną różnorodność możliwych rozwiązań technicznych [19]. Przystępując do analizy bezpieczeństwa załogi samolotu wojskowego, należy również uwzględnić odmienną naturę zadań realizowanych w czasie pokoju oraz w czasie wojny. Nasuwają się więc kolejne pytania: W jaki sposób oceniać bezpieczeństwo załogi statku powietrznego? Jakie narzędzie do takiej oceny zastosować? Stąd też, autorzy niniejszego opracowania przystąpili do opracowania metody (sposobu) pozwalającej na taką ocenę, która byłaby pomocna w planowaniu wykorzystania oraz w procesie modernizacji statków powietrznych i ich systemów ratowniczych.

Prezentowana metoda opiera się na rachunku probabilistycznym, w którym uwzględniono niezawodność statku powietrznego oraz niezawodność fotela katapultowego. Otrzymane rozwiązania nie wyczerpują w pełni podjętego problemu, jednakże stanowią pewien postęp w szukaniu odpowiedzi na postawione pytania i są inspiracją do stawiania (formułowania) kolejnych kwestii do rozstrzygnięcia, związanych z użyciem foteli katapultowych do ratowania życia załogi statku powietrznego.

Fotele katapultowe są złożonymi obiektami technicznymi, które stanowią istotny element wyposażenia samolotu i pozwalają pilotowi w krótkim czasie opuścić statek powietrzny w sytuacjach zagrożenia jego życia. Tak więc przyjęto, że o bezpieczeństwie pilota w czasie lotu decydują:

- 1) niezawodność statku powietrznego;

- 2) niezawodność fotela katapultowego;
- 3) oraz stan zdrowia pilota i opanowanie w sytuacjach awaryjnych [1].

Dodatkowo w przypadku przeciwdziałania przeciwnika na bezpieczeństwo pilota mają wpływ:

- 1) wrażliwość statku powietrznego na zniszczenie przez przeciwnika;
- 2) zdolność do samoobrony;
- 3) efektywność oddziaływania przeciwnika na statek powietrzny w celu jego zniszczenia w czasie działań bojowych;
- 4) jakość organizacji ruchu lotniczego (dynamika działania) i umiejętności załóg [18].

Będziemy rozpatrywali bezpieczeństwo pilota, gdy będą spełnione następujące założenia:

- 1) na lotnisku (miejscu bazowania) możliwość zniszczenia statku powietrznego (jak również fotela katapultowego) jest pomijalna;
- 2) statek powietrzny jest niszczone przez przeciwnika w czasie wykonywania zadania bojowego;
- 3) prawdopodobieństwo zniszczenia statku powietrznego w czasie jednego lotu bojowego wynosi Q , przy czym zachowana jest sprawność fotela katapultowego (istnieje możliwość jego wykorzystania);
- 4) fotel katapultowy jest urządzeniem jednorazowego użytku (po katapultowaniu ulega zniszczeniu);
- 5) trwałość fotela jest również determinowana trwałością statku powietrznego.

Wiodącą rolę w ocenie bezpieczeństwa pilota odgrywa trwałość statku powietrznego, którą określa się jako liczbę lotów lub nalot do chwili zniszczenia statku w warunkach działań bojowych. Czas „życia” fotela katapultowego można mierzyć liczbą udanych lotów statku powietrznego do chwili jego zniszczenia. Zadaniem niniejszego artykułu będzie określenie trwałości fotela w wyżej określonym zakresie i wyznaczenie wskaźników bezpieczeństwa załogi.

2. Metoda oceny trwałości z wykorzystaniem równania różnicowego

W tym miejscu przedstawiono sposób wyznaczenia rozkładu liczby udanych lotów statku powietrznego w przyjętym przedziale czasu, lub dla całego okresu trwałości statku powietrznego w warunkach działań bojowych. Mając określony rozkład liczby udanych lotów zmierzano do wyznaczenia interesujących nas wskaźników. Proces narastania liczby udanych lotów rozpatrywano w funkcji czasu lub liczby lotów statku powietrznego na zadanie.

Należy założyć, że wyloty na zadanie bojowe odbywać się będą losowo z pewną intensywnością, oznaczymy ją jako λ . Zakładamy, że w pewnym przedziale czasu Δt spełniony jest warunek:

$$\lambda \Delta t \leq 1,$$

gdzie: Δt może być traktowany jako czas jednego lotu na zadania bojowe, powyższy zaś warunek oznacza, że statek powietrzny nie wykonuje lotów w trybie ciągłym, ale występują losowe przerwy pomiędzy kolejnymi wylotami. Dodatkowo przyjmujemy, że prawdopodobieństwo zniszczenia statku w jednym locie ma wartość Q .

Niech $U_{z,t}$ oznacza prawdopodobieństwo, że w chwili t liczba udanych lotów wynosi z . Przyjmując taki opis można ułożyć następujące równanie różnicowe, opisujące w sensie probabilistycznym proces narastania liczby lotów:

$$U_{z,t+\Delta t} = (1 - \lambda \Delta t)U_{z,t} + \lambda \Delta t(1 - Q)U_{z-1,t}. \quad (1)$$

Powyższe równanie ma następujący sens: prawdopodobieństwo tego, że w czasie $t + \Delta t$ liczba udanych lotów wynosi z jest równe sumie prawdopodobieństw następujących zdarzeń:

- w czasie Δt nie odbył się lot, a do chwili t statek powietrzny już wykonał z udanych lotów,
- w czasie Δt odbył się udany lot, nie nastąpiło zniszczenie samolotu, a do chwili t statek powietrzny już wykonał $z - 1$ udanych lotów.

Po przejściu do zapisu funkcyjnego mamy:

$$u(z, t + \Delta t) = (1 - \lambda \Delta t)u(z, t) + \lambda \Delta t(1 - Q)u(z - 1, t), \quad (2)$$

gdzie: $u(z, t)$ oznacza funkcję gęstości liczby udanych lotów w chwili t .

Rozłóżmy wyrazy równania w szereg Taylora.

$$u(z, t + \Delta t) = u(z, t) + \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} \Delta t + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial t^2} \Delta t^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 u(z, t)}{\partial t^3} \Delta t^3 + \frac{1}{4!} \frac{\partial^4 u(z, t)}{\partial t^4} \Delta t^4 + \dots$$

$$u(z - 1, t) = u(z, t) - \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 u(z, t)}{\partial z^3} + \frac{1}{4!} \frac{\partial^4 u(z, t)}{\partial z^4} + \dots$$

Dla t uwzględniamy dwa wyrazy rozwinięcia, natomiast dla z - trzy. Po przekształceniu i uporządkowaniu równania (2) otrzymamy:

$$\frac{\partial u(z, t)}{\partial t} = -\lambda Q u(z, t) - \lambda(1 - Q) \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{2} \lambda(1 - Q) \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2}. \quad (3)$$

Zastosujmy następujące oznaczenia: $c = \lambda Q$: $b = \lambda(1 - Q)$: $a = \lambda(1 - Q)$.

Współczynnik c oznacza intensywność niszczenia statku powietrznego przez przeciwnika. Z kolei współczynniki b oraz a choć są opisywane tym samym wyrażeniem mają nieco inny sens, b jest średnim przyrostem liczby udanych lotów w przedziale czasu

o długości Δt , natomiast a jest średnim kwadratem przyrostu liczby udanych lotów w przedziale czasu o długości Δt . Zbieżność wyrażeń na a i b wynika z tego, że w przedziale czasu Δt może wystąpić przyrost tylko o jeden lot, więc sam przyrost i jego kwadrat są sobie równe. Wtedy:

$$\frac{\partial u(z,t)}{\partial t} = -cu(z,t) - b \frac{\partial u(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{2} a \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2}. \quad (4)$$

Dla przedstawienia rozwiązania równania (4) skorzystamy z rozwiązania równania Fokkera - Plancka następującej postaci [21]:

$$\frac{\partial \bar{u}(z,t)}{\partial t} = -b \frac{\partial \bar{u}(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{2} a \frac{\partial^2 \bar{u}(z,t)}{\partial z^2}. \quad (5)$$

Szukamy rozwiązania szczególnego równania (5) takiego, które przy $t \rightarrow 0$ jest zbieżne do tzw. funkcji Diraca, tj. $\bar{u}(z,t) \rightarrow 0$ dla $z \neq 0$ i $\bar{u}(0,t) \rightarrow \infty$, ale w ten sposób, że całka funkcji $\bar{u}(z,t)$ jest równa jedności dla $t > 0$. Dla wyżej podanego warunku, rozwiązanie równania (5) przyjmuje następującą postać [21]:

$$\bar{u}(z,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi at}} e^{-\frac{(z-bt)^2}{2at}}. \quad (6)$$

Uwzględniając powyższe można przedstawić rozwiązanie szczególne równania (4) w postaci:

$$u(z,t) = ce^{-ct} \bar{u}(z,t). \quad (7)$$

W celu sprawdzenia poprawności przyjętego rozwiązania, przytoczmy następujące przekształcenia:

$$\frac{\partial u(z,t)}{\partial t} = -c^2 e^{-ct} \bar{u}(z,t) + ce^{-ct} \frac{\partial \bar{u}(z,t)}{\partial t} = \left[-c - \frac{1}{2t} + b \frac{(z-bt)}{at} + \frac{(z-bt)^2}{2at^2} \right] u(z,t),$$

$$\frac{\partial u(z,t)}{\partial z} = ce^{-ct} \frac{\partial \bar{u}(z,t)}{\partial z} = -\frac{(z-bt)}{at} u(z,t),$$

$$\frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} = ce^{-ct} \frac{\partial^2 \bar{u}(z,t)}{\partial z^2} = \left[-\frac{1}{at} + \frac{(z-bt)^2}{a^2 t^2} \right] u(z,t).$$

Po podstawieniu do (4) uzyskamy:

$$\left[-c - \frac{1}{2t} + b \frac{(z-bt)}{at} + \frac{(z-bt)^2}{2at^2} \right] u(z,t) = \left[-c - b \left[-\frac{(z-bt)}{at} \right] + \frac{1}{2} a \left[-\frac{1}{at} + \frac{(z-bt)^2}{a^2 t^2} \right] \right] u(z,t).$$

Z kolei po uporządkowaniu, mamy:

$$\left[-c - \frac{1}{2t} + b \frac{(z-bt)}{at} + \frac{(z-bt)^2}{2at^2} \right] u(z,t) = \left[-c - \frac{1}{2t} + b \frac{(z-bt)}{at} + \frac{1}{2} \frac{(z-bt)^2}{at^2} \right] u(z,t).$$

Jak widać lewa strona równania jest równa prawej, co dowodzi poprawności przyjętego rozwiązania.

Ostatecznie uzyskano następujący rozkład liczby udanych lotów statku powietrznego:

$$u(z,t) = ce^{-ct} \frac{1}{\sqrt{2\pi at}} e^{-\frac{(z-bt)^2}{2at}}. \quad (8)$$

Funkcja (8) posiada cechy funkcji gęstości, gdyż:

$$\int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(z,t) dz dt = 1.$$

Mając określony rozkład liczby udanych lotów statku powietrznego (funkcję gęstości (8)), można wyznaczyć:

- 1) wartość średnią liczby udanych lotów statku powietrznego:
 - a) w całym jego okresie trwałości;
 - b) w skończonym przedziale czasu;
- 2) dla ustalonej liczby udanych lotów o wartości z_I określić:
 - a) prawdopodobieństwo, że liczba udanych lotów będzie mniejsza lub równa z_I ;
 - b) prawdopodobieństwo, że liczba udanych lotów będzie większa od z_I w funkcji czasu.

Wartość oczekiwana liczby udanych lotów statku powietrznego do czasu t_I będzie:

$$E[z] = \int_0^{t_I} \int_{-\infty}^{\infty} zu(z,t) dz dt = \frac{b}{c} [1 - (1 + ct_I)e^{-ct_I}] = \frac{(1-Q)}{Q} [1 - (1 + \lambda Q t_I)e^{-\lambda Q t_I}]. \quad (9)$$

Jeżeli uwzględnimy dostatecznie długi czas, czyli $t_I \rightarrow \infty$, otrzymamy znane wyrażenie opisujące wartość średnią liczby lotów statku powietrznego w całym okresie jego trwałości:

$$E_T[z] = \frac{(1-Q)}{Q}. \quad (10)$$

Natomiast liczbę udanych lotów w skończonym przedziale czasu opisuje zależność (9). Prawdopodobieństwo, że liczba udanych lotów będzie mniejsza lub równa z_I w czasie równym t_I , z możliwością niszczenia statku, wyraża się zależnością:

$$P_{z_I}^{(1)}(t_I) = \int_0^{t_I} \int_{-\infty}^{z_I} u(z,t) dz dt. \quad (11)$$

Prawdopodobieństwo, że liczba udanych lotów będzie większa od z_I w czasie równym t_I , z możliwością niszczenia statku, wyraża się zależnością:

$$P_{z_1}^{(2)}(t_1) = \int_0^{t_1} \int_{z_1}^{\infty} u(z, t) dz dt. \quad (12)$$

Prawdopodobieństwo, że w przedziale czasu $(0, t_1)$ statek nie będzie zniszczony ma postać:

$$\begin{aligned} P^{(3)}(t_1) &= 1 - (P_{z_1}^{(1)}(t_1) + P_{z_1}^{(2)}(t_1)) = 1 - \int_0^{t_1} c e^{-ct} dt = \\ &= 1 - [-e^{-ct}]_0^{t_1} = 1 - [-e^{-ct_1} + 1] = e^{-ct_1} \end{aligned} \quad (13)$$

Można wykazać, że określone prawdopodobieństwa sumują się do jedności:

$$P_{z_1}^{(1)}(t_1) + P_{z_1}^{(2)}(t_1) + P^{(3)}(t_1) = 1.$$

Zależność (13) można napisać również w następującej postaci:

$$P^{(3)}(k) = e^{-Qk}, \quad (14)$$

gdzie: $k = \lambda t_1$ - liczba lotów statku powietrznego do czasu t_1 .

Prawdopodobieństwo, że w przedziale liczby lotów statku $(0, k)$ statek będzie zniszczony ma postać:

$$Q_k(k) = 1 - e^{-Qk}. \quad (15)$$

3. Zarys oceny bezpieczeństwa pilota

W przypadku powstania zagrożenia utraty statku powietrznego pilot zmuszony jest, dla ratowania własnego życia, do uruchomienia fotela katapultowego. O powodzeniu katapultowania, w przypadku użycia fotela, decyduje głównie [18]:

- 1) czas na podjęcie decyzji o katapultowaniu;
- 2) przebieg katapultowania (w tym przebieg lądowania pilota po katapultowaniu);
- 3) warunki w jakich nastąpiło katapultowanie;
- 4) typ samolotu i typ fotela;
- 5) zachowanie i umiejętność działania pilota podczas katapultowania.

W realnych sytuacjach czas na podjęcie decyzji o katapultowaniu jest przeważnie bardzo krótki. Dodatkowo w tej sytuacji pilot często podejmuje próbę zażegnania zagrożenia statku powietrznego. Duży wpływ na podjęcie właściwej decyzji o katapultowaniu zależy od „czynnika ludzkiego” i innych wskaźników określających stan psychiczny pilota.

W przypadku podjęcia decyzji o katapultowaniu zachodzi potrzeba wykonania szeregu czynności wpływających na przebieg katapultowania. Czynności te są bardziej lub mniej

zautomatyzowane. Niezawodne ich wykonanie ma istotny wpływ na wyniki katapultowania. Jak już wspomniano we wstępie, niezawodność katapultowania zależy od typu statku powietrznego i typu fotela katapultowego. Katapultowanie nie zawsze kończy się powodzeniem, w dużej mierze jego wynik zależy od warunków w jakich nastąpiło. Probabilistyczne oszacowanie bezpieczeństwa pilota może być, w zależności od przyjętych założeń i uproszczeń, mniej lub bardziej dokładne.

W niniejszym artykule, ograniczono się do zapisu uwzględniającego niezawodność statku powietrznego i niezawodność fotela katapultowego. Niezawodność statku i fotela na mocy przyjętych założeń można uważać jako oddzielne zbiory zdarzeń tj.:

$$R_S(t) + Q_S(t) = 1, \quad (16)$$

$$R_F(\tau) + Q_F(\tau) = 1, \quad (17)$$

gdzie: $R_S(t)$ - niezawodność statku powietrznego w przedziale czasu $(0, t)$;

$Q_S(t)$ - zawodność czyli prawdopodobieństwo zniszczenia statku powietrznego w przedziale czasu $(0, t)$;

$R_F(\tau)$ - niezawodność fotela katapultowego w czasie jego użycia;

$Q_F(\tau)$ - zawodność fotela katapultowego w czasie jego użycia.

Zależność (16) odnosi się do statku powietrznego, a zależność (17) do fotela katapultowego. Przy wykorzystaniu zależności (16) i (17), prawdopodobieństwo przeżycia pilota w przedziale czasu $(0, t)$ można określić w następującej postaci:

$$\bar{R} = R_S(t) + Q_S(t)R_F(\tau), \quad (18)$$

gdzie: \bar{R} - prawdopodobieństwo, że w przedziale czasu $(0, t)$ statek powietrzny nie zostanie zniszczony lub dojdzie do zniszczenia statku i jednocześnie pilot uratuje się dzięki wykorzystaniu sprawnego fotela katapultowego.

Prawdopodobieństwo utraty życia pilota w czasie wykonywania lotów w czasie $(0, t)$ będzie:

$$\bar{Q} = Q_S(t)Q_F(\tau), \quad (19)$$

gdzie: \bar{Q} - prawdopodobieństwo utraty życia pilota w czasie $(0, t)$.

Z zależności (18) widać, że na bezpieczeństwo pilota ma wpływ niezawodność statku i niezawodność fotela. Zależności (18) i (19) jak łatwo sprawdzić sumują się do jedności, co dowodzi poprawności powyższych zależności, dla przyjętych założeń. Wzór (18) dla rozkładu wykładniczego w funkcji liczby lotów ma postać:

$$\bar{R}_k = e^{-Qk} + (1 - e^{-Qk})R_F(\tau), \quad (20)$$

gdzie k – liczba lotów statku powietrznego.

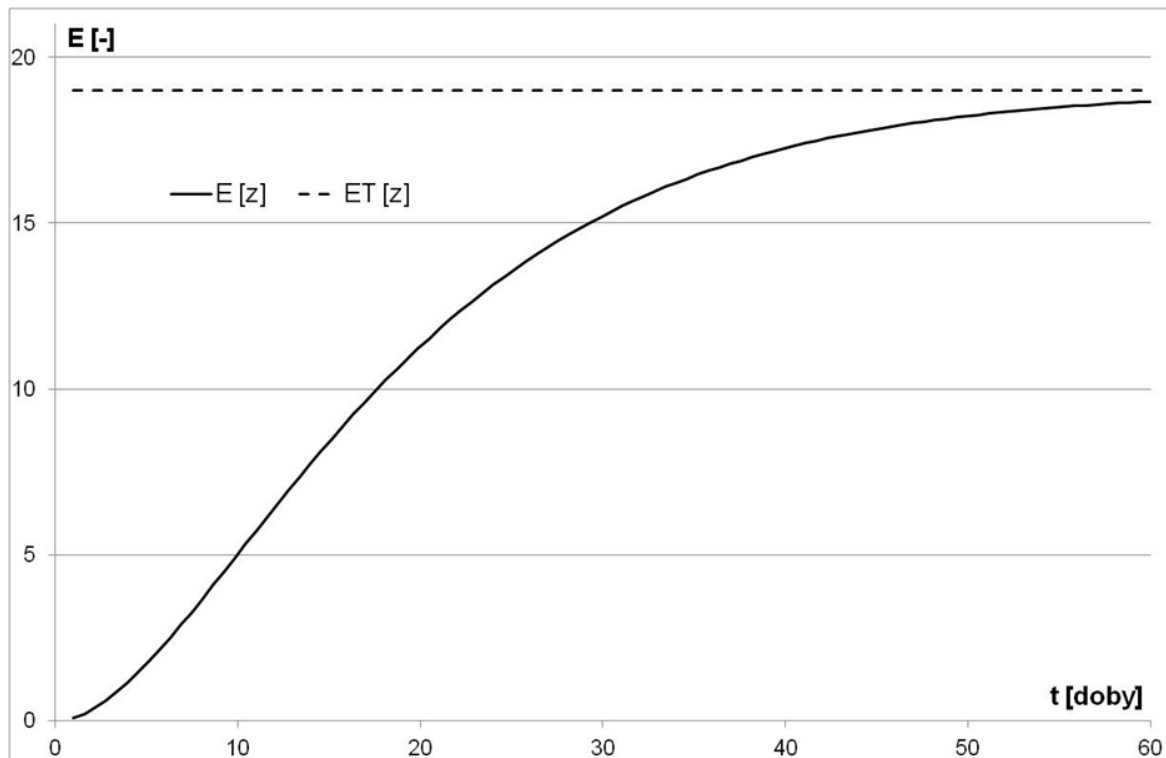
4. Ilustracja przeprowadzonych obliczeń

Z uwagi na brak dostępnych i wiarygodnych danych dotyczących bojowego użycia statków powietrznych, niezbędnych do oszacowania wymaganych wielkości, poniżej wykorzystano dane hipotetyczne.

Dane dla jakich przeprowadzono obliczenia i wykreślono wyniki:

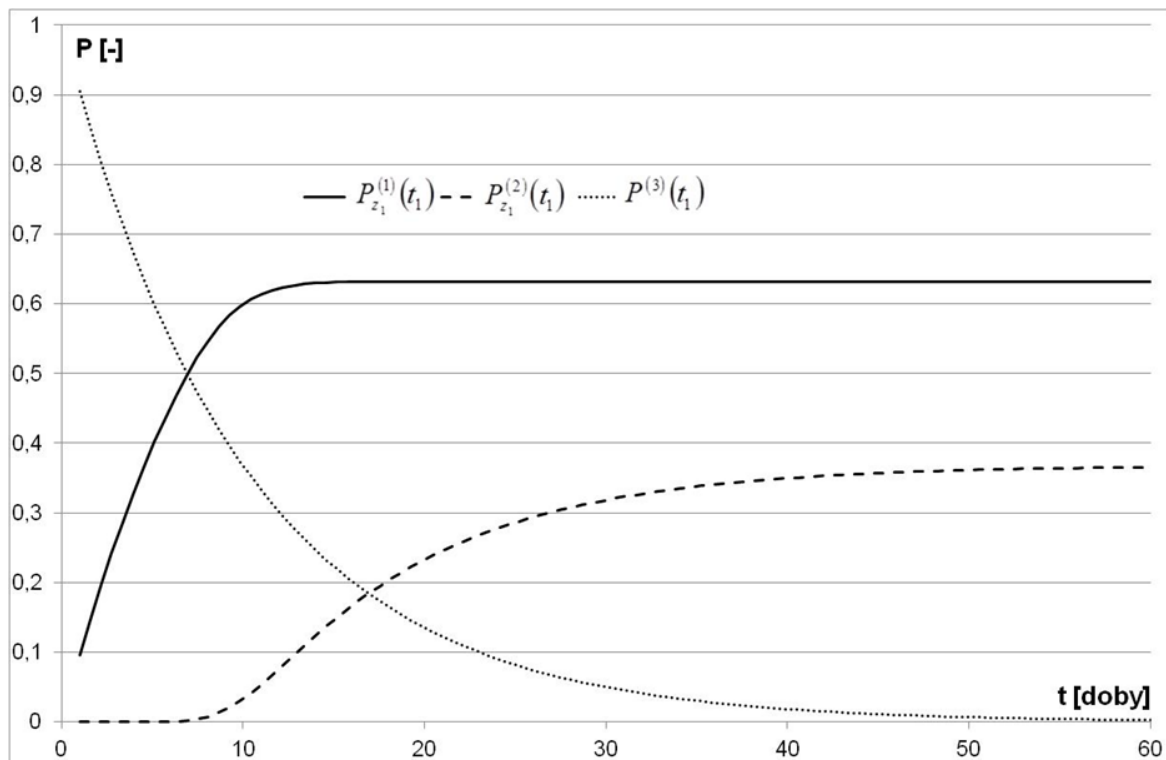
- intensywność wylotów na zadanie bojowe $\lambda = 2$ [$1/\text{doba}$];
- prawdopodobieństwo zniszczenia statku powietrznego w jednym locie $Q = 0,05$ [-].

Przyjęte dane ilustrują sytuację, w której wyloty na zadanie bojowe odbywają się średnio dwa razy na dobę, natomiast prawdopodobieństwo zniszczenia statku powietrznego w jednym locie jest równe 0,05.



Rys.1. Wartości oczekiwane liczby udanych lotów

Na rys. 1 przedstawiono zmianę w czasie wartości oczekiwanej liczby udanych lotów $E[z]$ (obliczoną zgodnie z zależnością (9)) oraz, linią przerywaną, wartość stacjonarną $E_T[z]$ do której dąży $E[z]$ (obliczoną zgodnie z zależnością (10)). $E_T[z] = 19$.



Rys. 2. Wykresy obliczonych prawdopodobieństw: $P_{z_1}^{(1)}(t_1)$ - prawdopodobieństwo, że liczba udanych lotów będzie mniejsza lub równa $z_1=19$ w czasie t_1 , $P_{z_1}^{(2)}(t_1)$ - prawdopodobieństwo, że liczba udanych lotów będzie większa od $z_1=19$ w czasie t_1 , $P^{(3)}(t_1)$ - prawdopodobieństwo, że w przedziale czasu $(0, t_1)$ statek nie będzie zniszczony

Z kolei na rys. 2 wykreślono zmianę w czasie prawdopodobieństw $P_{z_1}^{(1)}(t_1)$, $P_{z_1}^{(2)}(t_1)$, $P^{(3)}(t_1)$ wyznaczonych zgodnie z zależnościami (11), (12) i (13).

5. Podsumowanie

W zakresie techniki lotniczej wymogi współczesnego pola walki zmuszają do szukania wiarygodnych (nie tylko intuicyjnych) odpowiedzi na ważne pytania: jakich skutków (efektów) należy oczekiwać na polu walki w wyniku działania określonych typów statków powietrznych własnych i przeciwnika oraz jak kształtować strukturę techniki lotniczej, aby z założonym prawdopodobieństwem i w określonych warunkach osiągnąć zamierzone cele. Ponadto, bardzo ważnym aspektem oceny efektywności wykorzystania wojskowych statków powietrznych jest ocena ich trwałości oraz bezpieczeństwa załogi podczas działań bojowych [20]. Wydaje się, że zaprezentowana w niniejszym artykule

metoda oceny bezpieczeństwa załogi w warunkach przeciwdziałania przeciwnika może służyć do wstępnej oceny bezpieczeństwa pilota z zastosowanym na danym samolocie systemem ratowniczym oraz do wspomagania podejmowania racjonalnych decyzji podczas prowadzenia działań bojowych jak również uzyskania wymaganych wskaźników w zakresie bezpieczeństwa i niezawodności dla bojowego użycia statków powietrznych.

Wykorzystując uzyskany w ramach niniejszej pracy rozkład liczby udanych lotów statku powietrznego możemy określić wartość średnią liczby udanych lotów (jak zaprezentowano na rysunku 1) jak również prawdopodobieństwa uzyskania określonej liczby udanych lotów oraz prawdopodobieństwo przeżycia statku powietrznego w określonym czasie (rysunek 2). Zaprezentowany przykład liczbowy pokazuje możliwe utylitarne aspekty wykorzystania przedstawionej w pracy metody.

Literatura

1. Borgoń J. Niezawodność i bezpieczeństwo systemu pilot – statek powietrzny. Informator Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych 1987; 269/87.
2. Chiou W Y, Ho B L, Kellogg D L. Hazard potential of ejection with canopy fragmentation. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 1993; 64(1): 9-13.
3. Davis J R, Johnson R, Stepanek J, Fogarty J A (Editors). *Fundamentals of Aerospace Medicine*. 4rd Edition. Lippincott, Philadelphia: Williams & Wilkins, 2008.
4. Edwards M. Anthropometric measurements and ejection injuries. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 1996; 67(12): 1144-1147.
5. Głowiński S, Krzyżyński T. Modelling of the ejection process in a symmetrical flight. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 2013; 51(3): 775-785.
6. Grzesik N, Czapla R. Aircraft crew escape system assistant. *Safety and Reliability: Methodology and Applications*. CRC Press 2014: 791–796.
7. Hearon B F, Thomas, H A, Raddin J H. Mechanism of vertebral fracture in the F/FB-111 ejection experience. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 1982; 53(5): 440-448.
8. Lewis M E. Survivability and injuries from use of rocket-assisted ejection seats: analysis of 232 cases. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 2006; 77(9): 936-943.
9. Maryniak J, Maryniak A, Ładyżyńska-Kozdraś E, Folte U. Katapultowanie – możliwości, problemy i modelowanie. *Nauka, Innowacje, Technika* 2004; 5 (7): 28-45.
10. McBratney C M, Rush S, Kharod C U. Pilot ejection, parachute, and helicopter crash injuries. *Journal of special operations medicine* 2014; 14(4): 92-94.

11. Moiseev I B, Strakhov A I, Churilov I K, Vovkodav V S, Radchenko S N. Medical outcomes of emergency ejections from Russian aircrafts in 2003-2010. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 2014; 48(2): 57-62.
12. Newman D G. Survival outcomes in low-level ejections from high performance aircraft. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 2013; 84(10):1061-1065.
13. Osborne RG, Cook AA. Vertebral fracture after aircraft ejection during Operation Desert Storm. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 1997; 68(4): 337-341.
14. Rainford D J, Gradwell D P (Editors). *Ernsting's Aviation and Space Medicine*. 5th Edition. CRC Press 2006.
15. Ramm A G, Kaleps I. Modeling of the ejection process. *Mathematical and Computer Modelling* 1994; 20: 95-101.
16. Szajnar S W. Diagnostowanie w podsystemie opuszczania statku powietrznego. *Informator Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych* 1995; 330/95: 291-298.
17. Szajnar S W. Ocena bezpieczeństwa i modelowanie w systemach awaryjnego opuszczania samolotu wojskowego. Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna, 2014.
18. Szajnar S W, Tomaszek H. Problemy wyznaczania wskaźników trwałości fotela katapultowego i bezpieczeństwa załogi wojskowego statku powietrznego w warunkach działań bojowych. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2001; 3(127): 95-104.
19. Szajnar S W, Wojtkowiak M. Problemy bezpieczeństwa załogi statku powietrznego w sytuacjach awaryjnych". Warszawa: BIL-GRAF, 1999.
20. Tomaszek H, Wróblewski M. Podstawy oceny efektywności eksploatacji systemów uzbrojenia lotniczego. Warszawa: Dom Wydawniczy „Bellona”, 2001.
21. Tomaszek H, Żurek J, Jaształ M. Prognozowanie uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu lotów statku powietrznego. Radom: Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, 2008.
22. Williams C S. F-16 pilot experience with combat ejections during the Persian Gulf War. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 1993; 64(9): 845-847.
23. Wojtkowiak M. Adaptacja ustroju do działania przyspieszeń w katapultowaniu rzeczywistym i pozorowanym. *Lekarz Wojskowy* 1971; 1:40-45.
24. Wojtkowiak M. Wpływ pozycji pilota na urazy kręgosłupa podczas katapultowania. *Medycyna Lotnicza* 1973; 42: 5-15.
25. Yu J, Lin G, WU M. Numerical Simulation of Deceleration Performance of Ejection Seat. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica* 2006; 27(6): 1033-1038.

26. Yu J; Lin G, Mao X. Numerical Simulation of Ejection Seat and Analysis of Performance Under Adverse Attitudes. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica* 2010; 31(10): 1927-1932.