COMBAT SURVIVABILITY OF HELICOPTER

ANALIZA ŻYWOTNOŚCI BOJOWEJ ŚMIGŁOWCA

Jan H. Wiśniewski¹, Marta Woch², Sławomir Klimaszewski²

¹Politechnika Warszawska, ²Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
marta.woch@itwl.pl; slawomir.klimaszewski@itwl.pl

Abstract: The work provides a preliminary breakdown susceptibility analysis for a Mi-17 helicopter in combat conditions. An analysis of breakdown forms and consequences for helicopter sections and installations in battle conditions including probability of being shot down when hit was made. The article presents a theoretical outline for calculation methods on helicopter kill probability in case of being shot, depending on critical element configuration and number of hits. The probability figures have been calculated for a specific model describing a Mi-17 helicopter. As a result of the conducted analysis it was possible to determine, for a specified weapon caliber, probabilities and effects of receiving combat damage. These results can be used as a starting point for developing a new armed version of the helicopter.

Keywords: Mi-17, survivability analysis, risk, safety

Streszczenie: Celem pracy jest wstępna analiza podatności na uszkodzenia w warunkach bojowych śmigłowca Mi-17 dla wybranych scenariuszy oddziaływań bojowych. Została przedstawiona analiza postaci i skutków uszkodzeń zespołów i instalacji w warunkach bojowych z określeniem prawdopodobieństwa zestrzelenia śmigłowca pod warunkiem trafienia w niego. W niniejszej pracy przedstawiono zarys teoretyczny metod obliczania prawdopodobieństwa zestrzelenia statku powietrznego w zależności od konfiguracji elementów krytycznych oraz liczby postrzałów. Prawdopodobieństwa te zostały obliczone dla konkretnego modelu obrazującego śmigłowiec Mi-17. W wyniku przeprowadzonej analizy możliwe było, dla przyjętych środków rażenia, określenie ww. prawdopodobieństw i skutków uszkodzeń bojowych. Wyniki te mogą stanowić wyjściową bazę przy opracowywaniu nowej uzbrojonej wersji śmigłowca.

Słowa kluczowe: Mi-17, analiza żywotności, ryzyko, bezpieczeństwo

1. Wprowadzenie

Śmigłowiec Mi-17 (znany również jako Mi-8M w służbie rosyjskiej, lub występujący pod nazwą "Hip" w raportach NATO) jest rosyjskim śmigłowcem obecnie produkowanym w dwóch fabrykach w Kazaniu i Ułan-Ude. Mi-17 jest średniej wielkości śmigłowcem transportowym, który może również działać jako śmigłowiec bojowy. Został zaprojektowany w biurze konstrukcyjnym Michaiła Mila. Mi-17 jest dwusilnikowym śmigłowcem o konstrukcji półskorupowej, wykonanej z duraluminium. Posiada pięciopłatowy wirnik nośny, również wykonany z duraluminium. Z tyłu pod belką ogonową znajdują się wrota ładunkowe. Podwozie jest stałe, trzykołowe z kółkiem przednim. Śmigłowiec napędzają dwa silniki turbinowe. Podstawą dla Mi-17 był płatowiec Mi-8. Mi-17 został wyposażony w większe silniki TV3-117MT i wirniki. Została wprowadzona na wzór Mi-14 modyfikacja kadłuba do przenoszenia większych obciążeń [4].

2. Metodyka obliczeń

Przedmiotem analizy jest prawdopodobieństwo przetrwania śmigłowca, pod warunkiem trafienia w niego pociskiem. Analizę niezawodności opracowano zgodnie z procedurą zawartą w książce [1]. Każdy element śmigłowca charakteryzuje się pewnym poziomem podatności na uszkodzenie. Krytycznymi elementami śmigłowca są te części, których zniszczenie doprowadza do utraty maszyny. W niniejszej analizie za elementy krytyczne uznano: pilota, silnik, zbiorniki paliwa, wirnik nośny oraz śmigło ogonowe. Dla śmigłowca Mi-17 wyrażenie definiujące zestrzelenie można przedstawić jako:

$$\begin{aligned} \textit{Helicopter kill} = & [(pilot\ 1) \textit{ AND } (pilot\ 2)] \textit{ OR } (silnik) \textit{ OR } (lewy\ zbiornik\ paliwa) \\ & \textit{ OR } (prawy\ zbiornik\ paliwa) \textit{ OR } (zbiornik\ rozchodowy) \textit{ OR } (wirnik\ nośny) \\ & \textit{ OR } (\textit{śmigło ogonowe}) \end{aligned} \quad (1)$$

Prawdopodobieństwo zestrzelenia śmigłowca zostało zdefiniowane jako:

$$P_{K|H} = \frac{A_v}{A_p} \quad (2)$$

gdzie wszelkie oznaczenia są zdefiniowane w tabeli 1.

Wrażliwe powierzchnie elementu i są zdefiniowane za pomocą zależności:

$$A_{vi} = A_{pi} \cdot P_{ki|hi} \quad (3)$$

Prawdopodobieństwo przetrwania śmigłowca definiuje wzór (4):

$$P_{S|H} = 1 - P_{K|H} \quad (4)$$

Tab. 1. Definicje

Definicja	element i	śmigłowiec
Prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu i (lub śmigłowca) pod warunkiem trafienia w element i (lub śmigłowiec)	$P_{ki hi}$	$P_{K H}$
Prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu i pod warunkiem trafienia w element j	$P_{ki hj}$	-
Prawdopodobieństwo trafienia w element i pod warunkiem trafienia w śmigłowiec	$P_{hi H}$	-
Prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu i pod warunkiem trafienia w śmigłowiec	$P_{ki H}$	-
Prawdopodobieństwo przetrwania elementu i (lub śmigłowca) pod warunkiem trafienia w śmigłowiec	$P_{si H}$	$P_{S H}$
Wrażliwa powierzchnia elementu i (lub śmigłowca)	A_{vi}	A_v
Powierzchnia elementu i (lub śmigłowca)	A_{pi}	A_p

Prawdopodobieństwo zestrzelenia śmigłowca jednokrotnym strzałem.

W przypadku gdy śmigłowiec nie posiada zapasowych elementów krytycznych, oraz brak jest nakładania się rzutów pól powierzchni krytycznych elementów, ogólne wyrażenie definiujące zestrzelenie jest zdefiniowane jako:

$$\textit{Helicopter kill} = (\textit{element 1}) \textbf{OR} (\textit{element 2}) \textbf{OR} \dots \textbf{OR} (\textit{element } n)$$

Prawdopodobieństwo zestrzelenia śmigłowca można obliczyć ze wzoru:

$$P_{K|H} = \sum_i P_{ki|H} \quad (5)$$

Wrażliwą powierzchnię śmigłowca definiuje wzór (6):

$$A_v = \sum_i A_{vi} \quad (6)$$

Prawdopodobieństwo zestrzelenia śmigłowca z elementem wymiennym po jednym strzale.

W przypadku gdy śmigłowiec posiada zapasowy element krytyczny o wrażliwej powierzchni A_{vk} , oraz brak jest nakładania się rzutów pól powierzchni krytycznych elementów, wrażliwą powierzchnię śmigłowca można wyrazić wzorem:

$$A_v = \sum_i A_{vi} - A_{vk} \quad (7)$$

Prawdopodobieństwo zestrzelenia śmigłowca jest obliczane na podstawie wzoru (2).

Prawdopodobieństwo zestrzelenia śmigłowca z komponentami nachodzącymi na siebie po jednym strzale.

Niech A_{p0} będzie powierzchnią wspólną pól nachodzących siebie m komponentów w rzutach na płaszczyznę prostopadłą do kierunku strzału na. Wtedy prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu wspólnego pod warunkiem trafienia w niego można wyznaczyć za pomocą:

$$P_{ko/ho} = 1 - \prod_{i=1}^m P_{si/hi} \quad (8)$$

Wrażliwa powierzchnia części wspólnej jest wyliczona analogicznie przy wykorzystaniu wzoru (3). Do dalszej analizy zarówno powierzchnie A_{pi} jak i powierzchnie wrażliwe A_{vi} nachodzących na siebie m komponentów są pomniejszone o powierzchnię wspólną.

Prawdopodobieństwo zestrzelenia śmigłowca pod wpływem wielokrotnego strzału.

W celu obliczenia prawdopodobieństwa zestrzelenia śmigłowca pod wpływem wielokrotnego strzału można wykorzystać łańcuch Markowa. Do analizy został wzięty przypadek, gdy śmigłowiec posiada element zapasowy (jest nim pilot). Elementy krytyczne śmigłowca w danej chwili mogą się znaleźć w jednym z pięciu stanów:

- 1) jeden lub kilka z elementów nieposiadających części wymiennych jest uszkodzony, stan ten jest oznaczony jako $Knrc$
- 2) tylko pilot pierwszy został postrzelony – $kp1$
- 3) tylko pilot drugi został postrzelony – $kp2$
- 4) obydwójce z pilotów zostali postrzeleni – Krc
- 5) żaden z pilotów oraz żaden z elementów nie zostały uszkodzone – nk .

Jak można zaobserwować zestrzelenie śmigłowca nastąpi, gdy śmigłowiec znajdzie się albo w pierwszym, albo w czwartym stanie.

Następnie jest konstruowana macierz przejść $[T]$, której element $T(i,j)$ opisuje prawdopodobieństwo przejścia ze stanu i do stanu j . Wektor stanu określony jako $\{S\}^{(i)}$:

$$\{S\}^{(j)} = \left\{ \begin{matrix} Knrc \\ kp1 \\ kp2 \\ Krc \\ nk \end{matrix} \right\}^{(j)} \quad (9)$$

definiuje prawdopodobieństwo znalezienia się śmigłowca w jednym z pięciu stanów po j -tym strzale. prawdopodobieństwo zestrzelenia śmigłowca po j -tym strzale jest zdefiniowane jako:

$$P_{K/H}^{(j)} = Knrc^{(j)} + Krc^{(j)} \quad (10)$$

Wektor $\{S\}^{(j+1)}$ jest obliczany za pomocą następującego przekształcania:

$$\{S\}^{(j+1)} = [T]\{S\}^{(j)} \quad (11)$$

Stan początkowy jest zdefiniowany jako:

$$\{S\}^{(0)} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (12)$$

3. Analiza żywotności bojowej śmigłowca Mi-17

Na podstawie dokumentacji konstrukcyjnej śmigłowca [2], opisu technicznego oraz wykonania niezbędnych pomiarów z natury wykonano pomiary geometrii krytycznych instalacji i elementów śmigłowca Mi-17. W niniejszej analizie pod uwagę wzięto takie ustawienie śmigłowca względem strzelca, w którym prawdopodobieństwo trafienia jest największe i pokazano je na rysunku 1. Na rysunku nie ma zaznaczonej pozycji pilotów, ponieważ pilot jest elementem ruchomym śmigłowca. Obliczone powierzchnie elementów krytycznych zostały zawarte w tabeli 2.

Rys. 1. Symboliczne zobrazowanie śmigłowca wraz z elementami krytycznymi

Tab. 2. Powierzchnie elementów krytycznych

i	Istotny element	$A_{pi} [cm^2]$	$x P_{kili}$	$= A_{vi} [cm^2]$	P_{kilh}
1	Pilot 1	4 100	1	4 100	0,0189
2	Pilot 2	4 100	1	4 100	0,0189
3	Zespół napędowy	16 528	0,7	11 569,6	0,0533
4	Lewy zbiornik paliwa	18 880	0,7	13 216	0,0609
5	Prawy zbiornik paliwa	18 880	0,7	13 216	0,0609
6	Zbiornik rozchodowy	5 200	0,7	3 640	0,0168
7	Wirnik nośny	22 400	0,4	8 960	0,0413
8	Śmigło ogonowe	74 944	0,1	7 494,4	0,0345
	Śmigłowiec	$A_p = 494 720$	-		

Prawdopodobieństwa uszkodzenia elementu i pod warunkiem trafienia w niego ($P_{ki|hi}$) zostały przyjęte na podstawie analogii do [5].

W takim ustawieniu obszary wyznaczone przez zbiorniki zewnętrzne paliwa całkowicie nachodzą na siebie. Pole powierzchni wspólnej wynosi $A_{po}=18\,880\text{ cm}^2$. Prawdopodobieństwo uszkodzenia części wspólnej $P_{ko|ho}$ jest wyliczone na podstawie wzoru (8) i wynosi $P_{ko|ho}=1-(1-0,7)\cdot(1-0,7)=0,91$. Uszkodzenie części wspólnej następuje, gdy którykolwiek ze zbiorników paliwa zostanie uszkodzony. Wrażliwe pole powierzchni wspólnej wynosi $A_{vo}=17\,180,8\text{ cm}^2$. W oparciu o wzór (7) wrażliwe pole powierzchni śmigłowca wynosi:

$$A_v = A_{v1} + A_{v3} + A_{vo} + A_{v6} + A_{v7} + A_{v8} = 52\,944,8 \quad (13)$$

W nawiązaniu do (2) prawdopodobieństwo uszkodzenia śmigłowca pod warunkiem jednokrotnego trafienia wynosi $P_{K|H} = 0,107$, a prawdopodobieństwo przetrwania $P_{S|H} = 0,893$.

W celu obliczenia prawdopodobieństwo zestrzelenia śmigłowca pod wpływem wielokrotnego strzału skonstruowano macierz przejść $[T]$ opisującą prawdopodobieństwo przejścia ze stanu i do stanu j . Prawdopodobieństwa zostały wyliczone na podstawie wrażliwych pól powierzchni odpowiednich elementów w stosunku do całkowitej powierzchni samolotu.

Tab. 3. Tablica przejść

Prawdopodobieństwo przejścia z tego stanu					
$Knrc$	$kp1$	$kp2$	Krc	nk	do tego stanu
1	$98,732\cdot10^{-3}$	$98,732\cdot10^{-3}$	0	$98,732\cdot10^{-3}$	$Knrc$
0	$892,98\cdot10^{-3}$	0	0	$8,288\cdot10^{-3}$	$kp1$
0	0	$892,98\cdot10^{-3}$	0	$8,288\cdot10^{-3}$	$kp2$
0	$8,288\cdot10^{-3}$	$8,288\cdot10^{-3}$	1	0	Krc
0	0	0	0	$884,693\cdot10^{-3}$	nk

Wykorzystując wzory (10), (11) i (12) zostało obliczone prawdopodobieństwo zestrzelenia trafionego śmigłowca. Wyniki zostały zobrazowane na rysunku 2.

Rys. 2 Prawdopodobieństwo zestrzelenia śmigłowca trafionego wieloma strzałami

Jeżeli do analizy przyjmujemy inne wartości $P_{ki|hi}$, przedstawione w tabeli 4, uzyskamy nw. wyniki. W ten sposób przyjęte prawdopodobieństwa zakładają, że pilot może prowadzić śmigłowiec jeżeli został ranny. Zakładana jest również większa żywotność pozostałych elementów krytycznych.

Tab. 4. Powierzchnie elementów krytycznych

i	Istotny element	A_{pi} [cm ²]	$x P_{ki hi}$	$= A_{vi}$ [cm ²]	$P_{ki h}$
1	Pilot 1	4 100	0,6	2460	0,0113
2	Pilot 2	4 100	0,6	2460	0,0113
3	Zespół napędowy	16 528	0,5	8264	0,0381
4	Lewy zbiornik paliwa	18 880	0,6	11328	0,052203
5	Prawy zbiornik paliwa	18 880	0,6	11328	0,052203
6	Zbiornik rozchodowy	5 200	0,6	3120	0,0144
7	Wirnik nośny	22 400	0,2	4480	0,0206
8	Śmigło ogonowe	74 944	0,05	3747,2	0,0173
	Śmigłowiec	$A_p = 494\ 720$	-		

Dla tego przypadku prawdopodobieństwo uszkodzenia części wspólnej wynosi $P_{ko|ho} = 1 - (1 - 0,6) \cdot (1 - 0,6) = 0,84$, a wrażliwe pole powierzchni wspólnej wynosi $A_{vo} = 15\ 859,2 \text{ cm}^2$. Prawdopodobieństwo uszkodzenia śmigłowca pod warunkiem jednokrotnego trafienia wynosi $P_{KIH} = 0,077$, a prawdopodobieństwo przetrwania $P_{S|H} = 0,923$.

W celu obliczenia prawdopodobieństwo zestrzelenia śmigłowca pod wpływem wielokrotnego strzału skonstruowano nową macierz przejść [T] w oparciu o wartości z tablicy 5.

Tab. 5. Tablica przejść

Prawdopodobieństwo przejścia z tego stanu					
<i>Knrc</i>	<i>kp1</i>	<i>kp2</i>	<i>Krc</i>	<i>nk</i>	do tego stanu
1	$71,698 \cdot 10^{-3}$	$71,698 \cdot 10^{-3}$	0	$71,698 \cdot 10^{-3}$	<i>Knrc</i>
0	$923,33 \cdot 10^{-3}$	0	0	$4,973 \cdot 10^{-3}$	<i>kp1</i>
0	0	$923,33 \cdot 10^{-3}$	0	$4,973 \cdot 10^{-3}$	<i>kp2</i>
0	$4,973 \cdot 10^{-3}$	$4,973 \cdot 10^{-3}$	1	0	<i>Krc</i>
0	0	0	0	$918,357 \cdot 10^{-3}$	<i>nk</i>

Rys. 4. Prawdopodobieństwo zestrzelenia śmigłowca trafionego wieloma strzałami

Porównując rys. 3 z 4 prawdopodobieństwo przetrwania śmigłowca zwiększyło się nieznacznie w stosunku do wzrostu żywotności poszczególnych elementów krytycznych. W oparciu o wiedzę z rachunku prawdopodobieństwa taki wynik jest wynikiem spodziewanym.

Wnioski

W wyniku przeprowadzonej analizy postaci i skutków uszkodzeń w warunkach bojowych zespołów i instalacji śmigłowca Mi-17 możliwe było określenie skutków uszkodzeń bojowych poszczególnych zespołów i instalacji oraz określenie prawdopodobieństwa zestrzelenia. Zestrzelenie zaliczane jest do najwyższej kategorii poziomu zniszczenia.

Przeprowadzona analiza postaci i skutków uszkodzeń w warunkach bojowych zespołów i instalacji śmigłowca Mi-17 może stanowić wyjściową bazę przy opracowywaniu nowej uzbrojonej wersji śmigłowca.

Praca ta jest wstępem do dalszych rozważań, w których uwzględnione będą inne położenia śmigłowca w momencie strzału, tj. położenie w pozycji od spodu występujące podczas ostrzału z ziemi, czy pozycje śmigłowca widzianego z przodu lub z tyłu. . Po przeprowadzeniu analizy ostrzałem pociskami typu HE kalibru 23 mm wyniki będą stanowić wyjściową bazę do rozdziału w książce [6].

Wzrost żywotności poszczególnych elementów krytycznych prowadzi do nieznacznego polepszenia prawdopodobieństwa przetrwania śmigłowca. Niemniej jednak jest to jeden z niewielu sposobów na poprawienie żywotności bojowej śmigłowca.

Bibliografia

- [1] Ball R. E.: *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. Virginia, 2003.
- [2] *Śmigłowiec Mi-17. Instrukcja eksploatacji i obsługi technicznej. Ogólne wiadomości o śmigłowcu*. Poznań, 1991.
- [3] Bedford T., Cooke R.: *Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods*. Cambridge University Press, 2001.
- [4] Butowski P., *Lotnictwo Wojskowe Rosji Tom II*, Wydawnictwo Lampart & Piotr Butowski, Warszawa, 1995.
- [5] Sprawozdanie Nr 113/31/2011. *Analiza postaci i skutków uszkodzeń w warunkach bojowych (DMEA) zespołów i instalacji samolotu PZL-130 orlik TC II w oparciu o wymagania normy MIL-STD-1629A*, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, w druku
- [6] pod red. Żurka J., *Żywotność śmigłowców*, PIB, Warszawa, 2006.

mgr inż. Jan Wiśniewski, doktorant w Zakładzie Aerodynamiki Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Ukończył studia z zakresu Zrównoważonego Planowania w Energetyce na Uniwersytecie Aalborskim w Danii w 2009, oraz Ochrony Środowiska na Politechnice Warszawskiej w 2010. Autor monografii na temat rozwoju systemu elektroenergetycznego w Polsce, współautor trzech podręczników i kilkunastu prac.

mgr inż. Marta Woch, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych. Studia ukończone w 2009 na Politechnice Warszawskiej, na wydziale Matematycznym i Nauk Informatycznych jako informatyk ze specjalizacją w projektowaniu systemów CAD/CAM. Doktorantka na wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa w dyscyplinie mechaniki.

dr inż. Sławomir Klimaszewski jest pracownikiem naukowym Zakładu Niezawodności i Bezpieczeństwa Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych w Warszawie. Zajmuje się problematyką niezawodności, bezpieczeństwa, modelami zużycia techniki lotniczej. Jest autorem ponad stu prac publikowanych i niepublikowanych, które znalazły szerokie zastosowanie w praktyce, między innymi do przedłużania zasobów pracy techniki lotniczej. Jest współautorem monografii: „Symulacyjne metody badania bezpieczeństwa lotów”, Wydawnictwo Naukowe ASKON, Warszawa 1998. Był kierownikiem i wykonawcą wielu projektów badawczych przyznawanych przez Komitet Badań Naukowych.