RELIABILITY AND RISK ANALYSIS OF TRAINER

ANALIZA NIEZAWODNOŚCI I RYZYKA SAMOLOTU SZKOLENIOWEGO

Marta Woch¹, Marek Matyjewski²

¹Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, ²Politechnika Warszawska
marta.woch@itwl.pl; mmatyjew@meil.pw.edu.pl

Abstract: *Exploitation of aircraft can be associated with risk of sustaining air accidents. The risk reduction is possible as a result of an analysis, portraying the most dangerous incidents and undesired events. In this paper the reliability based on events that occurred during the current exploitation of trainers variant PZL-130 Orlik TC-I and PZL-130 Orlik TC-II was determined. From among all the events, ones characterized by the greatest likelihood of occurrence were selected. The probability of occurrence and the average time to undesired event were calculated. Then, a graph showing the most likely categories of results of undesired events that may occur during one fly was developed. The graph allowed for determining events associated with the highest risk of accident occurrence. Lower incidence of these events, or limitation of their consequences decrease the risk associated with the Exploitation of trainers PZL-130 Orlik TC-I and PZL-130 Orlik TC-II.*

Keywords: Orlik, risk analysis, safety

Streszczenie: *Z eksploatacją statków powietrznych wiąże się ryzyko wystąpienia wypadków lotniczych. Zmniejszenie ryzyka jest możliwe po dokonaniu jego analizy, która wskazuje najbardziej niepożądane niebezpieczne zdarzenia. W niniejszej pracy dokonano wyznaczenia niezawodności na podstawie zdarzeń, które wystąpiły podczas dotychczasowej eksploatacji samolotów szkoleniowo-treningowych typu PZL-130 Orlik TC-I oraz PZL-130 Orlik TC-II. Obliczono prawdopodobieństwo ich wystąpienia oraz średni czas do pojawienia się zdarzenia niepożądanego. Wyselekcjonowano spośród wszystkich zdarzeń te, które charakteryzowały się największym prawdopodobieństwem wystąpienia. Następnie opracowano wykres przedstawiający najbardziej prawdopodobne skutki po wystąpieniu zdarzenia niepożądanego, jakie mogą wystąpić w czasie jednego lotu. Wykres ten pozwolił określić zdarzenia, z którymi wiąże się największe ryzyko wystąpienia wypadków lotniczych. Zmniejszenie częstości występowania takich zdarzeń lub ograniczenie ich skutków zmniejszy ryzyko związane z eksploatacją samolotów szkoleniowo-treningowych typu PZL-130 Orlik TC-I oraz PZL-130 Orlik TC-II.*

Słowa kluczowe: Orlik, analiza ryzyka, bezpieczeństwo

1. Wprowadzenie

Nauka o bezpieczeństwie, a co za tym idzie prowadzenie szeroko pojętych analiz ryzyka jest dziedziną powstałą stosunkowo niedawno. Początek nauce o bezpieczeństwie dało uświadomienie sobie, iż problemy bezpieczeństwa w różnych obszarach techniki i życia człowieka mają podobny charakter, dzięki czemu mogą być opisywane w jednakowy sposób.

PZL-130 Orlik TC-I jest jednosilnikowym, dwumiejscowym samolotem szkolno-treningowym o konstrukcji całkowicie metalowej w układzie dolnopłata [4]. Kadłub jest konstrukcją półskorupową nitowaną i zgrzewaną, z 15 wręgami i ścianą ogniową założem silnika, o przekroju prostokątnym. Posiada klasyczne usterzenie ze sterem kierunku. Podwozie jest wciągane hydraulicznie, trójkątowe, z kołami pojedynczymi, z kółkiem przednim sterowanym. Ma wbudowany silnik turbośmigłowy Walter M 601T. Jest wyposażony w cztery węzły podwieszeń pod skrzydłami lekkiego uzbrojenia oraz w wytwornice dymu Sanders.

W 2010 wprowadzono do użytku nowszą wersję PZL-130TC-II. Jest to seryjny samolot, w którym zwiększono rozpiętość i powierzchnię skrzydła, zmieniono geometrię steru kierunku, a także wymieniono silnik na Pratt & Whitney of Canada PT6-25C charakteryzujący się dłuższym resursem. Wymieniono śmigło na czteropłatowe Hartzell D4N. Zmieniono pozycję instruktora i poprawiono awionikę.

Różnice ze strony analizy bezpieczeństwa pomiędzy TC-I a TC-II nie są zbyt istotne, dlatego w poniższej analizie nie dokonano podziału częstości występowania zdarzeń niepożądanych ze względu na wersję.

2. Metodyka obliczeń

Analizę niezawodności opracowano zgodnie z procedurą zawartą w książce [5]. Najpierw dokonano identyfikacji zagrożeń występujących podczas wszystkich czynności związanych z eksploatacją samolotu szkoleniowego. Wytypowano zdarzenia niepożądane (ZN), dla których obliczono prawdopodobieństwo ich wystąpienia na jeden lot oraz na jedną godzinę lotu. Zdarzenia niepożądane oznaczono symbolami $A^{(*)}$. Prawdopodobieństwo wyznaczono za pomocą wzorów (1) i (2).

$$Q^{(k)}(1 \text{ lot}) = \frac{n}{N_{\text{lot}}} \left[\frac{1}{\text{lot}} \right] \quad (1)$$

gdzie: n – liczba ZN, N_{lot} – sumaryczna ilość lotów, $Q^{(k)}(1 \text{ lot})$ – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia $A^{(k)}$ w czasie 1 lotu. Wzór wyliczający prawdopodobieństwo wystąpienia ZN w ciągu jednej godziny jest analogiczny do wzoru (1).

$$Q^{(k)}(1 \text{ h}) = \frac{n}{N_h} \left[\frac{1}{h} \right] \quad (2)$$

gdzie: N_h – całkowity nalot mierzony w godzinach.

Następnie obliczono niezawodność $R_h(t)$ rozumianą jako prawdopodobieństwo niewystąpienia jakiegokolwiek zdarzenia niepożądanego po czasie t działającego na statek powietrzny (SP) oraz niezawodność $R_{lot}(n)$ definiującą niezawodność po n lotach.

$$R_h(t) = (1 - Q(1 h))^t \quad (3)$$

$$R_{lot}(t) = (1 - Q(1 lot))^t \quad (4)$$

Obliczono średni czas do uszkodzenia MTTF (mean time to failure) w oparciu o wzór (5):

$$MTTF = \int_0^{\infty} R_h(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - Q(1 h))^t dt = \frac{-1}{\ln(1 - Q(1 h))} \quad (5)$$

Analizę ryzyka przeprowadzono zgodnie z procedurą zawartą w opracowaniu [1]. Najpierw dokonano identyfikacji zagrożeń występujących podczas wszystkich czynności związanych z eksploatacją samolotu szkoleniowego. Wytypowano zdarzenia niepożądane (ZN), spośród których do dalszej analizy wybrano ZN o najwyższym poziomie zawodności.

Najczęściej występujące zdarzenia niepożądane, poddano bardziej dokładnej analizie ryzyka. Poziom ryzyka określany będzie jako najbardziej prawdopodobny rozmiar strat $c_0(1 lot)$ [1] w systemie pilot – statek powietrzny – otoczenie podczas jednego lotu treningowego. Tę miarę ryzyka można wyznaczyć na podstawie następującej zależności:

$$c_0^{(k)}(1 lot) = Q^{(k)}(1 lot) \cdot Z_0^{(k)} \quad (6)$$

gdzie: k – liczba ZN wybranych we wstępnej analizie niezawodności, $c_0^{(k)}(1 lot)$ – ryzyko cząstkowe dla zdarzenia niepożądanego oznaczonego numerem k , $Q^{(k)}(1 lot)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia $A^{(k)}$ w czasie 1 lotu oraz $Z_0^{(k)}$ – najbardziej prawdopodobne straty pod warunkiem wystąpienia zdarzenia numer k .

Miarę zagrożeń $Z_0^{(k)}$ została określona na podstawie klasyfikacji dotychczasowych zdarzeń niepożądanych. Zastosowano sześć kategorii strat [1]: c_1 – bez następstw, c_2 – incydent, c_3 – poważny incydent, c_4 – uszkodzenie statku powietrznego, c_5 – poważne uszkodzenie statku powietrznego, c_6 – katastrofa lotnicza. Na podstawie koncepcji klasyfikacji poziomów ryzyka według MIL-STD-882 [2] wygenerowano wykres przedstawiający klasyfikacje ryzyka. Metoda ta została odpowiednio dostosowana do potrzeb niniejszej analizy, tzn. określono występujące na rys. 1 poziomy strat. Wykorzystując odpowiednio przypisane wartości zostały wyznaczone zdarzenia charakteryzujące się największym ryzykiem. Ryzyko rośnie wraz ze spadkiem liczby określającej poziom klasyfikacji.

występowanie określonego zdarzenia	<p>↑</p> <p>pomijalnie małe – są to incydenty (c_2) niewielkie – są to poważne incydenty (c_3) średnie – jest to uszkodzenie statku powietrznego (c_4) krytyczne – jest to poważne uszkodzenie SP (c_5)</p>				
	częste	możliwe	rzadkie	mało prawdopodobne	nieprawdopodobne
	13	7	3	1	
	16	9	5	2	
	18	11	6	4	
	19	14	10	8	
	20	17	15	12	
	<p>←</p> <p>pomijalnie małe niewielkie średnie krytyczne</p> <p>→</p>				ciężkość następstw

Rys. 1. Koncepcja klasyfikacji poziomów ryzyka według MIL-STD-882 [2]

3. Analiza niezawodności i ryzyka samolotu Orlik

Dane do obliczeń dostarczyły zapisy z eksploatacji szkoleniowych statków powietrznych należących do Wojska Polskiego. Podczas całego okresu użytkowania wystąpiło 950 zdarzeń niepożądanych. Nalot całkowity 26 samolotów Orlik TC-I oraz 4 samolotów TC-II przez cały okres eksploatacji wynosił 36 169 godzin. W tym czasie odbyło się 75 235 lądowań. Odnotowane zdarzenia niepożądane przedstawiono w tabeli 1 wraz z przypisanym im prawdopodobieństwem niewystąpienia. Na podstawie powyższych danych prawdopodobieństwo wystąpienia ZN wynosi: $Q(1 \text{ lot}) = 12,6 \cdot 10^{-3}$ oraz $Q(1 \text{ h}) = 26,2 \cdot 10^{-3}$. Obliczono prawdopodobieństwo niewystąpienia ZN po 10, 20, 50 oraz 100 lotach jak również po upływie 10, 20, 50 oraz 100 godzin. Wyniki umieszczono w tabeli 1. Średni czas do wystąpienia zdarzenia niepożądanego to $MTTF = 37,57 \text{ h}$. Zdarzenie niepożądane było odnotowane średnio co 79 lotów. Wyznaczono listę zdarzeń niepożądanych, dla których obliczono prawdopodobieństwo ich wystąpienia na jeden lot i na jedną godzinę. Wyniki zostały przedstawione w tabeli 2.

Tabela 1. Wyniki analizy prawdopodobieństwa niewystąpienia ZN

	$n=10$	$n=20$	$n=50$	$n=100$
$R_{lot}(n)$	0,881	0,776	0,530	0,281
$R_h(n)$	0,766	0,587	0,264	0,070

Tabela 2. Wyniki analizy niezawodności

Nazwa zdarzenia niepożądanego	$Q^{(k)}(1 \text{ lot})$	$Q^{(k)}(1h)$
Nieutrzymywanie parametrów lub niewłaściwe działanie agregatów (urządzeń)	9,48E-03	4,56E-03
Pozostałe	4,01E-03	1,93E-03
Techn. zużycie el. lub zespołów SP w czasie jego ekspl. powodujące konieczność ich przedwcz. wymiany	2,79E-03	1,34E-03
Wady zależne od producenta	1,58E-03	7,58E-04
Zastosowanie materiału z ukrytymi wadami technologicznymi	1,22E-03	5,85E-04
Zmęczenie materiału	1,08E-03	5,18E-04
Samoczynne rozregulowanie układu	9,40E-04	4,52E-04
Niewłaściwy montaż	8,29E-04	3,99E-04
Uszkodzenie mechaniczne	8,02E-04	3,85E-04
Błędy konstruowania	7,19E-04	3,46E-04
Błąd w technice pilotowania	4,15E-04	1,99E-04
Zderzenie SP z ptakiem (ptakami)	3,87E-04	1,86E-04
Niewłaściwa regulacja	3,32E-04	1,60E-04
Nie ma możliwości ustalenia przyczyny zdarzenia	2,49E-04	1,20E-04
Niezgodne z instrukcjami użytkowanie SP, jego urządzeń lub wyposażenia spowodowane pomyłką załogi	1,38E-04	6,65E-05
Inne niewłaściwości techniczne	1,11E-04	5,32E-05
Obecność owadów w elementach wyposażenia	1,11E-04	5,32E-05
Zastosowanie części z wadą nie wykrytą w czasie remontu	1,11E-04	5,32E-05
Niekorzystny wpływ płatowca	1,11E-04	5,32E-05
Niewłaściwe wykonanie modyfikacji	8,29E-05	3,99E-05
W trakcie wyjaśniania	8,29E-05	3,99E-05
Niekorzystny wpływ wilgoci	8,29E-05	3,99E-05
Niewłaściwa obróbka cieplna	8,29E-05	3,99E-05
Niewłaściwa obróbka mechaniczna	8,29E-05	3,99E-05
Niewyjaśnione	5,53E-05	2,66E-05
Zastosowanie niewłaściwej modyfikacji	5,53E-05	2,66E-05
Zanieczyszczenia po remoncie	5,53E-05	2,66E-05
Niewłaściwa organizacja pracy przez personel służby inżynieryjno-lotniczej	2,76E-05	1,33E-05
Zanieczyszczenia poprodukcyjne	2,76E-05	1,33E-05
Niewprowadzenie nakazanych zmian konstrukcyjnych lub technologicznych	2,76E-05	1,33E-05
Nieprawidłowa eksploatacja SP przez załogę	2,76E-05	1,33E-05
Nieprzestrzeganie obowiązującej technologii wytwarzania	2,76E-05	1,33E-05
Nieświadome zaniedbanie obowiązków członka załogi	2,76E-05	1,33E-05
Podjęcie nieodpowiedniej decyzji w stosunku do zaistniałej sytuacji	2,76E-05	1,33E-05
Uszkodzenie związane jest z niedokładnością przepisów w zakresie obsługi i użytkowania	2,76E-05	1,33E-05
Zastosowanie uszkodzonej części	2,76E-05	1,33E-05
Wykonanie remontu niezgodnie z obowiązującą technologią	2,76E-05	1,33E-05

Z listy zdarzeń niepożądanych wybrano 15 zdarzeń charakteryzujących się najwyższym prawdopodobieństwem wystąpienia. Następnie zdarzeniom tym przypisano najbardziej prawdopodobny rozmiar strat.

Tabela 3. Wyniki analizy ryzyka

Ozn	Nazwa zdarzenia niepożądanego	$Q^{(k)}(1\ h)$	$Q^{(k)}(1\ lot)$	$Z_0^{(k)}$
A ⁽¹⁾	Nieutrzymywanie parametrów lub niewłaściwe działanie agregatów (urządzeń)	9,48E-03	4,56E-03	c ₂
A ⁽²⁾	Pozostałe	4,01E-03	1,93E-03	c ₁
A ⁽³⁾	Techn. zużycie el. lub zespołów SP w czasie jego ekspl. powodujące konieczność ich przedwcz. wymiany	2,79E-03	1,34E-03	c ₃
A ⁽⁴⁾	Wady zależne od producenta	1,58E-03	7,58E-04	c ₁
A ⁽⁵⁾	Zastosowanie materiału z ukrytymi wadami technologicznymi	1,22E-03	5,85E-04	c ₃
A ⁽⁶⁾	Zmęczenie materiału	1,08E-03	5,18E-04	c ₅
A ⁽⁷⁾	Samoczynne rozregulowanie układu	9,40E-04	4,52E-04	c ₂
A ⁽⁸⁾	Niewłaściwy montaż	8,29E-04	3,99E-04	c ₁
A ⁽⁹⁾	Uszkodzenie mechaniczne	8,02E-04	3,85E-04	c ₂
A ⁽¹⁰⁾	Błędy konstruowania	7,19E-04	3,46E-04	c ₁
A ⁽¹¹⁾	Błąd w technice pilotowania	4,15E-04	1,99E-04	c ₃
A ⁽¹²⁾	Zderzenie SP z ptakiem (ptakami)	3,87E-04	1,86E-04	c ₂
A ⁽¹³⁾	Niewłaściwa regulacja	3,32E-04	1,60E-04	c ₂
A ⁽¹⁴⁾	Nie ma możliwości ustalenia przyczyny zdarzenia	2,49E-04	1,20E-04	c ₂
A ⁽¹⁵⁾	Niezgodne z instrukcjami użytkowanie SP, jego urządzeń lub wyposażenia spowodowane pomyłką załogi	1,38E-04	6,65E-05	c ₄

Poziom zagrożeń, w postaci najbardziej prawdopodobnych strat po wystąpieniu określonego zdarzenia niepożądanego wyznaczono intuicyjnie, wzorując się na podstawie zaistniałych w przeszłości skutków. Odpowiednie kategorie strat zamieszczono w ostatniej kolumnie tabeli 3. Zgodnie z zależnością (6) iloczyn miary zawodności $Q^{(k)}(I)$ oraz miary zagrożeń $Z_0^{(k)}$ jest poszukiwaną miarą ryzyka dla każdego z rozważanych ZN. Tę miarę ryzyka ($C_0^{(k)}(I)$) przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 2.

W wyniku analizy wykresu (rys.2) okazało się, że zdarzeniami o największym ryzyku wystąpienia poważnych strat są następujące ZN: A⁽¹⁾, A⁽⁶⁾, A⁽³⁾ oraz A⁽²⁾; czyli nieutrzymywanie parametrów lub niewłaściwe działanie urządzeń, zmęczenie materiału, techniczne zużycie elementu lub zespołów statku powietrznego w czasie jego eksploatacji powodujące konieczność ich przedwczesnej wymiany oraz zdarzenia oznaczone jako pozostałe.

Rys. 2 Wyniki analizy ryzyka

4. Wnioski

Pomimo, że wydawać by się mogło, iż loty szkoleniowo–treningowe są zajęciem wysoko niebezpiecznym, straty wywołane eksploatacją tego rodzaju statków powietrznych nie są wyjątkowo ciężkie. Wniosek ten został wyciągnięty na podstawie analizy najbardziej prawdopodobnych rozmiarów strat, szczegółowo przedstawionych na rysunku 2. Na ogół zdarzenia niepożądane nie wywołują jakichkolwiek następstw, lub skutki zdarzeń kwalifikowane są jako incydenty.

Sumaryczna ilość zdarzeń niepożądanych dla wynosi 950, czyli prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niepożądanego podczas jednego lotu wynosi $1,26 \cdot 10^{-3}$. Jest to liczba dość znacząca w porównaniu do eksploatacji urządzeń lądowych.

Podczas całego okresu eksploatacji nastąpiło tylko jedno zdarzenie powodujące katastrofę lotniczą. Stało się to w wyniku zmęczenia materiału.

W celu zwiększenia poziomu bezpieczeństwa należy zwrócić uwagę na zdarzenia niepożądane charakteryzujące się największym ryzykiem. Dlatego tak ważne są działania związane z odpowiednią eksploatacją. Przeglądy powinny być wykonywane w czasie zgodnym z instrukcją, a naprawy powinny być wykonane prawidłowo. Istotną czynnością jest monitorowanie obciążeń oraz monitorowanie struktury za pomocą badań nieniszczących, co znacząco wpływa na bezpieczeństwo statków powietrznych.

5. Bibliografia

- [1] Szopa T.: Niezawodność i bezpieczeństwo. Oficyna Wyd. PW, Warszawa 2009.
- [2] MIL-STD-882.: DEPARTMENT OF DEFENSE, STANDARD PRACTICE FOR SYSTEM SAFETY, 2000.
- [3] Matyjewski M., Sztuka P.: Ilościowa analiza ryzyka w systemie pilot-samolot sportowy-lotnisko, Materiały XXXVIII Szkoły Niezawodności, Ryzyko w eksploatacji systemów technicznych, str. 113-119, Szczyrk 2010.
- [4] Kwasek T.: PZL-130 Orlik, Militarium.net, 2008.
- [5] Bedford T., Cooke R.: Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods. Cambridge University Press, 2001.

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 hab. inż. Marek Matyjewski, Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa. Habilitacja w dyscyplinie mechanika. Najważniejsze zainteresowania naukowe: biomechanika kręgosłupa, biomechanika zderzeń, bezpieczeństwo w ruchu drogowym, probabilistyczna analiza ryzyka, niezawodność człowieka.