

Józef Żurek
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

MODEL OCENY NADMIARÓW W LOTNICZYCH SYSTEMACH BEZPIECZEŃSTWA

Streszczenie: W artykule omówiono problemy bezpieczeństwa w systemach lotniczych ze szczególnym uwzględnieniem techniki. Zdefiniowano stosowane w celu poprawy bezpieczeństwa, nadmiary w konstrukcji technicznych systemów statków powietrznych. Opisano nadmiary: strukturalny, funkcjonalny, czasowy, informacyjny, parametryczny i wytrzymałości. Dokonano szczegółowego opisu nadmiaru funkcjonalnego w postaci grafów i przedstawiono modele analityczne poszczególnych przypadków uszkodzeń oraz wzajemnego uzupełniania realizowanych funkcji. W opisie uwzględniono wskaźniki takie jak:

- prawdopodobieństwo poprawnego funkcjonowania całego układu;
- prawdopodobieństwa funkcjonowania układu z uszkodzeniami poszczególnych elementów;
- prawdopodobieństwa stanów niezdatności po uszkodzeniu poszczególnych elementów;
- intensywności uszkodzeń elementów realizujących pojedyncze funkcje;
- intensywności uszkodzeń elementów realizujących podwójne funkcje;
- intensywności odnowy uszkodzonych elementów.

Przeprowadzono analizę niezawodności i bezpieczeństwa układu z nadmiarem funkcjonalnym.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo, transport lotniczy, ryzyko zagrożeń.

1. WPROWADZENIE

Bezpieczeństwo lotów statków powietrznych jest jednym z najważniejszych przedsięwzięć w transporcie lotniczym.

Pomimo dużych starań służb technicznych jednak zdarzają się, awarie sprzętu, które są przyczyną niebezpiecznych sytuacji w locie. Układy zabezpieczające przejmując funkcję zespołów uszkodzonych zapobiegają niebezpiecznym sytuacjom w locie i ratują statki przed zniszczeniem lub tylko ratują pilota w przypadku samolotów wojskowych i lekkich samolotów dyspozycyjnych. Z układami zabezpieczającymi wiążą się stany i zdarzenia [3]:

- stan gotowości do użycia;
- przejęcie funkcji układu podstawowego po jego uszkodzeniu;

Konstrukcje lotnicze posiadają układy zabezpieczające, które w przypadku awarii przejmują funkcje sprzętu zespołów podstawowych. Układy zabezpieczające stanowiące

rezervę systemów podstawowych wymagają specjalnego traktowania w procesie eksploatacji statków powietrznych, które sprowadza się do:

- utrzymania ich w odpowiednim stanie gotowości do użycia w przypadku awarii układów podstawowych;
- możliwości włączenia w odpowiednim czasie do pracy, który zapewni skuteczność funkcjonowania.

Statek powietrzny można potraktować, jako system składający się z płatowca, zespołu napędowego układu sterowania, osprzętu, wyposażenia pokładowego i uzbrojenia w przypadku samolotów i śmigłowców wojskowych.

2. NADMIAROWE STRUKTURY NIEZAWODNOŚCI

Prawie wszystkie zespoły i układy funkcjonalne statku powietrznego posiadają nadmiarową strukturę niezawodnościową, co oznacza, że występujące uszkodzenia niektórych elementów nie powodują niezdatności statku i nie zagrażają bezpieczeństwu lotów. Wyróżniamy następujące nadmiary [1]:

◆ **Nadmiar strukturalny.** Polega na zastosowaniu układów i elementów podstawowych realizujących przypisane funkcje oraz układów i elementów rezerwowych włączających się do pracy w przypadku uszkodzenia elementów podstawowych. Reprezentantem systemu z nadmiarem strukturalnym jest system wypuszczania podwozia na samolocie, składający się z podsystemu podstawowego i awaryjnego (rezerwowego). Układ rezerwowy wykorzystuje się w przypadku, gdy zawiedzie układ podstawowy. Innymi przykładami nadmiaru strukturalnego są zapasowe urządzenia na pokładzie samolotów pasażerskich, które służą do wymiany w locie urządzeń uszkodzonych

◆ **Nadmiar funkcjonalny.** Polega na tym, że element wykonuje swoją ściśle określoną funkcję, jednakże w określonych sytuacjach może on pełnić dodatkową funkcję zamiast elementu uszkodzonego. Można to wyjaśnić na przykładzie podwozia i pokrycia samolotu. Funkcją podwozia samolotu jest zapewnienie startu i lądowania samolotu, a pokrycia samolotu – zapewnienie odpowiednich kształtów aerodynamicznych samolotu. W razie uszkodzenia podwozia pokrycie samolotu spełnia zastępczo funkcję podwozia, umożliwiając awaryjne lądowanie samolotu.

◆ **Nadmiar czasowy.** Sprowadza się do współdziałania elementów systemu, a w szczególności do współdziałania człowieka z systemem technicznym. Przykładem mogą tu być rezerwowe źródła zasilania, możliwość rozruchu silnika w powietrzu (nadmiar czasu zależy od wysokości lotu) itp.

◆ **Nadmiar informacyjny.** Polega na zdwojeniu (dublowaniu) informacji (np. świetlna i mechaniczna sygnalizacja wypuszczania podwozia samolotu). Systemy wyposażone w takie elementy określa się jako systemy z nadmiarem informacyjnym.

◆ **Nadmiar parametryczny.** Cechy systemów muszą odpowiadać określonym wymaganiom dotyczącym zakresu ich zmienności. Istotne cechy (wielkości) systemu noszą nazwę parametrów. Przykładem parametru jest moc silnika. Konstruktor określa zakres mocy silnika niezbędnej do zapewnienia lotu statku powietrznego. Zazwyczaj w samolotach dwusilnikowych moc pojedynczego silnika umożliwia lot samolotu (z

ograniczeniami). Pomimo uszkodzenia jednego silnika w wielu przypadkach istnieje możliwość bezpiecznego lądowania samolotu. Podobnie można powiedzieć o wielocylindrowym silniku spalinowym. Moc takiego silnika znajduje się w dopuszczalnym przedziale, gdy co najmniej m z n cylindrów jest w stanie zdadności.

♦ **Nadmiar wytrzymałości.** W procesie projektowania konstrukcji wprowadza się tak zwany współczynnik bezpieczeństwa. Współczynnik bezpieczeństwa ustala się zarówno dla konstrukcji mechanicznych, jak też dla urządzeń elektrycznych i pneumatycznych. Systemy takie określa się, jako mające nadmiar wytrzymałości.

Na SP występują z reguły wszystkie formy nadmiaru łącznie i zwiększają one zarówno bezpieczeństwo czynne jak i bierne. Bezpieczeństwo czynne uzależnione jest od nadmiarów zabezpieczających poprawne funkcjonowanie SP, a bezpieczeństwo bierne ma na celu złagodzenie skutków wypadków lotniczych. Bezpieczeństwo SP zależy od wprowadzanych przedsięwzięć technicznych i organizacyjnych w celu zmniejszenia stopnia zagrożenia zarówno w fazie zapobiegania rozwojowi wypadku jak i w fazie łagodzenia jego skutków.

Badania eksploatacyjne systemów bezpieczeństwa napotykać duże trudności. Wynika to z ograniczonych możliwości zbierania danych eksploatacyjnych. Zapewnienie dostatecznej wiarygodności oceny wskaźników bezpieczeństwa jest bardzo trudne, dlatego istotną rolę odgrywa prowadzenie modelowych badań systemu bezpieczeństwa. Wyznacza się na podstawie doświadczenia parametry modelu, a następnie szacuje wskaźniki niezawodności i bezpieczeństwa systemu. Proces modelowania rozpoczyna się od tworzenia modelu funkcjonalnego z punktu widzenia niezawodności i bezpieczeństwa.

Ze względu na ograniczone ramy artykułu przedstawiony zostanie jedynie model analizy systemu z nadmiarem funkcjonalnym.

3. NADMIAR FUNKCJONALNY

Większość systemów nadmiarowych należy do klasy systemów, które mogą być opisane analitycznie. W tym celu niezbędne jest zdefiniowanie poszczególnych stanów systemów nadmiarowych. Podstawowym stanem systemu nadmiarowego jest stan zdadności. System techniczny znajduje się w stanie zdadności jeśli jego cechy C spełniają wymagania W . Aby opisać stan zdadności systemu należy wyznaczyć zbiór C oraz zbiór wymagań W i porównać jedno z drugim $C \subset W$. System nadmiarowy składa się, co najmniej z dwóch elementów, odnośnie których można stwierdzić czy zbiór cech systemu nadmiarowego spełnia zbiór wymagań. Są to jednak specyficzne cechy i specyficzne wymagania, dotyczą one obiektów składowych i zachodzących relacji między tymi obiektami, które powinny istnieć pomiędzy elementami składowymi systemu, aby można było uznać, że system jest nadmiarowy. Od dwóch elementów będących w relacji nadmiaru funkcjonalnego wymaga się, aby każdy z elementów obok specyficznych kwalifikacji, dysponował w określonym zakresie kwalifikacjami drugiego elementu. W określonych warunkach element systemu nadmiarowego powinien posiadać możliwość realizacji funkcji obydwu elementów. W rozpatrywanym przypadku można powiedzieć, że system nadmiarowy typu „nadmiar funkcjonalny” znajduje się w stanie zdadności jeżeli elementy składowe znajdują się w stanie zdadności i ich potencjał posiada określone

możliwości do dodatkowego działania. Nasuwa się pytanie jak nazwać stan gdy jeden elementów jest niezdatny, a drugi element jest nadmiernie obciążony realizacją obu zadań. Umówiono się nazywać ten stan – stanem pośredniej zdatności. Grafy takich systemów nadmiarowych przedstawiono na poniższych rysunkach: 1, 2, 3, 4.

Gdzie:

$R(t)$ - prawdopodobieństwo poprawnego funkcjonowania całego układu;

$P_1(t)$ - prawdopodobieństwo funkcjonowania układu z uszkodzeniem pierwszego elementu,

gdy drugi realizuje dwie funkcje;

$Q_{1/2}(t)$ - prawdopodobieństwo stanu niezdatności po uszkodzeniu drugiego elementu;

$P_2(t)$ - prawdopodobieństwo funkcjonowania układu z uszkodzeniem drugiego elementu, gdy pierwszy realizuje dwie funkcje;

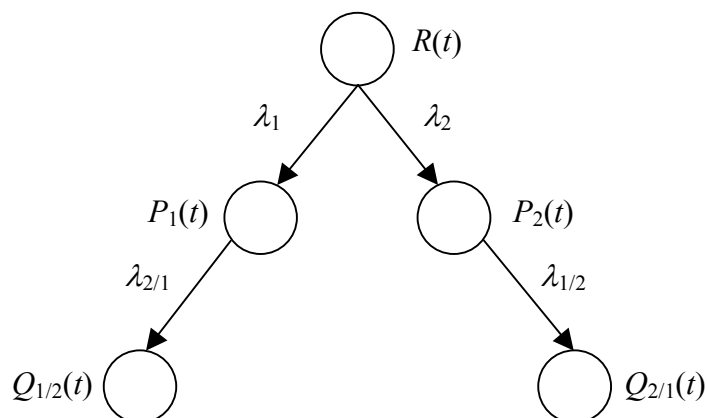
$Q_{2/1}(t)$ - prawdopodobieństwo stanu niezdatności po uszkodzeniu drugiego elementu;

λ_1, λ_2 - intensywności uszkodzeń elementów realizujących pojedyncze funkcje;

$\lambda_{1/2}, \lambda_{2/1}$ - intensywności uszkodzeń elementów realizujących podwójne funkcje;

μ_1, μ_2 – intensywności odnowy uszkodzonych elementów;

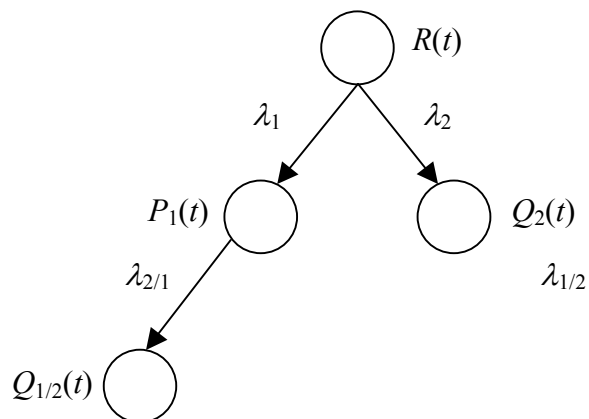
$\mu_{1/2}, \mu_{2/1}$ – łączne intensywności odnowy uszkodzonych elementów.



Rys. 1. Graf systemu nadmiarowego typu „nadmiar funkcjonalny”

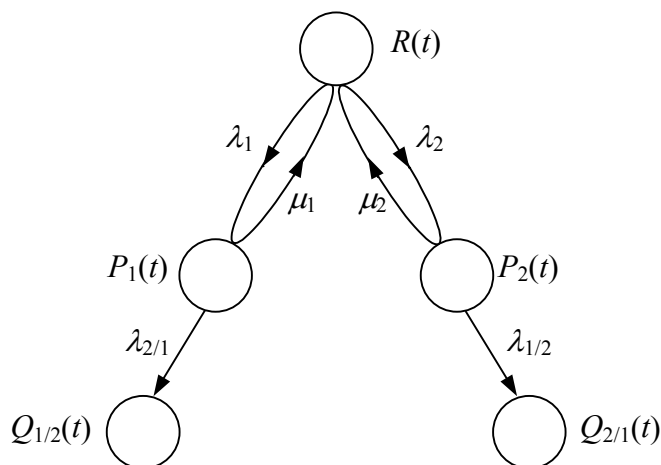
Termin „system nadmiarowy” zakłada symetrię. Często występują sytuacje, gdy nadmiar funkcjonalny jest niesymetryczny. Przykładem takiego systemu nadmiarowego jest w wielu przypadkach system typu „obiekt techniczny – człowiek”. Jako przykład można podać system nadmiarowy typu „pilot – autopilot”. Pilot jest w stanie w każdej chwili zastąpić autopilota, autopilot w wielu przypadkach nie jest w stanie zastąpić pilota.

Na rys. 2 przedstawiono graf systemu nadmiarowego typu „niesymetryczny nadmiar funkcjonalny”.



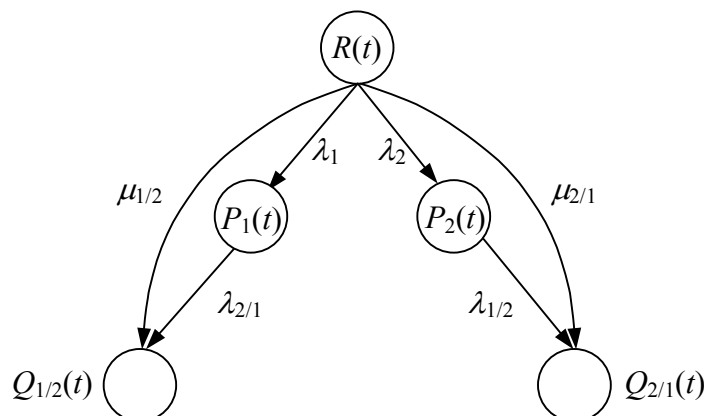
Rys. 2. Graf systemu nadmiarowego typu „niesymetryczny nadmiar funkcjonalny”

System stacjonarny typu „nadmiar funkcjonalny” może być traktowany jako odnawialny. Na rys. 3 przedstawiono graf takiego systemu, w którym następuje wymiana uszkodzonego elementu. System jako całość przechodzi do stanu pełnej zdatności.



Rys. 3. Graf systemu nadmiarowego typu „nadmiar funkcjonalny” z odwracalnym stanem pośredniej zdadności

Można również przyjąć, że odnowie podlega cały system nadmiarowy, co ilustruje graf na rys. 4.



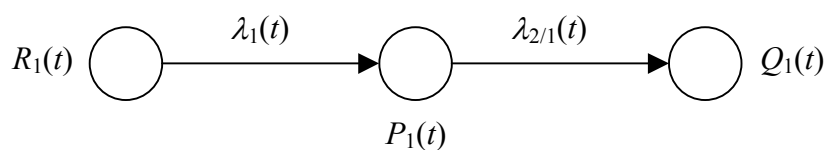
Rys. 4. System nadmiarowy typu „nadmiar funkcjonalny” z odnową

Systemy te mogą być analizowane z wykorzystaniem procesów markowskich i półmarkowskich.

4. ANALIZA SYSTEMÓW NADMIAROWYCH TYPU „NADMIAR FUNKCJONALNY

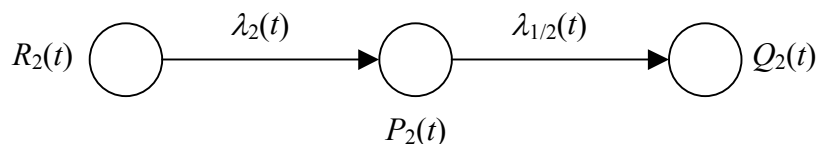
Graf systemu nadmiarowego (nadmiar funkcjonalny) pokazano na rys. 1. Dla uproszczenia analizy przyjmuje się, że realizacja poszczególnych gałęzi grafu dokonywana jest z określonymi prawdopodobieństwami.

1. Z prawdopodobieństwem $\alpha_1 P(T_2 > T_1)$ występuje sytuacja zobrazona na rys. 5.



Rys. 5. Realizacja grafu 1 z prawdopodobieństwem $\alpha_1 P(T_2 > T_1)$

2. Z prawdopodobieństwem $\alpha_2 P(T_1 > T_2)$ występuje sytuacja zobrazona na rys. 6.



Rys. 6. Realizacja grafu 1 z prawdopodobieństwem $\alpha_2 P(T_1 > T_2)$

Graf przedstawiony na rys. 5 można opisać układem równań różniczkowych Kołmogorowa-Chapmana:

$$\begin{aligned} R_1'(t) &= R_1(t) \lambda_1(t) \\ P_1'(t) &= R_1(t) \lambda_1(t) - P_1(t) \lambda_{2/1}(t) \\ Q_1'(t) &= P_1(t) \lambda_{1/2}(t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Rozwiązując układ równań Kołmogorowa-Chapmana otrzymujemy:

$$\begin{aligned} R_1(t) &= \exp[-\Lambda_1(t)] \\ P_1(t) &= \left\{ \exp[-\Lambda_{2/1}(t)] \int_0^t \lambda_1(\tau) R_1(\tau) \exp[\Lambda_{2/1}(\tau)] d\tau \right\} \\ Q_1(t) &= \int_0^t \lambda_{2/1}(\tau) P_1(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (2.2)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \Lambda_1(t) &= \int_0^t \lambda_1(\tau) d\tau; \\ \Lambda_{2/1}(t) &= \int_0^t \lambda_{2/1}(\tau) d\tau. \end{aligned}$$

Przyjmując $\lambda_1(t) = \lambda_1$, $\lambda_{2/1}(t) = \lambda_{2/1}$, otrzymujemy;

$$\begin{aligned} R_1(t) &= \exp[-\lambda_1 t] \\ P_1(t) &= \frac{\lambda_1}{\lambda_{2/1} - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_{2/1} t)] \\ Q_1(t) &= 1 - [R_1(t) + P_1(t)] \end{aligned} \quad (2.3)$$

W drugim przypadku zobrazowanym na rys. 2.6, przyjmując, że $\lambda_2(t) = \lambda_2$, $\lambda_{1/2}(t) = \lambda_{1/2}$ otrzymujemy:

$$\begin{aligned} R_2(t) &= \exp[-\lambda_2 t] \\ P_2(t) &= \frac{\lambda_2}{\lambda_{1/2} - \lambda_2} [\exp(-\lambda_2 t) - \exp(-\lambda_{1/2} t)] \\ Q_2(t) &= 1 - [R_2(t) + P_2(t)] \end{aligned} \quad (2.4)$$

Parametry systemu nadmiarowego wyznaczamy ze wzorów:

$$R_0(t) = \alpha_1 R_1(t) + \alpha_2 R_2(t)$$

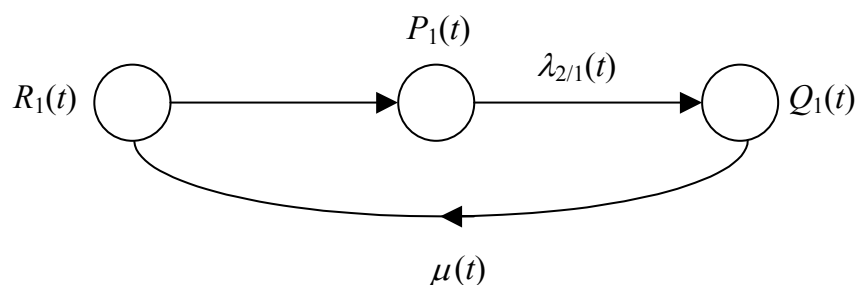
$$P(t) = P_1(t)\alpha_1 + P_2(t)\alpha_2 \quad (2.5)$$

$$Q(t) = \alpha_1 Q_1(t) + \alpha_2 Q_2(t)$$

5. ANALIZA SYSTEMÓW NADMIAROWYCH TYPU „NADMIAR FUNKCJONALNY” Z ODNOWĄ

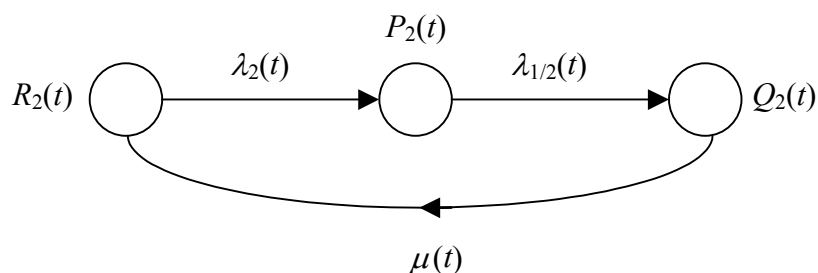
Graf systemu nadmiarowego (nadmiar funkcjonalny z odnową) pokazano na rys. 4. Dla uproszczenia analizy przyjmuje się, że realizacja poszczególnych gałęzi grafu dokonywana jest z prawdopodobieństwami.

1. Z prawdopodobieństwem $\alpha_1 P(T_2 > T_1)$ występuje sytuacja zobrazona na rys. 7.



Rys. 7. Realizacja grafu 4 z prawdopodobieństwem $\alpha_1 P(T_2 > T_1)$

2. Z prawdopodobieństwem $\alpha_2 P(T_1 > T_2)$ występuje sytuacja zobrazona na rys. 8.



Rys. 8. Realizacja grafu 4 z prawdopodobieństwem $\alpha_2 P(T_1 > T_2)$

Model przedstawiony na rys. 7 jest opisany układem równań różniczkowych Kołmogorowa-Chapmana:

$$\begin{aligned} R_1'(t) &= -\lambda_1(t) R_1(t) + \mu(t) Q_2(t) \\ P_1'(t) &= -\lambda_{2/1}(t) P_2(t) + \lambda_1(t) R_1(t) \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$Q_1(t) = -\mu(t)Q_1(t) + P_1(t)\lambda_{2/1}(t)$$

Dla przypadku $\lambda_1(t) = \lambda_1$, $\lambda_{2/1}(t) = \lambda_{2/1}$, otrzymujemy:

$$\begin{aligned}\tilde{R}_1(s) &= \frac{(\lambda_{2/1} + s)(\mu + s)}{s D(s)} \\ \tilde{P}_1(s) &= \frac{\lambda_1 (\mu + s)}{s D(s)} \\ \tilde{Q}_1(s) &= \frac{\lambda_1 \lambda_{2/1}}{s D(s)}\end{aligned}\tag{2.7}$$

$$\tilde{D}(s) = s^2 + s(\mu + \lambda_1 + \lambda_{2/1}) + \mu \lambda_1 + \mu \lambda_{2/1} + \lambda_1 \lambda_{2/1}$$

Wartości stacjonarne otrzymujemy:

$$\begin{aligned}R_1 &= \lim_{s \rightarrow 0} s R(s) = \frac{\mu \lambda_{2/1}}{\mu \lambda_1 + \mu \lambda_{2/1} + \lambda_1 \lambda_{2/1}} \\ P_1 &= \lim_{s \rightarrow 0} s P_1(s) = \frac{\mu_1 \lambda_1}{\mu \lambda_1 + \mu \lambda_{2/1} + \lambda_1 \lambda_{2/1}} \\ Q_1 &= \lim_{s \rightarrow 0} s Q(s) = \frac{\lambda_1 \lambda_{2/1}}{\mu \lambda_1 + \mu \lambda_{2/1} + \lambda_1 \lambda_{2/1}}\end{aligned}\tag{2.8}$$

Rozwiązując drugą połowę równania, otrzymujemy $R_2(t)$, $P_2(t)$ i $Q_2(t)$.
Gotowość systemu nadmiarowego dana jest wzorem:

$$Q = \alpha_1 Q_1 + \alpha_2 Q_2\tag{2.9}$$

6. ZAKOŃCZENIE

Wielość podmiotów funkcjonujących w lotnictwie i zajmujących się bezpieczeństwem sprawia, że istnieje rozbieżność poglądów i interpretacji pojęć, miar oraz pomysłów dotyczących ocen i zarządzania bezpieczeństwem. Każdy może inaczej rozumieć przepisy lub standardy zakresie wymagań i działań zapobiegawczych. Niejednoznaczność definicji i interpretacji pojęć świadczy, że tworząca się nowa dyscyplina naukowa, jaką jest bezpieczeństwo, posiada stosunkowo słabo ugruntowane podstawowe określenia, normy i miary. Otwartymi problemami pozostają też badania zagrożeń bezpieczeństwa i ocena jego stanu. W artykule powyższym zaproponowano fragmentaryczną metodę analizy wybranego układu konstrukcji i na przykładzie jednego rodzaju nadmiaru. Przedstawiono zależności do wyznaczenia prawdopodobieństw zdarzeń oraz szacowania bezpieczeństwa lotu z ryzykiem awarii statku powietrznego. System Lotniczy będący przedmiotem analizy z punktu widzenia bezpieczeństwa lotów w uproszczonym modelu zawiera podsystemy takie jak: załoga, statek powietrzny, ośrodek kierowania lotami i podsystem naziemnego

zabezpieczenia działań. Każdy z wymienionych podsystemów jest generatorem zagrożeń, których przyczyną mogą być:

- zakłócenia zewnętrzne (np. klimatyczno-przyrodnicze),
- zakłócenia wewnętrzne pochodzące od właściwości organizacyjnych, funkcjonalnych, „czynnika ludzkiego”,
- destrukcji zużyciowo-starzeniowej statku powietrznego, innych niedoskonałości systemu.

W artykule podjęto problem bezpieczeństwa statku powietrznego, gdyż prakseologiczne pierwiastki bezpieczeństwa tkwią między innymi w różnych etapach tworzenia i eksploatacji techniki.

Literatura

1. Warzyńska-Fiok K., Jaźwiński J.: *Niezawodność systemów technicznych*. Wydawnictwo PWN Warszawa 1990
2. Borgoń J., Jaźwiński J., Klimaszewski S., Żmudziński Z., Żurek J.: *Symulacyjne metody badania bezpieczeństwa lotów*, ASKON, Warszawa 1998.
3. Żurek J.: *Modelowanie symboliczne systemów bezpieczeństwa i niezawodności w transporcie lotniczym* (rozprawa habilitacyjna), Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Prace Naukowe, Transport, z. 39, Warszawa 1998.
4. Żurek J.: *Reliability of protection systems to counteract a dangerous situation*, Archiwum Transportu, nr 4, 2000.
5. *Żywotność Śmigłowców*. Praca zbiorowa pod redakcją naukową Józefa Żurka. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2006.
6. Henryk Tomaszek, Józef Żurek, Michał Jasztal, *Prognozowanie uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu lotów statków powietrznych*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2008.

EXCESS EVALUATION MODEL IN AIR SAFETY SYSTEMS

Abstract: In this article there has been discussed safety problems in aviation systems. The technology has been especially taken into consideration. An excess in the structure of technical systems of aircraft, which is applied in order to improve safety, has been defined.

There have been described: structural excess, functional excess, time excess, information excess, parametric excess and durability excess. A detailed description of functional excess has been performed in the form of graphs. Analytical models of individual damage cases as well as mutual complementing of elements in functions that are being accomplished have been presented.

The following indications have been taken into consideration:

- the probability of proper functioning of the whole system
- the probability of functioning of the system with some elements being damaged
- the probability of conditions of unfitness after some elements had been damaged
- the intensity of damage to elements performing individual functions
- the intensity of damage to elements performing dual functions
- the intensity of regeneration of damaged elements

There has been carried out an analysis of reliability and safety of the system with functional excess.

Keywords: safety, air transport, hazards risk