RISK ANALYSIS IN CASE OF FIRE ON PZL BRYZA USING THE EVENT TREE ANALYSIS

ANALIZA RYZYKA W PRZYPADKU POŻARU SAMOLOTU PZL BRYZA Z WYKORZYSTANIEM METODY DRZEWA ZDARZEŃ

Mateusz Papis, Marek Matyjewski

Politechnika Warszawska

e-mail: mpapis@meil.pw.edu.pl, mmatyjew@meil.pw.edu.pl

Abstract: The paper presents application of the Event Tree Analysis method for analyzing risk in complex situations. A model associated with the occurrence of fire on PZL Bryza was developed using the aircraft flight manual. The probabilities of events caused by the initiating event and the losses caused by each of the highlighted final undesirable events were determined. Statistical data for flight safety was used to calculate probability of the initiating event. The risk was determined as the probability that losses of at least given category will occur during one flight. As a result of the conducted analysis it was found that the probability of in-flight fire is very small. However, in such a case, the probability of death of one or more passengers is relatively high.

Keywords: risk analysis, Event Tree Analysis, flight safety

Streszczenie: Tematem publikacji jest wykorzystanie metody drzewa zdarzeń do analizy ryzyka w sytuacjach złożonych. Zbudowano model związany z wystąpieniem pożaru na pokładzie samolotu PZL Bryza z wykorzystaniem instrukcji użytkowania samolotu w locie. Określono prawdopodobieństwa zdarzeń spowodowanych przez zdarzenie inicjujące oraz straty spowodowane przez każde z wyróżnionych końcowych zdarzeń niepożądanych. Prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia inicjującego wyznaczono z wykorzystaniem danych statystycznych dotyczących bezpieczeństwa w lotnictwie. Ryzyko określono jako prawdopodobieństwo powstania strat co najmniej określonej kategorii w trakcie jednego lotu. W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że prawdopodobieństwo wystąpienia pożaru w locie jest znikome. Jednak w takim przypadku prawdopodobieństwo śmierci jednego lub więcej pasażerów jest stosunkowo wysokie.

Słowa kluczowe: analiza ryzyka, metoda drzewa zdarzeń, bezpieczeństwo lotów

1. Introduction

Nowadays, safety analysis is one of the priorities of science in the world. Engineers use many methods and tools for risk and reliability assessment. Development of safety engineering is revealed by the ability to better identify possible hazards, considering safety issues at the design stage of technical equipment and progress in the field of hazard prevention through the extension of existing methods of risk and reliability analysis and proposing new ones [6].

An important branch of mentioned science is flight safety, in particular risk management in aviation. Introduction of check-lists, complex situations and emergency instructions, audits and detailed inspections is primarily intended to prevention of hazards or, if they occur, to avoid or minimize the negative effects [4].

This analysis focuses on risk assessment in emergency and complex situations. Such cases are often connected with the inflow of incorrect or incomplete information and stress due to lack of time during activities related to risk reduction. It is proved [1] that a small deficit of time has a mobilizing effect on human activity, reducing the probability of errors. In case, when the fit time is shorter twice than the time required, sudden demobilization of the operator can be observed. It results in deterioration of all the parameters of error-free operation. High pressure is given on knowledge of the procedures in such situation e.g. through training and testing.

In this publication a diagram of possible scenarios in case of fire on board the aircraft was built. It includes situations where the crew did not acted properly due to stress, inability to cooperate, inadequate training, or simply did not have time to act because of the very rapid spread of the fire on board the aircraft.

2. Risk analysis methods

Methods due to the degree of accuracy of analyses can be divided into quantitative and qualitative. First ones are mainly probabilistic and statistics methods. Expert estimations are also often used. In these methods a suitable model and preparation of relevant data on the basis of studies, statistics and expertise have an important role [6].

Qualitative methods represent mainly matrix and index methods. They are less complex and easier to use than quantitative ones. They are commonly used in occupational risk analysis. However, these methods are not suitable to assess the total risk but only to compare the partial risks. The hazard level (consequences) is usually described using the most likely category of losses. Matrix methods rely on preparing of specific matrix with highlighting classes of consequences (losses) and unreliability and then classification of the analysed events. Index (multi-factor)

methods such as Risk Score, Five Steps, Job Safety Analysis, risk graph, risk index depend on the risk assessment as the product of several factors [3, 6].

Other tools are the tree techniques, which due to accuracy and detail can be used both to qualitative and quantitative descriptions. These are Fault Tree and Event Tree Analysis.

Risk modelling consists of two main stages resulting from its definition: estimating unreliability (the probability of an adverse event) and modelling threats and losses (consequences of the event). Fault Tree Analysis presents a combination of events leading to the considered undesirable event. Whereas, Event Tree Analysis used in this paper allows for the detailed description of losses (consequences) after occurrence of the initiating undesirable event by estimating the probability of subsequent secondary events which were the direct source of threats (losses). The Event Tree technique is namely a diagram showing the chronological sequence of events, which are important to the functioning of the object, occurring after the event initiating a sequence. Presentation of the logical relationship between the primary initiating event and subsequent events, which are the overview of the possible consequences of previous events, can determine all possible paths leading to the accident (occurrence of certain losses) [6, 7]

In this risk analysis, besides Event Tree Analysis, elements of probabilistic, statistic and expert judgement methods were also used.

3. Model of the analyzed event

Risk analysis for the purpose of the event (fire on PZL Bryza board) consisted of the following elements:

- description of symbols, relationships and model of losses;
- design of Event Tree on the basis of the aircraft flight manual [5] and afterwards estimation of probabilities of subsequent secondary events using expert methods;
- definition of the method to calculate the following values:
 - probabilities of occurrence of the highlighted final events,
 - consequences (losses) for the given final events,
 - probability of the initiating event,
 - risk of losses.

Symbols used in this paper are as follows:

- c_i - the losses of at least given category (i ranges from 1 to 5);
- q^k - the probability of occurrence of the final event k after fire;
- p_x^k - the probability of losses of category x after the final event k has already occurred;

- $z^k(c_i) = \sum_{x=i}^5 p_x^k$ – the probability of losses (consequences) of at least category **i** after the final event **k** has already occurred; (1)
- $Z^k(c_i) = z^k(c_i) \cdot q_k$ – the probability of losses (consequences) of at least category **i** as a result of the final event **k**; (2)
- $Z(c_i) = \sum_{k=1}^n Z^k(c_i)$ – the probability of losses (consequences) of at least category **i** after fire (as a result of the all **n** final events); (3)
- $Q(1)$ – the probability of the initiating event i.e. fire during **one** flight;
- $\Lambda^k(c_i, 1) = Q(1) \cdot Z^k(c_i)$ – the partial risk of losses of at least category **i** as a result of the final event **k**; (4)
- $\Lambda(c_i, 1) = \sum_{k=1}^n \Lambda^k(c_i, 1) = Q(1) \cdot Z(c_i)$ – the total risk of losses of at least category **i** as a result of fire during **one** flight. (5)

The Event Tree designed on the basis of the aircraft flight manual [5] is shown in Fig. 1. The final events were numbered from 1 to 18 and marked in colours: light green (in the case when the event for most cases ends well) or bright red (negative). The initiating event was marked in yellow, while the others (indirect) events in gray. For each event the indicative probability of its occurrence (determined using an expert method) was determined.

It should be emphasized that the constructed scheme is not a typical Event Tree because not all events are a consequence (result) of the previous events. Sometimes it is only a distinction between the different situations, scenarios (eg. the aircraft is or is not moving) but not precisely determined and numbered the sequence.

Assuming that on the plane are 20 passengers, the following **categories of losses** for the final undesirable events were defined:

- c_1 – no one was hurt (permissible minor injuries of the passengers);
- c_2 – some passengers were injured (injuries from moderate to severe) but no one died;
- c_3 – some of the passengers (1-10 people) died in the accident;
- c_4 – most of the passengers (11-19 people) died in the accident;
- c_5 – all passengers died in the accident.

4. Determination of the risk of losses due to fire

The probability of each event occurrence is the product of the probabilities of all events on the "path" marked in Fig. 1: for example $q^1 = 0.1 * 0.5 * (0.9 * 0.8 * 0.8 + 0.9 * 0.8) = 0.0648$.

All calculated probabilities q are included in Table 2.

The probabilities of losses of given category and losses of at least given category (consequences) for each final event (after it has already occurred) were estimated (according to the formula (1)) with the expert method. The results are included in Table 1.

Fig. 1. The Event Tree in case of fire

Table 1. The probability of losses and measure of losses for final events

losses	p_x^k	$z^k(c_i)$	losses	p_x^k	$z^k(c_i)$	losses	p_x^k	$z^k(c_i)$
1st final event			7th final event			13th final event		
c_1	0.8	1	c_1	0	1	c_1	0.4	1
c_2	0.2	0.2	c_2	0	1	c_2	0.6	0.6
c_3	0	0	c_3	0	1	c_3	0	0
c_4	0	0	c_4	0	1	c_4	0	0
c_5	0	0	c_5	1	1	c_5	0	0
2nd final event			8th final event			14th final event		
c_1	0.05	1	c_1	0.7	1	c_1	0	1
c_2	0.1	0.95	c_2	0.3	0.3	c_2	0	1
c_3	0.25	0.85	c_3	0	0	c_3	0.15	1
c_4	0.3	0.6	c_4	0	0	c_4	0.2	0.85
c_5	0.3	0.3	c_5	0	0	c_5	0.65	0.65
3rd final event			9th final event			15th final event		
c_1	0	1	c_1	0	1	c_1	0	1
c_2	0.15	1	c_2	0	1	c_2	0	1
c_3	0.1	0.85	c_3	0.25	1	c_3	0	1
c_4	0.25	0.75	c_4	0.25	0.75	c_4	0	1
c_5	0.5	0.5	c_5	0.5	0.5	c_5	1	1
4th final event			10th final event			16th final event		
c_1	0.05	1	c_1	0	1	c_1	0	1
c_2	0.05	0.95	c_2	0	1	c_2	0	1
c_3	0.1	0.9	c_3	0	1	c_3	0	1
c_4	0.4	0.8	c_4	0	1	c_4	0	1
c_5	0.4	0.4	c_5	1	1	c_5	1	1
5th final event			11th final event			17th final event		
c_1	0.4	1	c_1	0	1	c_1	1	1
c_2	0.6	0.6	c_2	0.1	1	c_2	0	0
c_3	0	0	c_3	0.1	0.9	c_3	0	0
c_4	0	0	c_4	0.2	0.8	c_4	0	0
c_5	0	0	c_5	0.6	0.6	c_5	0	0
6th final event			12th final event			18th final event		
c_1	0	1	c_1	1	1	c_1	0	1
c_2	0	1	c_2	0	0	c_2	0	1
c_3	0.15	1	c_3	0	0	c_3	0	1
c_4	0.2	0.85	c_4	0	0	c_4	0	1
c_5	0.65	0.5	c_5	0	0	c_5	1	1

Table 2 contains the probabilities of losses (consequences) of at least given category as a result of each final event according to the formula (2).

Table 2. Losses (consequences) as a result of final events

losses	$z^k(c_i)$	$Z^k(c_i)$	losses	$z^k(c_i)$	$Z^k(c_i)$	losses	$z^k(c_i)$	$Z^k(c_i)$
1st FE	$q^1 =$	0.0648	7th FE	$q^7 =$	0.00616	13th FE	$q^{13} =$	0.01385
c_1	1	0.0648	c_1	1	0.00616	c_1	1	0.01385
c_2	0.2	0.01296	c_2	1	0.00616	c_2	0.6	0.00831
c_3	0	0	c_3	1	0.00616	c_3	0	0
c_4	0	0	c_4	1	0.00616	c_4	0	0
c_5	0	0	c_5	1	0.00616	c_5	0	0
2nd FE	$q^2 =$	0.0162	8th FE	$q^8 =$	0.26483	14th FE	$q^{14} =$	0.00923
c_1	1	0.0162	c_1	1	0.26483	c_1	1	0.00923
c_2	0.95	0.01539	c_2	0.3	0.079449	c_2	1	0.00923
c_3	0.85	0.01377	c_3	0	0	c_3	1	0.00923
c_4	0.6	0.00972	c_4	0	0	c_4	0.85	0.0078455
c_5	0.3	0.00486	c_5	0	0	c_5	0.65	0.0059995
3rd FE	$q^3 =$	0.005	9th FE	$q^9 =$	0.02943	15th FE	$q^{15} =$	0.02565
c_1	1	0.005	c_1	1	0.02943	c_1	1	0.02565
c_2	1	0.005	c_2	1	0.02943	c_2	1	0.02565
c_3	0.85	0.00425	c_3	1	0.02943	c_3	1	0.02565
c_4	0.75	0.00375	c_4	0.75	0.0220725	c_4	1	0.02565
c_5	0.5	0.0025	c_5	0.5	0.014715	c_5	1	0.02565
4th FE	$q^4 =$	0.014	10th FE	$q^{10} =$	0.0342	16th FE	$q^{16} =$	0.027
c_1	1	0.014	c_1	1	0.0342	c_1	1	0.027
c_2	0.95	0.0133	c_2	1	0.0342	c_2	1	0.027
c_3	0.9	0.0126	c_3	1	0.0342	c_3	1	0.027
c_4	0.8	0.0112	c_4	1	0.0342	c_4	1	0.027
c_5	0.4	0.0056	c_5	1	0.0342	c_5	1	0.027
5th FE	$q^5 =$	0.00406	11th FE	$q^{11} =$	0.018	17th FE	$q^{17} =$	0.25137
c_1	1	0.00406	c_1	1	0.018	c_1	1	0.25137
c_2	0.6	0.002436	c_2	1	0.018	c_2	0	0
c_3	0	0	c_3	0.9	0.0162	c_3	0	0
c_4	0	0	c_4	0.8	0.0144	c_4	0	0
c_5	0	0	c_5	0.6	0.0108	c_5	0	0
6th FE	$q^6 =$	0.00332	12th FE	$q^{12} =$	0.20777	18th FE	$q^{18} =$	0.00513
c_1	1	0.00332	c_1	1	0.20777	c_1	1	0.00513
c_2	1	0.00332	c_2	0	0	c_2	1	0.00513
c_3	1	0.00332	c_3	0	0	c_3	1	0.00513
c_4	0.85	0.002822	c_4	0	0	c_4	1	0.00513
c_5	0.65	0.002158	c_5	0	0	c_5	1	0.00513

For further calculations **the probability of losses (consequences) of at least given category after a fire occurred (as a result of the all final events)** is required. It is needed to sum up the probabilities of losses listed in *Table 2* according to the formula (3). The results are shown in *Table 3*.

Table 3. Losses (consequences) after fire

losses	$Z(c_i)$
c_1	1
c_2	0.294965
c_3	0.18694
c_4	0.16995
c_5	0.1447725

Stages of the procedure for determining **the probability of the initiating event** i.e. fire **during one flight** $Q(1)$ are as follows:

- 1) Estimating the probability of a fatal accident as a result of a fire during one flight, so the risk of at least c_3 category of losses (fatal accidents) - based on the graph (Fig. 2) and the diagram (Fig. 3) from EASA statistics [2];
- 2) Determination of the probability of losses (consequences) of at least c_3 after the fire;
- 3) Calculation of the probability of the initiating event i.e. fire during one flight using the relationship (5).

Ad 1).

Fig. 2. The number of fatal accidents per 10 million flights [2]

The risk of losses of at least category c_3 (fatal accidents) during one flight can be estimated based on the graph (Fig. 2) and is as follows: $\frac{5}{10 \text{ mln}} [\frac{1}{\text{lot}}] = 5 \cdot 10^{-7} [\frac{1}{\text{lot}}]$.

Fig. 3. The number of accidents divided into their causes in the years 2002-2011 (general aviation, airplanes weighing more than 2250 kg) [2]

The category related to the fire on board is F-NI (Fig. 3). In this category, there were no fatal accidents, which does not mean that they are impossible but only unlikely. The probability of fatal accident as a result of fire is needed to estimate the probability of fire. It can be assumed that the percentage of fatal accidents caused by fire is the same as the ratio of accidents caused by fire in relation to the total number of accidents (without distinguishing between accidents with fatalities and without). Therefore, it was found that 5/224 (224 is the sum of all accidents), i.e. 2.23% of all accidents (also fatal) was caused by fire.

Finally:

$$\Lambda(c_3, 1) = \frac{0,0223 \cdot 5}{10\,000\,000} = 1,115 \cdot 10^{-8} [\frac{1}{\text{flight}}]$$

Ad 2). The probability of at least c_3 losses (consequences) after fire was determined previously in *Table 3*:

$$Z(c_3) = 0,18694$$

Ad 3). Rearranging equation (5) it is known that:

$$Q(1) = \frac{\Lambda(c_3, 1)}{Z(c_3)} = \frac{1,115 \cdot 10^{-8}}{0,18694} = 6,1517 \cdot 10^{-8} \left[\frac{1}{\text{flight}} \right]$$

According to formula (5) it is possible to determine **the risk of losses** of at least given category as a result of a fire on board. The results are shown in *Table 4*.

Table 4. The total risk of losses as a result of fire

Q(1)=	6.1517E-008	
losses	$Z(c_i)$	$\square(c_i, 1)$
c_1	1	6.1517E-008
c_2	0.294965	1.8145E-008
c_3	0.18694	1.1500E-008
c_4	0.16995	1.0455E-008
c_5	0.1447725	8.9060E-009

In order to check which final events had the greatest influence on the risk level, the partial risks (as result of given final events) were calculated according to formula (4). The results are presented in *Table 5* and *Fig. 4*.

Analysing the results (*Table 4*, *Table 5*, *Fig. 4*), it should be emphasized that the risk of losses of at least c_1 category is de facto the probability of fire in general. It is $6.15 \cdot 10^{-8}$, which means that, on average, in 1 to over 600 million flights a fire on board occurs. In addition, it is noted that the majority of these cases (approx. 70%) do not end up in higher injury or death of passengers. 18.7% of accidents result in death of one or more persons and approx. 14.5% of all the passengers.

Table 5. The risks of losses as a result of final events

losses	$Z^k(c_i)$	$\square^k(c_i)$	losses	$Z^k(c_i)$	$\square^k(c_i)$	losses	$Z^k(c_i)$	$\square^k(c_i)$
1st FE			7th FE			13th FE		
c_1	0.0648	3.99E-009	c_1	0.00616	3.79E-010	c_1	0.01385	8.52E-010
c_2	0.01296	7.97E-010	c_2	0.00616	3.79E-010	c_2	0.00831	5.11E-010
c_3	0	0	c_3	0.00616	3.79E-010	c_3	0	0
c_4	0	0	c_4	0.00616	3.79E-010	c_4	0	0
c_5	0	0	c_5	0.00616	3.79E-010	c_5	0	0
2nd FE			8th FE			14th FE		
c_1	0.0162	9.97E-010	c_1	0.26483	1.63E-008	c_1	0.00923	5.68E-010
c_2	0.01539	9.47E-010	c_2	0.079449	4.89E-009	c_2	0.00923	5.68E-010
c_3	0.01377	8.47E-010	c_3	0	0	c_3	0.00923	5.68E-010
c_4	0.00972	5.98E-010	c_4	0	0	c_4	0.0078455	4.83E-010
c_5	0.00486	2.99E-010	c_5	0	0	c_5	0.0059995	3.69E-010
3rd FE			9th FE			15th FE		
c_1	0.005	3.08E-010	c_1	0.02943	1.81E-009	c_1	0.02565	1.58E-009
c_2	0.005	3.08E-010	c_2	0.02943	1.81E-009	c_2	0.02565	1.58E-009
c_3	0.00425	2.61E-010	c_3	0.02943	1.81E-009	c_3	0.02565	1.58E-009
c_4	0.00375	2.31E-010	c_4	0.0220725	1.36E-009	c_4	0.02565	1.58E-009
c_5	0.0025	1.54E-010	c_5	0.014715	9.05E-010	c_5	0.02565	1.58E-009
4th FE			10th FE			16th FE		
c_1	0.014	8.61E-010	c_1	0.0342	2.10E-009	c_1	0.027	1.66E-009
c_2	0.0133	8.18E-010	c_2	0.0342	2.10E-009	c_2	0.027	1.66E-009
c_3	0.0126	7.75E-010	c_3	0.0342	2.10E-009	c_3	0.027	1.66E-009
c_4	0.0112	6.89E-010	c_4	0.0342	2.10E-009	c_4	0.027	1.66E-009
c_5	0.0056	3.44E-010	c_5	0.0342	2.10E-009	c_5	0.027	1.66E-009
5th FE			11th FE			17th FE		
c_1	0.00406	2.50E-010	c_1	0.018	1.11E-009	c_1	0.25137	1.55E-008
c_2	0.002436	1.50E-010	c_2	0.018	1.11E-009	c_2	0	0
c_3	0	0	c_3	0.0162	9.97E-010	c_3	0	0
c_4	0	0	c_4	0.0144	8.86E-010	c_4	0	0
c_5	0	0	c_5	0.0108	6.64E-010	c_5	0	0
6th FE			12th FE			18th FE		
c_1	0.00332	2.04E-010	c_1	0.20777	1.28E-008	c_1	0.00513	3.16E-010
c_2	0.00332	2.04E-010	c_2	0	0	c_2	0.00513	3.16E-010
c_3	0.00332	2.04E-010	c_3	0	0	c_3	0.00513	3.16E-010
c_4	0.002822	1.74E-010	c_4	0	0	c_4	0.00513	3.16E-010
c_5	0.002158	1.33E-010	c_5	0	0	c_5	0.00513	3.16E-010
						Q(1)=	6.1517E-008

Fig. 4. The partial risks as a result of particular final events

Analyzing the distribution of risk divided into partial risks (Fig. 4, Table 5) can be noted that for the category:

- **at least c_1** the biggest influence have the events: 8 (landing with one engine after a nacelle fire), 17 (turning off inefficient air conditioning system and further control), 12 (elimination of fire / smoke coming from the electrical system and further verification of devices). These events are the most likely situations due to the occurrence of a fire on board;
- **at least c_2** the biggest influence have the events: 8, 10 (a crew do not have time to perform the procedure of turning off and extinguishing faulty engine), 9 (disaster or accident during landing with one engine after a engine nacelle fire);
- **at least c_3** the biggest influence have the events: 10, 9, 16 (Disaster due to delays in identifying the cause of a fire in the cabin of the aircraft);
- **at least c_4 and at least c_5** the biggest influence have the events 10, 16, 15 (The crew do not have time to perform activities related to turning off faulty equipment, elimination of source of fire in electrical system or did it incorrectly).

5. Summary

The calculations allow to conclude that the probability of a fire during flight is very small. However, in such a case, the probability of death of one or more passengers is relatively high - approx. 19%.

The use of probabilistic risk assessment methods in combination with the Event Tree Analysis method can reduce errors resulting from expert estimates. It is much easier to estimate the probability of subsequent events after the previous one has occurred and losses than once estimate "loss distribution" as a result of a fire on aircraft board. Furthermore, it is also known which aircraft systems and situations can cause a fire.

The Tree Method Analysis can be widely used to assess the risk in aviation and also other technical fields.

6. References

- [1] Bagiński A, Żurek J: *Problems of safety in aviation. Problemy bezpieczeństwa w lotnictwie*, Journal of KONBiN, Nr 3(6)/2008, 5-24.
- [2] EASA: *Roczny przegląd bezpieczeństwa za rok 2011*.
- [3] Ficoń K.: *Zastosowanie rozmytych sterowników Mamdaniego do określania ryzyka wieloczynnikowego*, Zeszyty Naukowe AMW, Nr 3(194)/2013, 65-88.
- [4] Klich E.: *Bezpieczeństwo lotów*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2011.
- [5] PZL: *Instrukcja użytkowania w locie samolotu „Bryza 1”*, Mielec 2001.
- [6] Szopa T.: *Niezawodność i bezpieczeństwo*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2009.
- [7] You X., Tonon F.: *Event-Tree Analysis with Imprecise Probabilities*, Risk Analysis, Vol. 32(2)/2012, 330-344.

Mateusz Papis, MSc. graduated from the Faculty of Power and Aeronautical Engineering of Warsaw in 2015. He currently works as Research and Teaching Assistant at the Institute of Aeronautics and Applied Mechanics. Research interests include the reliability and security of systems, risk and reliability analysis, flight safety, avionics (Share 75%).

Asst. Prof. Marek Matyjewski, PhD. Eng. graduated from the Faculty of Power and Aeronautical Engineering of Warsaw in 1988. He was awarded PhD degree in 1996 and post-doctoral degree in 2010. He currently works as Professor at the Institute of Aeronautics and Applied Mechanics. He is the head of the Division of Fundamentals of Machine Design. Research interests include biomechanics, vehicle passive safety and human reliability (Share 25%).

ANALIZA RYZYKA W PRZYPADKU POŻARU SAMOLOTU PZL BRYZA Z WYKORZYSTANIEM METODY DRZEWA ZDARZEŃ

1. Wstęp

Analiza bezpieczeństwa jest obecnie jedną z priorytetów nauki na świecie. Inżynierowie posługują się wieloma metodami i narzędziami do oceny ryzyka i niezawodności. Rozwój nauki o bezpieczeństwie objawia się umiejętnością lepszej identyfikacji możliwych zagrożeń, uwzględnianiem zagadnień związanych z bezpieczeństwem na etapie projektowania urządzeń technicznych oraz postępowaniem w zakresie przeciwdziałania zagrożeniom poprzez rozwijanie istniejących oraz proponowanie nowych metod analizy ryzyka i niezawodności [6].

Istotną gałęzią omawianej nauki jest bezpieczeństwo lotów, a w szczególności zarządzanie ryzykiem w lotnictwie. Wprowadzenie check-list, instrukcji postępowania w sytuacjach złożonych i awaryjnych, przeprowadzanie audytów, szczegółowych kontroli ma na celu przede wszystkim zapobieganie zagrożeniom, a w razie ich wystąpienia uniknięcie lub minimalizację negatywnych skutków [4].

Niniejsza analiza dotyczyć będzie analizy ryzyka w sytuacjach awaryjnych, złożonych. Takim przypadkom towarzyszy często napływ błędnej lub niepełnej informacji oraz stres z powodu deficytu czasu podczas przeciwdziałania zagrożeniu. Dowodzi się [1], że niewielki deficyt czasu ma mobilizujący wpływ na działanie człowieka, zmniejszając prawdopodobieństwo popełnienia błędu. Natomiast, gdy dysponowany czas jest dwukrotnie krótszy od czasu niezbędnego można zaobserwować skokową demobilizację operatora, co skutkuje pogorszeniem wszystkich parametrów bezbłędного działania. Kładzie się więc bardzo duży nacisk na znajomość procedur w razie takich sytuacji, np. poprzez organizację szkoleń i testów.

W tej publikacji zbudowano schemat możliwych scenariuszy w przypadku wystąpienia pożaru na pokładzie samolotu. Uwzględniono sytuacje, gdy załoga nie wykonała czynności prawidłowo z powodu stresu, nieumiejętności współpracy, nieodpowiedniego wyszkolenia lub po prostu nie zdążyła ich wykonać z powodu bardzo szybkiego rozprzestrzeniania się ognia na pokładzie statku powietrznego.

2. Metody analizy ryzyka

Ze względu na stopień dokładności analiz wyróżnia się metody ilościowe i jakościowe. Te pierwsze to głównie metody probabilistyczne i statystyczne. Duże znaczenie mają również oszacowania eksperckie. W tych metodach istotną rolę pełni opracowanie odpowiedniego modelu oraz przygotowanie odpowiednich danych na podstawie badań, statystyk i wiedzy eksperckiej [6].

Metody jakościowe to przede wszystkim metody matrycowe i wskaźnikowe. Są one mniej złożone oraz łatwiejsze w zastosowaniu od metod ilościowych. Stosowane są powszechnie w analizach ryzyka zawodowego.

Metody te nie nadają się jednak do oceny ryzyka całkowitego, a jedynie do porównywania ryzyk cząstkowych. Poziom zagrożenia opisywany jest przeważnie za pomocą najbardziej prawdopodobnej kategorii strat. Metody matrycowe polegają na stworzeniu specjalnej matrycy z wyróżnionymi klasami zagrożeń i zawodności, a następnie klasyfikacji analizowanych zdarzeń. Metody wskaźnikowe (wieloczynnikowe) takie jak Risk Score, Five Steps, Job Safety Analysis, graf ryzyka, wskaźnik ryzyka polegają się na szacowaniu ryzyka jako iloczynu kilku czynników [3, 6].

Kolejnym narzędziem są metody drzew, które ze względu na dokładność i szczegółowość mogą służyć zarówno do opisów jakościowych jak i ilościowych. Są to drzewa niesprawności i drzewa zdarzeń.

Modelowanie ryzyka składa się z dwóch głównych etapów wynikających z jego definicji: szacowania zawodności (prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego) oraz modelowania zagrożeń i strat. Metoda drzew niesprawności przedstawia kombinację zdarzeń prowadzących do wystąpienia rozpatrywanego zdarzenia niepożądanego. Natomiast wykorzystywana w tej pracy metoda drzew zdarzeń umożliwia szczegółowy opis zagrożenia po wystąpieniu pierwotnego zdarzenia niepożądanego (inicjującego) poprzez szacowanie prawdopodobieństw kolejnych zdarzeń wtórnych, będących bezpośrednim źródłem zagrożeń. Technika drzewa zdarzeń jest więc schematem przedstawiającym chronologicznie ciąg wydarzeń, ważnych ze względu na funkcjonowanie obiektu, występujących po zdarzeniu inicjującym ciąg. Przedstawienie związku logicznego pomiędzy pierwotnym zdarzeniem inicjującym a kolejnymi zdarzeniami, będącymi wyliczeniem możliwych następstw zdarzeń poprzednich, pozwala ustalić wszystkie możliwe ścieżki prowadzące do wypadku (poniesienia określonych strat) [6, 7].

W niniejszej analizie ryzyka oprócz techniki drzew zdarzeń wykorzystano także elementy metod probabilistycznych, statystycznych i oszacowania eksperckie.

3. Model analizowanego zdarzenia

Analiza ryzyka na potrzeby omawianego zdarzenia (wybuchu pożaru na pokładzie samolotu Bryza) składała się z następujących elementów:

- sformułowania symboli, zależności oraz modelu strat;
- stworzenia drzewa zdarzeń na podstawie instrukcji użytkowania w locie [5] i oszacowania metodą ekspercką prawdopodobieństw wystąpienia kolejnych zdarzeń wtórnych;
- zdefiniowania sposobu obliczeń poszczególnych wielkości:
 - prawdopodobieństw wystąpienia zdarzeń końcowych,
 - zagrożeń dla poszczególnych zdarzeń końcowych,
 - prawdopodobieństwa pierwotnego zdarzenia inicjującego,
 - ryzyka poniesienia strat.

Zastosowane oznaczenia są następujące:

- c_i - straty co najmniej kategorii i (i przyjmuje wartości od 1 do 5);
- q^k - prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia końcowego k po wystąpieniu pożaru;

- p_x^k - prawdopodobieństwo poniesienia strat kategorii x , kiedy zdarzenie końcowe k już wystąpiło;
- $z^k(c_i) = \sum_{x=i}^5 p_x^k$ - prawdopodobieństwo poniesienia strat (zagrożenie) co najmniej kategorii i , kiedy zdarzenie końcowe k już wystąpiło; (1)
- $Z^k(c_i) = z^k(c_i) \cdot q_k$ - prawdopodobieństwo poniesienia strat (zagrożenie) co najmniej kategorii i w wyniku zdarzenia końcowego k ; (2)
- $Z(c_i) = \sum_{k=1}^n Z^k(c_i)$ - prawdopodobieństwo poniesienia strat (zagrożenie) co najmniej kategorii i po wystąpieniu pożaru (w wyniku wszystkich n zdarzeń końcowych); (3)
- $Q(1)$ - prawdopodobieństwo wystąpienia pierwotnego zdarzenia inicjującego, tj. pożaru w trakcie **jednego** przelotu;
- $\Lambda^k(c_i, 1) = Q(1) \cdot Z^k(c_i)$ - ryzyko cząstkowe poniesienia strat co najmniej kategorii i w wyniku zdarzenia końcowego k ; (4)
- $\Lambda(c_i, 1) = \sum_{k=1}^n \Lambda^k(c_i, 1) = Q(1) \cdot Z(c_i)$ - ryzyko całkowite poniesienia strat co najmniej kategorii i w wyniku pożaru w trakcie przelotu. (5)

Drzewo zdarzeń utworzone na podstawie instrukcji użytkownika w locie [5] przedstawia Rys. 1. Zdarzenia końcowe ponumerowano liczbami z zakresu 1-18 i oznaczono kolorami: jasnozielonym (w przypadku, gdy zdarzenie kończy się zazwyczaj pozytywnie) lub jasnoczerwonym (negatywnie). Zdarzenie inicjujące zostało zaznaczone kolorem żółtym, natomiast zdarzenia pośrednie kolorem szarym. Obok poszczególnych zdarzeń zapisano szacowane, orientacyjne prawdopodobieństwo jego wystąpienia, po tym jak wystąpiło zdarzenie poprzednie, określone metodą ekspercką.

Należy podkreślić, że zbudowany schemat nie jest „typowym” drzewem zdarzeń, ponieważ nie wszystkie zdarzenia są konsekwencją zdarzeń poprzednich, czasem dokonano tylko podziału na różne sytuacje/scenariusze (np. samolot jest/nie jest w ruchu) oraz nie oznaczono precyzyjnie i nie ponumerowano kolejnych sekwencji.

Zakładając, że na pokładzie samolotu przebywa 20 pasażerów dla końcowych zdarzeń niepożądanych zdefiniowano następujące **kategorie strat**:

- c_1 – nikt nie ucierpiał (dopuszczalne lekkie obrażenia części pasażerów);
- c_2 – część pasażerów poniosła obrażenia (od średnich do ciężkich), jednak nikt nie zginął;
- c_3 – część pasażerów (1-10 osób) zginęła w wyniku wypadku;
- c_4 – większość pasażerów (11-19 osób) zginęło w wyniku wypadku;
- c_5 – wszyscy pasażerowie zginęli w wyniku wypadku.

4. Wyznaczenie ryzyka poniesienia strat w wyniku pożaru

Prawdopodobieństwami zajścia kolejnych zdarzeń końcowych będą iloczyny prawdopodobieństw wszystkich zdarzeń na „ścieżce” oznaczonych na Rys. 1:

np. $q^1 = 0,1 * 0,5 * (0,9 * 0,8 * 0,8 + 0,9 * 0,8) = 0,0648$

Wszystkie obliczone prawdopodobieństwa q są zawarte w Tabeli 2.

Metodą ekspercką wyznaczono **prawdopodobieństwa poniesienia strat określonych kategorii** oraz **zagrożenia poniesienia strat co najmniej danej kategorii dla wszystkich zdarzeń końcowych (po ich wystąpieniu)** – zgodnie ze wzorem (1). Wyniki przedstawiono w Tabeli 1.

Rys. 1. Drzewo zdarzeń dla wystąpienia pożaru na pokładzie samolotu

Tabela 1. Prawdopodobieństwa strat i miara zagrożenia dla zdarzeń końcowych

straty	p_x^k	$z^k(c_i)$	straty	p_x^k	$z^k(c_i)$	straty	p_x^k	$z^k(c_i)$
zdarzenie końcowe 1			zdarzenie końcowe 7			zdarzenie końcowe 13		
c_1	0,8	1	c_1	0	1	c_1	0,4	1
c_2	0,2	0,2	c_2	0	1	c_2	0,6	0,6
c_3	0	0	c_3	0	1	c_3	0	0
c_4	0	0	c_4	0	1	c_4	0	0
c_5	0	0	c_5	1	1	c_5	0	0
zdarzenie końcowe 2			zdarzenie końcowe 8			zdarzenie końcowe 14		
c_1	0,05	1	c_1	0,7	1	c_1	0	1
c_2	0,1	0,95	c_2	0,3	0,3	c_2	0	1
c_3	0,25	0,85	c_3	0	0	c_3	0,15	1
c_4	0,3	0,6	c_4	0	0	c_4	0,2	0,85
c_5	0,3	0,3	c_5	0	0	c_5	0,65	0,65
zdarzenie końcowe 3			zdarzenie końcowe 9			zdarzenie końcowe 15		
c_1	0	1	c_1	0	1	c_1	0	1
c_2	0,15	1	c_2	0	1	c_2	0	1
c_3	0,1	0,85	c_3	0,25	1	c_3	0	1
c_4	0,25	0,75	c_4	0,25	0,75	c_4	0	1
c_5	0,5	0,5	c_5	0,5	0,5	c_5	1	1
zdarzenie końcowe 4			zdarzenie końcowe 10			zdarzenie końcowe 16		
c_1	0,05	1	c_1	0	1	c_1	0	1
c_2	0,05	0,95	c_2	0	1	c_2	0	1
c_3	0,1	0,9	c_3	0	1	c_3	0	1
c_4	0,4	0,8	c_4	0	1	c_4	0	1
c_5	0,4	0,4	c_5	1	1	c_5	1	1
zdarzenie końcowe 5			zdarzenie końcowe 11			zdarzenie końcowe 17		
c_1	0,4	1	c_1	0	1	c_1	1	1
c_2	0,6	0,6	c_2	0,1	1	c_2	0	0
c_3	0	0	c_3	0,1	0,9	c_3	0	0
c_4	0	0	c_4	0,2	0,8	c_4	0	0
c_5	0	0	c_5	0,6	0,6	c_5	0	0
zdarzenie końcowe 6			zdarzenie końcowe 12			zdarzenie końcowe 18		
c_1	0	1	c_1	1	1	c_1	0	1
c_2	0	1	c_2	0	0	c_2	0	1
c_3	0,15	1	c_3	0	0	c_3	0	1
c_4	0,2	0,85	c_4	0	0	c_4	0	1
c_5	0,65	0,5	c_5	0	0	c_5	1	1

Następnie opracowano tabelę (Tabela 2) z zagrożeniami poniesienia strat co najmniej określonej kategorii w wyniku danych zdarzeń końcowych – zgodnie ze wzorem (2). W odniesieniu do poprzednich obliczeń (Tabela 1) będą to obliczone wartości przemnożone przez prawdopodobieństwo q wystąpienia danego zdarzenia.

Do dalszych obliczeń wymagane jest obliczenie miar zagrożeń poniesienia strat nie mniejszych niż określona kategoria w wyniku wystąpienia wszystkich zdarzeń końcowych – tj. po wystąpieniu pożaru na pokładzie samolotu. Należy więc zsumować wyliczone w Tabeli 2 zagrożenia dla poszczególnych zdarzeń zgodnie ze wzorem (3). Wyniki zamieszczono w Tabeli 3.

Tabela 2. Zagrożenia w wyniku zdarzeń końcowych

straty	$z^k(c_i)$	$Z^k(c_i)$	straty	$z^k(c_i)$	$Z^k(c_i)$	straty	$z^k(c_i)$	$Z^k(c_i)$
ZK1	$q^1 =$	0,0648	ZK7	$q^7 =$	0,00616	ZK13	$q^{13} =$	0,01385
c_1	1	0,0648	c_1	1	0,00616	c_1	1	0,01385
c_2	0,2	0,01296	c_2	1	0,00616	c_2	0,6	0,00831
c_3	0	0	c_3	1	0,00616	c_3	0	0
c_4	0	0	c_4	1	0,00616	c_4	0	0
c_5	0	0	c_5	1	0,00616	c_5	0	0
ZK2	$q^2 =$	0,0162	ZK8	$q^8 =$	0,26483	ZK14	$q^{14} =$	0,00923
c_1	1	0,0162	c_1	1	0,26483	c_1	1	0,00923
c_2	0,95	0,01539	c_2	0,3	0,079449	c_2	1	0,00923
c_3	0,85	0,01377	c_3	0	0	c_3	1	0,00923
c_4	0,6	0,00972	c_4	0	0	c_4	0,85	0,0078455
c_5	0,3	0,00486	c_5	0	0	c_5	0,65	0,0059995
ZK3	$q^3 =$	0,005	ZK9	$q^9 =$	0,02943	ZK15	$q^{15} =$	0,02565
c_1	1	0,005	c_1	1	0,02943	c_1	1	0,02565
c_2	1	0,005	c_2	1	0,02943	c_2	1	0,02565
c_3	0,85	0,00425	c_3	1	0,02943	c_3	1	0,02565
c_4	0,75	0,00375	c_4	0,75	0,0220725	c_4	1	0,02565
c_5	0,5	0,0025	c_5	0,5	0,014715	c_5	1	0,02565
ZK4	$q^4 =$	0,014	ZK10	$q^{10} =$	0,0342	ZK16	$q^{16} =$	0,027
c_1	1	0,014	c_1	1	0,0342	c_1	1	0,027
c_2	0,95	0,0133	c_2	1	0,0342	c_2	1	0,027
c_3	0,9	0,0126	c_3	1	0,0342	c_3	1	0,027
c_4	0,8	0,0112	c_4	1	0,0342	c_4	1	0,027
c_5	0,4	0,0056	c_5	1	0,0342	c_5	1	0,027
ZK5	$q^5 =$	0,00406	ZK11	$q^{11} =$	0,018	ZK17	$q^{17} =$	0,25137
c_1	1	0,00406	c_1	1	0,018	c_1	1	0,25137
c_2	0,6	0,002436	c_2	1	0,018	c_2	0	0
c_3	0	0	c_3	0,9	0,0162	c_3	0	0
c_4	0	0	c_4	0,8	0,0144	c_4	0	0
c_5	0	0	c_5	0,6	0,0108	c_5	0	0
ZK6	$q^6 =$	0,00332	ZK12	$q^{12} =$	0,20777	ZK18	$q^{18} =$	0,00513
c_1	1	0,00332	c_1	1	0,20777	c_1	1	0,00513
c_2	1	0,00332	c_2	0	0	c_2	1	0,00513
c_3	1	0,00332	c_3	0	0	c_3	1	0,00513
c_4	0,85	0,002822	c_4	0	0	c_4	1	0,00513
c_5	0,65	0,002158	c_5	0	0	c_5	1	0,00513

Tabela 3. Zagrożenia po wystąpieniu pożaru

straty	$Z(c_i)$
c_1	1
c_2	0,294965
c_3	0,18694
c_4	0,16995
c_5	0,1447725

Etapy ustalonej procedury wyznaczania **prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego w czasie jednego przelotu $Q(1)$** są następujące:

- 1) Oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku śmiertelnego wskutek pożaru podczas jednego przelotu, a więc ryzyka poniesienia strat kategorii co najmniej c_3 (wypadki śmiertelne) – na podstawie wykresu (Rys. 2) i diagramu (Rys. 3) ze statystyk EASA [2];
- 2) Wyznaczenie zagrożenia poniesienia strat co najmniej kategorii c_3 ;
- 3) Wyznaczenie prawdopodobieństwa wybuchu pożaru na pokładzie samolotu, przekształcając zależność (5).

Ad 1).

*Rys. 2. Liczba wypadków z ofiarami śmiertelnymi na 10 mln lotów
 (Globalny wskaźnik wypadków) [2]*

Na podstawie wykresu (Rys. 2.) można ocenić że ryzyko poniesienia strat co najmniej kategorii c_3 (wypadki z ofiarami śmiertelnymi) w trakcie jednego przelotu wynosi $\frac{5}{10 \text{ mln}} \left[\frac{1}{\text{lot}} \right] = 5 \cdot 10^{-7} \left[\frac{1}{\text{lot}} \right]$.

Rys. 3. Liczba wypadków z podziałem na przyczyny ich wystąpienia w latach 2002-2011 (lotnictwo ogólne, samoloty o masie powyżej 2250 kg) [2]

Kategorią związaną z wybuchem pożaru na pokładzie jest F-NI (Rys. 3). W tej kategorii nie zanotowano wypadków śmiertelnych, co nie oznacza, że są one niemożliwe, a jedynie, że są mało prawdopodobne. W celu oszacowania prawdopodobieństwa wybuchu pożaru potrzebne jest prawdopodobieństwo wypadku śmiertelnego na skutek pożaru. Można przyjąć więc założenie, że odsetek wypadków śmiertelnych spowodowanych przez pożar będzie taki sam jak stosunek wypadków spowodowanych przez ogień/dym w odniesieniu do liczby wypadków w ogóle (bez rozróżniania na wypadki z ofiarami śmiertelnymi i bez). W związku z tym można przyjąć że $5/224$ (224 to suma wszystkich wypadków), czyli 2,23% wszystkich wypadków (również śmiertelnych) było spowodowane przez pożar. Ostatecznie:

$$\Lambda(c_3, 1) = \frac{0,0223 \cdot 5}{10\,000\,000} = 1,115 \cdot 10^{-8} \left[\frac{1}{\text{lot}} \right]$$

Ad 2. Zagrożenie poniesienia strat co najmniej kategorii c_3 wyznaczono uprzednio w Tabeli 3:

$$Z(c_3) = 0,18694$$

Ad 3. Przekształcając zależność (5) wiadomo, że:

$$Q(1) = \frac{\Lambda(c_3, 1)}{Z(c_3)} = \frac{1,115 \cdot 10^{-8}}{0,18694} = 6,1517 \cdot 10^{-8} \left[\frac{1}{\text{lot}} \right]$$

Zgodnie ze wzorem (5) można już wyznaczyć **ryzyko poniesienia strat** co najmniej danej kategorii w wyniku wybuchu pożaru na pokładzie samolotu. Wyniki przedstawiono w Tabeli 4.

Tabela 4. Ryzyko poniesienia określonych strat w wyniku pożaru

Q(1)=	6,1517E-008	
straty	$Z(c_i)$	$\square(c_i, 1)$
c_1	1	6,1517E-008
c_2	0,294965	1,8145E-008
c_3	0,18694	1,1500E-008
c_4	0,16995	1,0455E-008
c_5	0,1447725	8,9060E-009

W celu sprawdzenia, jakie zdarzenia końcowe miały największy wpływ na ryzyko dokonano analizy z podziałem na poszczególne zdarzenia końcowe, zgodnie ze wzorem (4). Wyniki przedstawiano w Tabeli 5 i na Rys. 4.

Analizując otrzymane wyniki (Tabela 4, Tabela 5, Rys. 4), należy podkreślić, że ryzyko poniesienia strat nie mniejszych niż c_1 jest de facto prawdopodobieństwem wystąpienia pożaru w ogóle. Wynosi ono $6,15 \cdot 10^{-8}$, czyli przeciętnie w 1 na ponad 600 milionów lotów (operacji lotniczych) wybucha pożar na pokładzie samolotu. Ponadto można zauważyć, że większość tych przypadków (ok. 70%) nie kończy się większymi obrażeniami ani śmiercią pasażerów. 18,7 % wszystkich przypadków kończy się śmiercią 1 lub większej liczby osób, natomiast ok. 14,5% wszystkich pasażerów.

Tabela 5. Ryzyka związane z poszczególnymi zdarzeniami końcowymi

straty	$Z^*(c_i)$	$\square^k(c_i)$	straty	$Z^*(c_i)$	$\square^k(c_i)$	straty	$Z^*(c_i)$	$\square^k(c_i)$
ZK1			ZK7			ZK13		
c_1	0,0648	3,986E-009	c_1	0,00616	3,789E-010	c_1	0,01385	8,5201E-010
c_2	0,01296	7,973E-010	c_2	0,00616	3,789E-010	c_2	0,00831	5,1121E-010
c_3	0	0	c_3	0,00616	3,789E-010	c_3	0	0
c_4	0	0	c_4	0,00616	3,789E-010	c_4	0	0
c_5	0	0	c_5	0,00616	3,789E-010	c_5	0	0
ZK2			ZK8			ZK14		
c_1	0,0162	9,966E-010	c_1	0,26483	1,629E-008	c_1	0,00923	5,6780E-010
c_2	0,01539	9,467E-010	c_2	0,079449	4,887E-009	c_2	0,00923	5,6780E-010
c_3	0,01377	8,471E-010	c_3	0	0	c_3	0,00923	5,6780E-010
c_4	0,00972	5,979E-010	c_4	0	0	c_4	0,0078455	4,8263E-010
c_5	0,00486	2,990E-010	c_5	0	0	c_5	0,0059995	3,6907E-010
ZK3			ZK9			ZK15		
c_1	0,005	3,076E-010	c_1	0,02943	1,810E-009	c_1	0,02565	1,5779E-009
c_2	0,005	3,076E-010	c_2	0,02943	1,810E-009	c_2	0,02565	1,5779E-009
c_3	0,00425	2,614E-010	c_3	0,02943	1,810E-009	c_3	0,02565	1,5779E-009
c_4	0,00375	2,307E-010	c_4	0,0220725	1,358E-009	c_4	0,02565	1,5779E-009
c_5	0,0025	1,538E-010	c_5	0,014715	9,052E-010	c_5	0,02565	1,5779E-009
ZK4			ZK10			ZK16		
c_1	0,014	8,612E-010	c_1	0,0342	2,104E-009	c_1	0,027	1,6610E-009
c_2	0,0133	8,182E-010	c_2	0,0342	2,104E-009	c_2	0,027	1,6610E-009
c_3	0,0126	7,751E-010	c_3	0,0342	2,104E-009	c_3	0,027	1,6610E-009
c_4	0,0112	6,890E-010	c_4	0,0342	2,104E-009	c_4	0,027	1,6610E-009
c_5	0,0056	3,445E-010	c_5	0,0342	2,104E-009	c_5	0,027	1,6610E-009
ZK5			ZK11			ZK17		
c_1	0,00406	2,498E-010	c_1	0,018	1,107E-009	c_1	0,25137	1,5464E-008
c_2	0,002436	1,499E-010	c_2	0,018	1,107E-009	c_2	0	0
c_3	0	0	c_3	0,0162	9,966E-010	c_3	0	0
c_4	0	0	c_4	0,0144	8,858E-010	c_4	0	0
c_5	0	0	c_5	0,0108	6,644E-010	c_5	0	0
ZK6			ZK12			ZK18		
c_1	0,00332	2,042E-010	c_1	0,20777	1,278E-008	c_1	0,00513	3,1558E-010
c_2	0,00332	2,042E-010	c_2	0	0	c_2	0,00513	3,1558E-010
c_3	0,00332	2,042E-010	c_3	0	0	c_3	0,00513	3,1558E-010
c_4	0,002822	1,736E-010	c_4	0	0	c_4	0,00513	3,1558E-010
c_5	0,002158	1,328E-010	c_5	0	0	c_5	0,00513	3,1558E-010
Q(1)=							6,1517E-008

Rys. 4. Ryzyka związane z poszczególnymi zdarzeniami końcowymi

Analizując rozkład ryzyka z podziałem na poszczególne zdarzenia końcowe (Rys. 4, Tabela 5) można zauważyć, że dla kategorii:

- **co najmniej c_1** największy wpływ mają zdarzenia: 8 (lądowanie z jednym silnikiem po wystąpieniu pożaru gondoli), 17 (wyłączenie niesprawnej instalacji klimatyzacji i dalsza kontrola), 12 (zlikwidowanie pożaru/dymu wydobywającego się z instalacji elektrycznej i dalsza kontrola urządzeń). Wymienione zdarzenia są sytuacjami najbardziej prawdopodobnymi w związku z wystąpieniem pożaru na pokładzie samolotu;
- **co najmniej c_2** największy wpływ mają zdarzenia: 8, 10 (załoga nie zdążyła wykonać procedury wyłączenia i gaszenia niesprawnego silnika), 9 (katastrofa lub wypadek podczas lądowania z jednym silnikiem po wystąpieniu pożaru gondoli silnika);
- **co najmniej c_3** największy wpływ mają zdarzenia: 10, 9, 16 (Katastrofa na skutek opóźnień w identyfikacji przyczyny wybuchu pożaru w kabinie samolotu);
- **co najmniej c_4 oraz co najmniej c_5** największy wpływ mają zdarzenia: 10, 16, 15 (Załoga nie zdążyła wykonać czynności związanych z wyłączeniem niesprawnych urządzeń, likwidacją zarzewia ognia instalacji elektrycznej lub wykonała je niepoprawnie).

5. Podsumowanie

Wykonane obliczenia pozwalają wnioskować, że prawdopodobieństwo wybuchu pożaru podczas lotu jest znikome. Jednak w przypadku jego wystąpienia, prawdopodobieństwo poniesienia śmierci przez jednego lub więcej pasażerów jest już stosunkowo duże – wynosi ok. 19%.

Zastosowanie probabilistycznej metody oceny ryzyka w połączeniu z metodą drzewa zdarzeń pozwala ograniczyć błędy wynikające z szacowań eksperckich. Dużo prościej jest oszacować prawdopodobieństwa wystąpienia kolejnych zdarzeń wtórnych po wystąpieniu poprzednich oraz poniesienia danych strat niż od razu szacować „rozkład strat” w wyniku pożaru na pokładzie samolotu. Ponadto wiemy również, jakie układy samolotu oraz sytuacje mają wpływ na powstanie pożaru. Metoda drzew może być szeroko wykorzystana do oceny ryzyka nie tylko w lotnictwie, ale także innych dziedzinach techniki.

6. Literatura

- [1] Bagiński A, Żurek J: *Problems of safety in aviation. Problemy bezpieczeństwa w lotnictwie*, Journal of KONBiN, Nr 3(6)/2008, 5-24.
- [2] EASA: *Roczny przegląd bezpieczeństwa za rok 2011*.
- [3] Ficoń K.: *Zastosowanie rozmytych sterowników Mamdaniego do określania ryzyka wieloczynnikowego*, Zeszyty Naukowe AMW, Nr 3(194)/2013, 65-88.
- [4] Klich E.: *Bezpieczeństwo lotów*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2011.
- [5] PZL: *Instrukcja użytkowania w locie samolotu „Bryza 1”*, Mielec 2001.
- [6] Szopa T.: *Niezawodność i bezpieczeństwo*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2009.
- [7] You X., Tonon F.: *Event-Tree Analysis with Imprecise Probabilities*, Risk Analysis, Vol. 32(2)/2012, 330-344.

Mgr inż. Mateusz Papis w roku 2015 ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Obecnie pracuje jako asystent w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej. Zainteresowania naukowe to niezawodność i bezpieczeństwo systemów, analiza ryzyka i niezawodności, bezpieczeństwo lotów, systemy lotnicze (Udział 75%).

Dr hab. inż. Marek Matyjewski, profesor PW w roku 1988 ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Stopień doktora nauk technicznych otrzymał w 1996 r., a stopień doktora habilitowanego w 2010 r. Obecnie pracuje na stanowisku profesora w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej. Jest kierownikiem Zakładu Podstaw Konstrukcji. Zainteresowania naukowe to biomechanika, bezpieczeństwo bierne samochodów i niezawodność człowieka (Udział 25%).

Risk analysis in case of fire on PZL BRYZA using the event tree analysis
Analiza ryzyka w przypadku pożaru samolotu PZL BRYZA z wykorzystaniem...