

Mateusz PAPIS, Marek MATYJEWSKI  
Warsaw University of Technology (Politechnika Warszawska)

## THE USE OF FUZZY LOGIC ELEMENTS FOR THE RISK ANALYSIS IN AVIATION

### Wykorzystanie elementów logiki rozmytej do analizy ryzyka w lotnictwie

**Abstract:** *The paper presents the possibility of using fuzzy logic in aviation provided in an example of estimating the risk of a glider pilot. The results of expert questionnaires were used to define the input data concerning categories of loss and the probability of undesirable events occurrence. A model of inference and fuzzy sets concerning input and output data were defined. The risk analysis was performed in accordance with the standard fuzzy regulator scheme. Moreover, the results obtained were verified with the use of Risk Matrix and Risk Score methods.*

**Keywords:** fuzzy logic, risk analysis, risk in aviation

**Streszczenie:** *Tematem publikacji jest możliwość wykorzystania logiki rozmytej w lotnictwie przedstawiona na przykładzie szacowania ryzyka pilota szybowcowego. Do analizy wykorzystano wyniki ankiet eksperckich, które posłużyły do zdefiniowania danych wejściowych dotyczących kategorii strat oraz prawdopodobieństw wystąpienia zdarzeń niepożądanych. Zbudowano model wnioskowania i zdefiniowano zbiory rozmyte dotyczące danych wejściowych i wyjściowych. Właściwą analizę ryzyka wykonano zgodnie ze schematem standardowego regulatora rozmytego Ponadto zweryfikowano otrzymane wyniki za pomocą macierzy ilościowych oszacowań oraz metodą Risk Score.*

**Słowa kluczowe:** logika rozmyta, analiza ryzyka, ryzyko w lotnictwie

## 1. Introduction

Many methods and tools are currently used for safety analysis (risk and reliability assessment). Due to the degree of accuracy of studies, quantitative and qualitative methods can be distinguished. The first ones are mainly probabilistic and statistical methods. In these methods, it is essential to develop the appropriate model and prepare the relevant data based on research, statistics and expert knowledge [9]. Qualitative methods are primarily matrix methods and indicator methods (e.g. Risk Score). Another tool is Fault and Event Tree Analysis, which are also widely used in risk and reliability analyses (e.g. [7]).

One of the innovative approaches to risk analysis may be the use of fuzzy logic [3,10]. The definition of fuzzy sets is attributed to L.A. Zadeh, who initiated this area with the work of Fuzzy Sets from 1965. The author aimed to obtain a tool helpful in modelling complex phenomena, difficult for the unambiguous description, in particular, but not only, involving the participation of the so-called human factor. The set of inference rules and logical operators are used, and the whole process of calculating the model output values for specific input data is called the inference process [11].

## 2. Basic definitions and operations in fuzzy logic

Fuzzy logic can be used to formalize imprecise notions in the description of phenomena and features. The basic definitions are fuzzy set, membership function, linguistic value and linguistic variable [2, 4, 6, 8, 11]:

*Fuzzy set*  $A$  in a certain non-empty space  $X$ , which is written as  $A \subseteq X$ , is the set of pairs:

$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in X\} \quad (1)$$

where  $\mu_A$  is a membership function and is defined as:

$$\mu_A: X \rightarrow [0; 1] \quad (2)$$

*Membership function* for each  $x \in X$  assigns the degree of membership  $\mu_A(x)$  to the fuzzy set  $A$ , contained in the closed compartment  $[0; 1]$ .

Membership functions can take different shapes. There are polygonal functions: triangular, trapezoidal, rectangular and Gauss functions.

**Linguistic value** is a verbal expression of a certain quantity. The expression is specified by a fuzzy set, to which values of the variable (for which this expression can be used) belong in non-zero degree.

Examples of linguistic values can be the following expressions: small, medium and large.

**Linguistic variable** is a quantity that takes both numerical and linguistic values.

Examples of linguistic variables are: temperature, water level, distance to destination.

The definitions of the main operations are as follows [4, 6, 8, 11]:

**Sum** of two fuzzy sets  $A$  and  $B$  in space  $X$  is a fuzzy set, whose the membership function is determined by the following relation:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A, \mu_B) \text{ for every } x \in X \quad (3)$$

In the above definition the  $\max$  function can be replaced by any  $s$ -norm.

**Intersection** of two sets of fuzzy  $A$  and  $B$  in space  $X$  is a fuzzy set, whose membership function is determined by the following relation:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A, \mu_B) \text{ for each } x \in X \quad (4)$$

The  $\min$  function can be replaced by any  $t$ -norm.

S-norms and t-norms are any functions fulfilling the conditions of connectivity, alternation, monotonicity and appropriate boundary conditions. The most important S and T norms can be found, e.g. in [8].

### Fuzzy control system

The scheme of the classic fuzzy control system is shown in fig. 1.

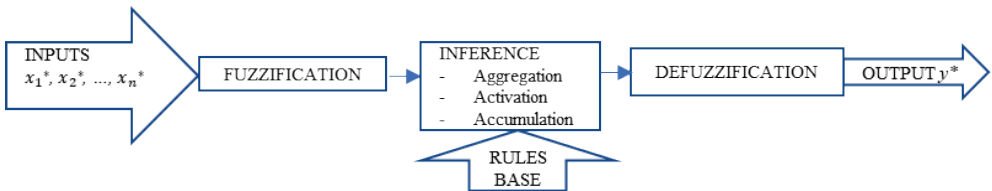


Fig. 1. Block diagram of the fuzzy control system

The functions of individual blocks in the fuzzy control system are as follows [2, 9]:

**Fuzzification** - determination of the degree of membership of particular inputs of the model (sharp values:  $x_1^*$ ,  $x_2^*$ , ...,  $x_n^*$ ) to the appropriate fuzzy sets.

**Rule base** is related to the creation of a linguistic model containing fuzzy rules defining the relationships between sets of inputs and outputs.

**Inference** - at this stage, the membership function of output is determined based on previously calculated input signals' membership function and the linguistic model. This process consists of three stages:

- **Aggregation** - calculation of the truthfulness degrees of the individual rules' premises. Premises forming a rule are usually composed of several simple premises connected by logical I and OR conjunctions.
- **Activation** - for each rule which premises are met, the membership function of the whole implication  $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$  should be defined. In this case, A is the aggregated input set and B is the output set. For the activation process, different operators carrying out the fuzzy implication process are used. One of the simplest is the Mamdani operator:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \text{MIN}(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (5)$$

- **Accumulation** - cumulation into one set  $\mu_{WY}(y)$  of results obtained in the previous step. The appropriate s-norms should be used for this purpose. MAX and bounded sum operators are the most commonly used.

If the activation process is made with the use of the Mamdani operator (MIN) and the accumulation with the MAX operator, the whole process is called MAX-MIN inference.

**Defuzzification** - this process consists in determining the sharp value of the output signal input  $y^*$  on the basis of the determined  $\mu_{WY}(y)$ . The following methods are used for this purpose [2, 12]: First of Maxima (FOM), Last of Maxima (LOM), Middle of Maxima (MOM), Centre of Gravity (COG), Height Method (HM).

### 3. Data for the risk analysis

A specific Human-Technology-Environment system is a structure: pilot, crew, air traffic controller - aircraft - environment. Safety of this system is determined by regulations, procedures and management methods. Reports of aviation committees and statistics on accidents and incidents also play an important role [5].

The carried out risk analysis concerned the glider pilot. The stage of H-T-E system identification, hazard identification, probability of events occurrence determination and estimation of losses was conducted based on data (results of expert questionnaires conducted among pilots flying on the SZD-50 "Puchacz")

glider in the Mielec Aeroclub) collected for quantitative risk analysis [1]. Table 1 presents a list of undesirable events, which were taken into account in the risk analysis using fuzzy logic.

**Table 1**

**List of undesirable events [1]**

Symbol	Event description
A(1)	Fall during moving around a hangar
A(2)	Contact with sharp edges during work in a workshop
A(3)	Wing impact during glider movement
A(4)	Overloading of the muscle-skeletal system due to the lift of the glider tail
A(5)	Failure of the flight control system
A(6)	Hit by a broken towing line during the transport of the glider
A(7)	Hitting an obstacle on the road during take-off or landing roll of a glider
A(8)	Breaking off the rope during the climbing (winch-assisted take-off)
A(9)	Lack of releasing (winch-assisted take-off)
A(10)	Overload of the body during the performance of glider acrobatics
A(11)	Head impact on the windshield due to touchdown
A(12)	Hard landing on the rough terrain

The first part of the questionnaires [1] was helpful in determining the particular events' probabilities of occurrence. Experts assigned a value from 1 to 12 for each event (12 for the most probable, 1 for the least probable). Then, the average position in the ranking for each event was determined. Moreover, using statistical data [1] for two events, the probability  $Q$  of the occurrence of particular events was estimated (fig. 2).

The questionnaires [1] also concerned the assessment of possible consequences (losses) for each of the events. Experts were asked to assign for each event how many cases out of the assumed number of 1000 will result in incurring a specific category of losses:  $c_0$  - no injuries;  $c_1$ - slight injuries;  $c_2$  - moderate injuries;  $c_3$  - severe injuries;  $c_4$  - fatal injuries.

On the basis of the questionnaires' results, the average (weighted) loss category  $LC$  was calculated. Moreover, material losses  $ML$  were also estimated using the expert method. The results are presented in fig. 3.

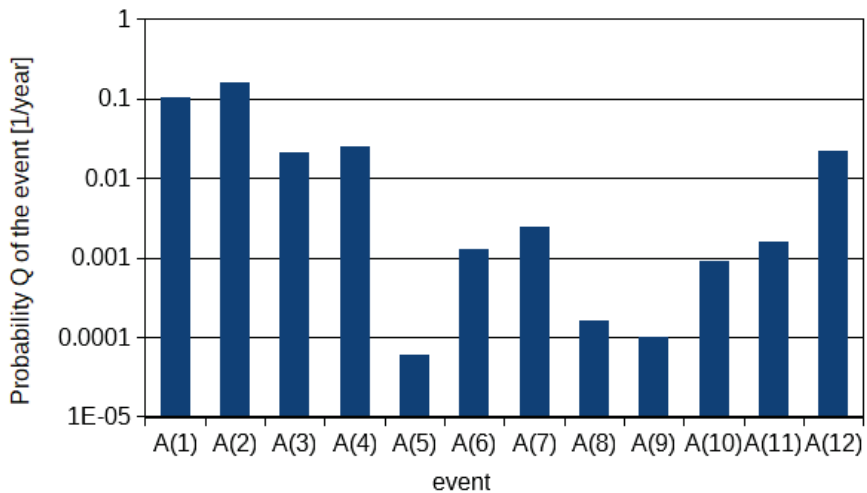


Fig. 2. Probability of the chosen events occurrence

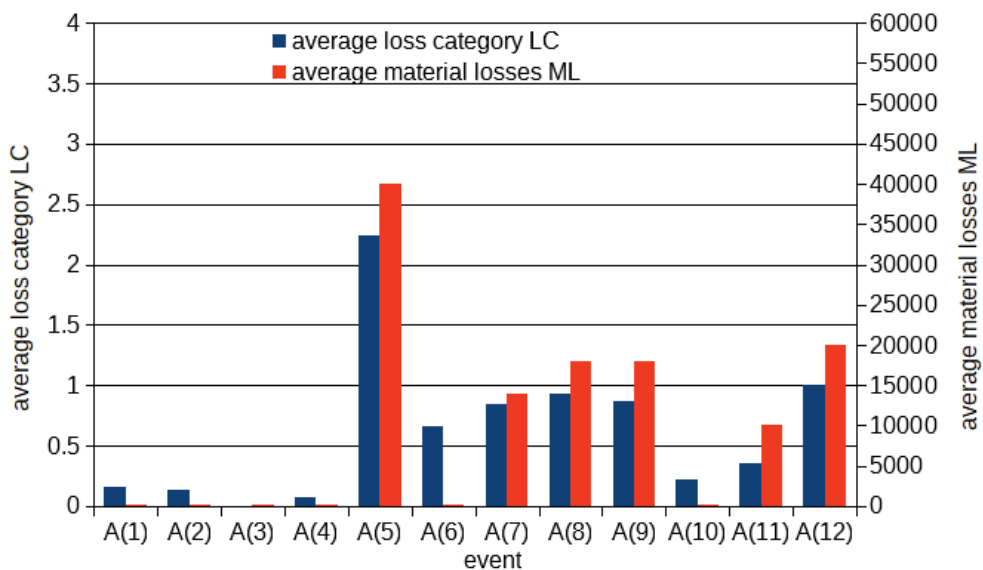


Fig. 3. Loss categories

## 4. Analysis using fuzzy logic

Fuzzy inference will take place in accordance with the proposed scheme shown in fig. 2. For the analyzed case and collected data, this scheme has the following form (fig. 4).

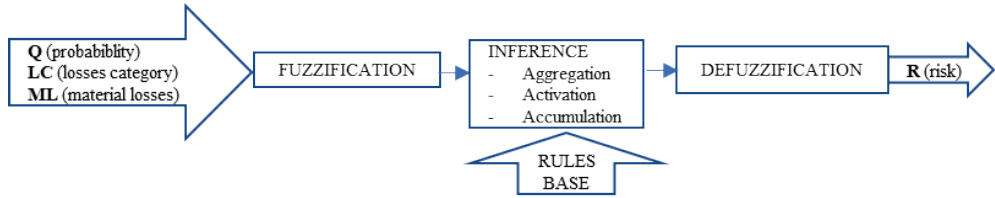


Fig. 4. Block diagram of the fuzzy control system for the conducted analyses

The following linguistic values and shapes of membership functions were used (fig. 5) for particular variables:

- $Q$  - *small, large, medium*; trapezoidal functions
- $KS$  and  $SM$  - *acceptable, unacceptable*; Gauss functions
- $R$  - *negligible, small, medium, large, critical*; triangular functions.

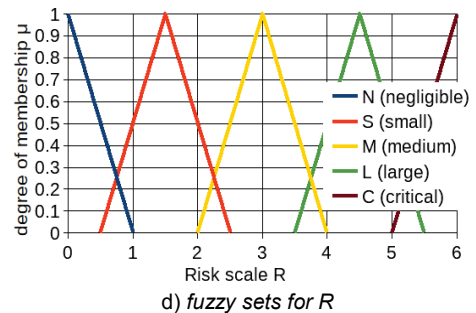
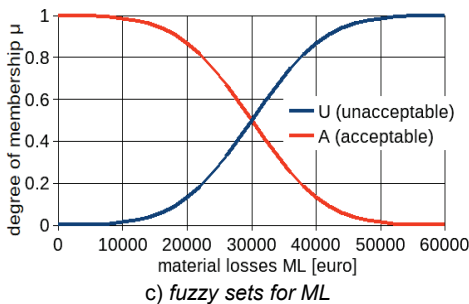
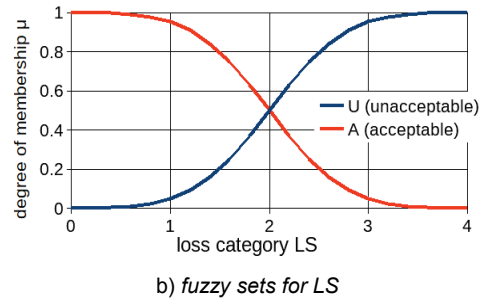
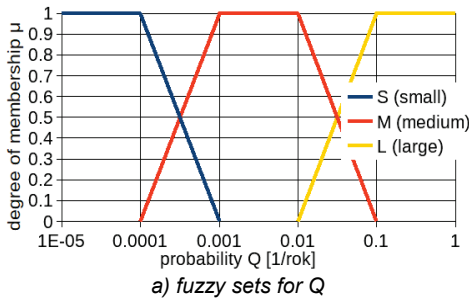


Fig. 5. Fuzzy sets used for input and output variables

In addition to input, output and fuzzy models, another important element for starting fuzzy inference calculations is the rules database. In the table (Tab. 2.), there are rules created for this risk analysis.

**Table 2**

**Rules database**

Rule		<i>Q</i>		<i>LC</i>		<i>ML</i>		<i>R</i>
1		S		A		A		N
2		S		A		U		N
3		S		U		A		S
4		S		U		U		M
5		M		A		A		S
6	<i>IF</i>	M	<i>AND</i>	A	<i>AND</i>	U	<i>THEN</i>	M
7		M		U		A		M
8		M		U		U		L
9		L		A		A		M
10		L		A		U		L
11		L		U		A		C
12		L		U		U		C
S – small, M – medium, L – large, A – acceptable, U –unacceptable, N – negligible; C - critical								

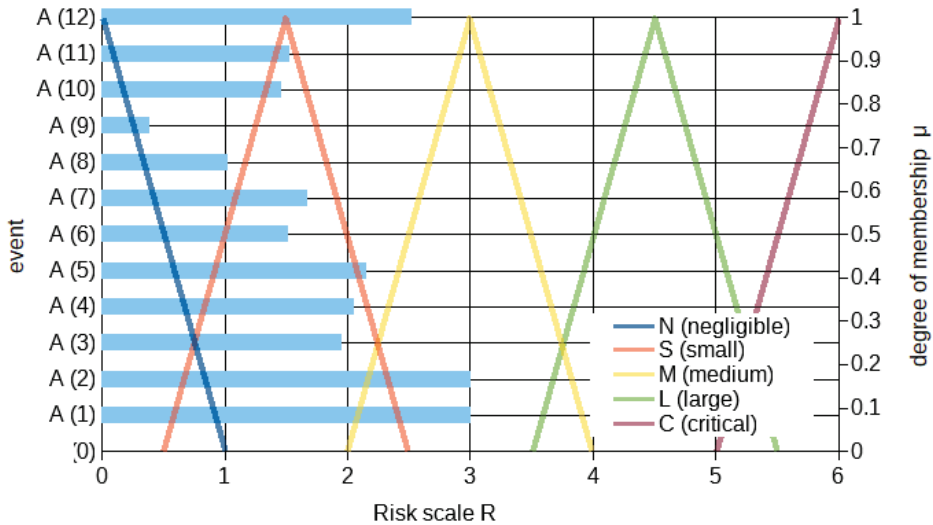
During the analysis for each event with the use of fuzzy logic, the MIN operator was used for the aggregation, the Mamdani operator (5) for the activation process and the MAX operator for the accumulation.

In order to compare the risk factors for all events, one R factor was defined, which is a weighted average of indicators calculated using the methods of *Middle of Maxima*, *Centre of Gravity* and *Height Method*:

$$R = 0,1 R_{MOM}^* + 0,45R_{MOM}^* + 0,45R_{HM}^* \tag{6}$$

Results are shown in fig. 6.





**Fig. 6.** Results of Risk factor R for all events

Considering the graph (fig. 6) it can be concluded that the highest risk index R appeared for the events 1, 2, 12 and 5. The undesirable events 1 (*Fall during moving around a hangar*) and 2 (*Contact with sharp edges during repair work in the workshop*) are the most frequent events. The probability of their occurrence during the year was estimated at about 12-15%. However, the average losses are small. The reason for the high-risk index for these events was, therefore, the high probability of their occurrence.

Another event with a high-risk index is event 12, i.e. *Hard landing on rough terrain*. It was a result of quite significant losses, although much smaller than in, e.g. event 5. The probability of occurrence for this event was also quite high, but smaller by orders of magnitude than in the case of events 1, 2.

The next one is the event 5, related to *control system failure*. Here, the situation is opposite to events 1 and 2. The probability of the event is very low (the smallest of all the discussed), while the average loss, both human and material, very high. It results in a relatively high-risk indicator.

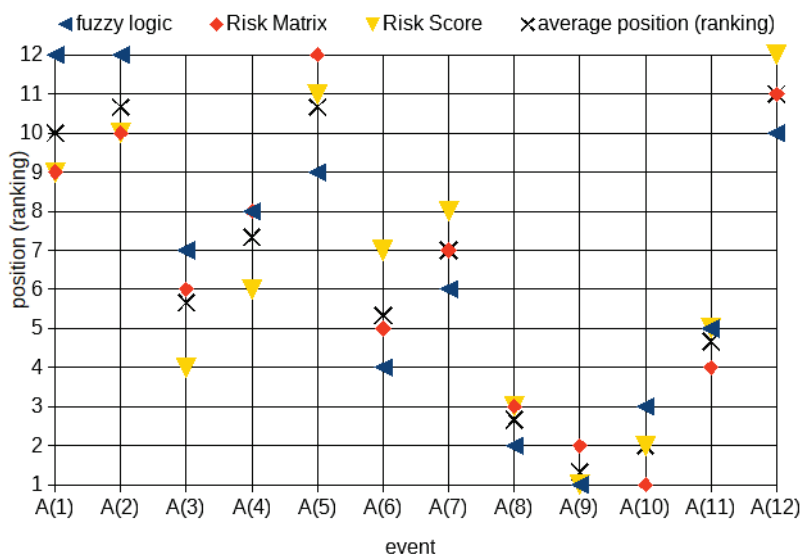
To sum up, the use of fuzzy logic to calculate the risk factors and compare these parameters for individual events seems to have produced excellent results. It should be noted that in many cases, where losses were minimal and comparable, the probability of their occurrence played a decisive role in the calculated coefficient. However, it should be emphasized that if an event was improbable, but

entailed substantial losses, the risk factor took it into account to a large extent. The examples are events 5 and 12.

## 5. Risk analysis using other methods

The last step of the study was to verify the results obtained using standard methods: Risk Matrix and Risk Score.

Fig. 7 presents a summary of the results (a ranking of events from 1- least to 12 - the most risky) obtained using all methods. It can be seen that the results are convergent - for no event there was a greater difference in order among all methods than 3 positions.



Rys. 7. Summary of the results

## 6. Summary

This work showed that the use of fuzzy logic for risk analysis in aviation is justified. The results obtained are in line with expectations. The highest risk factor has been assigned to the events that are most likely or cause the most considerable losses. The results did not identify events with substantial and critical risks as a

consequence of the fact that there were no situations which a highly probable event resulted in high human and material losses.

According to the analysis with the use of fuzzy logic, the most risky events are: *Fall during moving around a hangar, Contact with sharp edges during repair work in the workshop, Hard landing in the rough area and Control system failure.* Analyzing the same events with other methods, i.e. with the use of Risk Matrix and Risk Score, similar results were obtained. There were some differences, but they were not significant. They may result from the different influence of factors on the final result (rules base and membership functions in fuzzy logic, angle of inclination of lines in the Risk Matrix, assumed array quantities in the Risk Score method) and differences for each method in the loss interpretation. In addition, it should be noted that in the case of fuzzy sets, material losses were also taken into account and Risk Score expresses the probability of an event by multiplying the frequency of exposure and the probability of event occurrence per one action.

In spite of some differences observed, it is impossible to determine which method is the most effective. However, it is important that the use of fuzzy logic for risk analysis seems to be appropriate. The method brings a lot of possibilities, mainly very high flexibility - it is easy to freely choose the rules' base, membership functions or the number of inputs to the model. It should be developed and used in parallel with other methods for initial and even detailed risk analysis. In more advanced applications it is possible to use fuzzy logic or, more generally, artificial intelligence for risk management, crisis management systems or making decision support.

## **7. References**

1. Banaszewski K.: Ilościowa analiza ryzyka pilota szybowcowego. Warsaw University of Technology, 2010.
2. Bielecki S., Wasilewski J.: Wnioskowanie rozmyte i programowanie w języku Prolog. In: Parol M., Piotrowski P. (eds.), *Sztuczna inteligencja w praktyce*. Laboratorium. Oficyna Wydawnicza PW, 2008.
3. Ficoń K.: Zastosowanie rozmytych sterowników Mamdaniego do określania ryzyka wieloczynnikowego. *Zeszyty Naukowe AMW*, No. 3(194), 2013.
4. Kacprzyk J.: *Wieloetapowe sterowanie rozmyte*. WNT, 2001.
5. Klich E.: *Bezpieczeństwo lotów*. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2011.
6. Nowicki R. K.: *Rozmyte systemy decyzyjne w zadaniach z ograniczoną wiedzą*. AOW EXIT, Warszawa 2009.

7. Papis M., Matyjewski M.: Risk analysis in case of fire on PZL BRYZA using the event tree analysis. Journal of KONBiN, No. 2(38), 2016. DOI 10.1515/jok-2016-0026.
8. Rykaczewski K.: Systemy rozmyte i ich zastosowania. Toruń 2006, <http://fulmanski.pl/zajecia/ssn/materialy/duszek.pdf>, data dostępu: 29.11.2018.
9. Smolarkiewicz M.M.: Zastosowanie zmiennych lingwistycznych oraz logiki rozmytej w analizie ryzyka. Polski Przegląd Medycyny i Psychologii Lotniczej, No. 4 (17), 2011.
10. Szopa T., Niezawodność i bezpieczeństwo. Oficyna Wydawnicza PW, 2016.
11. Yagier R.R, Filev D.P: Podstawy modelowania i sterowania rozmytego, WNT, 1995.
12. Podstawy logiki rozmytej i operatorów rozmytych, <http://www.isep.pw.edu.pl/ZakladNapędu/Instrukcje/Logika%20rozmyta%20-%20podstawy.pdf>, data dostępu: 26.03.2015.

# WYKORZYSTANIE ELEMENTÓW LOGIKI ROZMYTEJ DO ANALIZY RYZYKA W LOTNICTWIE

## 1. Wprowadzenie

Do analizy bezpieczeństwa (oceny ryzyka i niezawodności) wykorzystuje się obecnie wiele metod i narzędzi. Ze względu na stopień dokładności analiz można wyróżnić metody ilościowe i jakościowe. Te pierwsze to przede wszystkim metody probabilistyczne i statystyczne. Istotną rolę odgrywa w nich opracowanie odpowiedniego modelu oraz przygotowanie odpowiednich danych na podstawie badań, statystyk i wiedzy eksperckiej [9]. Metody jakościowe to przede wszystkim metody matrycowe i metody wskaźnikowe (np. *Risk Score*). Kolejnym narzędziem są metody drzew (niesprawności i zdarzeń), które również znajdują szerokie zastosowanie w analizach ryzyka i niezawodności (np. [7]).

Jednym z nowatorskich podejść do analizy ryzyka może być wykorzystanie logiki rozmytej [3, 10]. Zdefiniowanie zbiorów rozmytych przypisuje się L.A. Zadehowi, który zapoczątkował tę dziedzinę pracą *Fuzzy Sets* z 1965 r. Celem autora było otrzymanie narzędzia pomocnego do modelowania złożonych, trudnych do jednoznacznego opisu zjawisk, w szczególności, lecz nie tylko, obejmujących udział tzw. czynnika ludzkiego. Wykorzystuje się przy tym zbiór reguł wnioskowania oraz operatory logiczne, a cały proces obliczania wartości wyjściowych modelu dla określonych danych wejściowych nosi nazwę procesu wnioskowania [11].

## 2. Podstawowe pojęcia i działania w logice rozmytej

Logika rozmyta pozwala na sformalizowanie nieprecyzyjnych pojęć w opisie zjawisk oraz cech. Podstawowymi pojęciami są: zbiór rozmyty, funkcja przynależności, wartość lingwistyczna, zmienna lingwistyczna [2, 4, 6, 8, 11]:

**Zbiorem rozmytym**  $A$  w pewnej niepustej przestrzeni  $X$ , co zapisujemy  $A \subseteq X$ , nazywamy zbiór par:

$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in X\} \quad (1)$$

przy czym  $\mu_A$  jest funkcją przynależności i jest definiowana jako:

$$\mu_A: X \rightarrow [0; 1] \quad (2)$$

**Funkcja przynależności** dla każdego  $x \in X$  przyporządkowuje stopień przynależności  $\mu_A(x)$  do zbioru rozmytego  $A$  zawierający się w przedziale domkniętym  $[0; 1]$ .

Funkcje przynależności mogą przyjmować różne kształty. Wyróżniamy funkcje wielokątne: trójkątne, trapezowe, prostokątne oraz funkcje Gaussa.

**Wartością lingwistyczną** nazywamy słowne określenie pewnej wielkości. Określenie to jest precyzowane poprzez zbiór rozmyty, do którego należą w niezerowym stopniu te wartości zmiennej, w stosunku do których można użyć tego określenia.

Przykładami wartości lingwistycznych mogą być określenia: mały, średni, duży.

**Zmienna lingwistyczna** to wielkość, która przyjmuje zarówno wartości liczbowe, jak i wartości lingwistyczne.

Przykładowe zmienne lingwistyczne to: temperatura, poziom wody, odległość do celu.

Definicje podstawowych działań są następujące [4, 6, 8, 11]:

**Sumą** dwóch zbiorów rozmytych  $A$  i  $B$  w przestrzeni  $X$  jest zbiór rozmyty, którego funkcja przynależności spełnia następującą zależność:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A, \mu_B) \text{ dla każdego } x \in X \quad (3)$$

W powyższej definicji funkcję  $\max$  można zastąpić dowolną  $s$ -normą.

**Przecięciem** dwóch zbiorów rozmytych  $A$  i  $B$  w przestrzeni  $X$  jest zbiór rozmyty, którego funkcja przynależności spełnia następującą zależność:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A, \mu_B) \text{ dla każdego } x \in X \quad (4)$$

Funkcję  $\min$  można zastąpić dowolną  $t$ -normą.

S-normy i t-normy są to dowolne funkcje spełniające warunki łączności, przemienności, monotoniczności oraz odpowiednie warunki brzegowe. Najważniejsze normy S i T można znaleźć np. w [8].

### **Regulator rozmyty**

Schemat klasycznego regulatora rozmytego pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy regulatora rozmytego

Funkcje, jakie pełnią poszczególne bloki w regulatorze (sterowniku) rozmytym, są następujące [2, 9]:

**Rozmywanie (fuzyfikacja)** – wyznaczenie stopnia przynależności poszczególnych wejść modelu (ostrzych wartości:  $x_1^*$ ,  $x_2^*$ , ...,  $x_n^*$ ) do odpowiednich zbiorów rozmytych.

**Baza reguł** jest związana z tworzeniem modelu lingwistycznego zawierającego rozmyte reguły określające zależności pomiędzy zbiorami wejść oraz wyjść.

**Wnioskowanie (inferencja)** – w tym etapie określa się funkcję przynależności wyjścia modelu na podstawie obliczonych uprzednio stopni przynależności sygnałów wejściowych oraz modelu lingwistycznego. Proces ten składa się z trzech etapów:

- **Agregacja** – obliczenie stopni prawdziwości przesłanek poszczególnych reguł. Przesłanki tworzące regułę są przeważnie złożone z kilku przesłanek prostych połączonych spójnikami logicznymi I oraz LUB.
- **Wnioskowanie właściwe** – dla każdej reguły, której przesłanki są spełnione, należy określić funkcję przynależności całej implikacji  $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$ . W tym przypadku A to zagregowany zbiór wejściowy, natomiast B to zbiór wyjściowy. Do procesu wnioskowania właściwego wykorzystuje się różne operatory realizujące proces implikacji rozmytej. Jednym z najprostszych jest operator Mamdaniego:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \text{MIN}(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (5)$$

- **Akumulacja** – kumulacja w jeden zbiór  $\mu_{WY}(y)$  wyników otrzymanych w poprzednim etapie. Stosuje się w tym celu odpowiednie s-normy. Najczęściej wykorzystywane są operatory MAX oraz sumy ograniczonej. Jeśli wnioskowanie właściwe odbywa się z wykorzystaniem operatora Mamdaniego (MIN), a akumulacja z użyciem operatora MAX, cały proces nosi nazwę inferencji MAX-MIN.

**Wyostrezanie (defuzyfikacja)** – proces ten polega na określeniu ostrej wartości wejścia sygnału wyjściowego  $y^*$  na podstawie wyznaczonej  $\mu_{WY}(y)$ . W tym celu

stosowane są metody [2, 12]: *pierwszego maksimum (FOM)*, *ostatniego maksimum (LOM)*, *środką maksimum (MOM)*, *środką ciężkości (COG)*, *wysokości (HM)*.

### 3. Zgromadzenie danych do analizy ryzyka

Dość szczególnym systemem C-T-O jest struktura człowiek (pilot, załoga, kontroler) – statek powietrzny – środowisko. Bezpieczeństwo tego układu warunkują przepisy, procedury, sposoby zarządzania. Istotną rolę odgrywają także raporty komisji lotniczych oraz dane statystyczne dotyczące wypadków i incydentów [5].

Przeprowadzona analiza ryzyka dotyczyła pilota szybowcowego. Etap identyfikacji systemu C-T-O, identyfikacji zagrożeń, określenia prawdopodobieństw wystąpienia zdarzeń oraz szacowania strat został przeprowadzony na podstawie danych (wyników ankiet eksperckich przeprowadzanych wśród pilotów latających na szybowcu SZD-50 „Puchacz” w aeroklubie mieleckim) zebranych do ilościowej analizy ryzyka [1]. W tab. 1 przedstawiono listę zdarzeń niepożądanych, które uwzględniono w analizie ryzyka z wykorzystaniem logiki rozmytej.

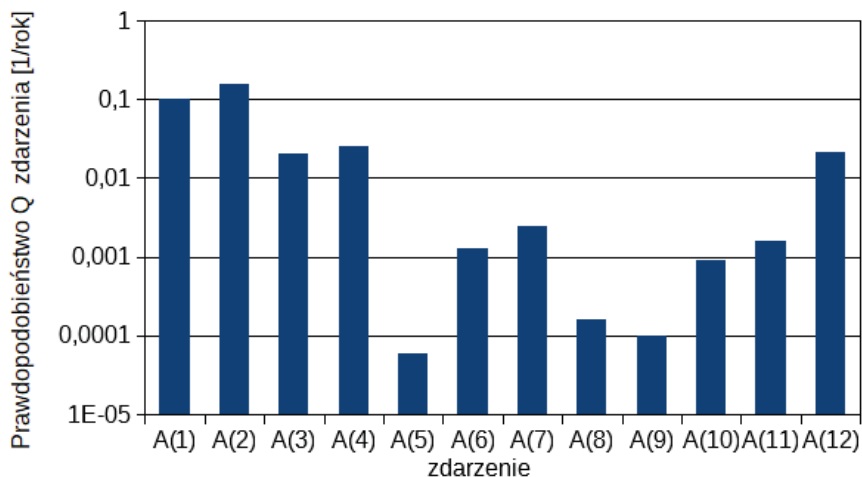
**Tabela 1**

**Zdarzenia niepożądane uwzględnione w analizie ryzyka [1]**

Oznaczenie	Opis zdarzenia
A <sup>(1)</sup>	Upadek podczas przemieszczania się po hangarze
A <sup>(2)</sup>	Kontakt z ostrymi krawędziami podczas prac naprawczych w warsztacie
A <sup>(3)</sup>	Uderzenie skrzydłem podczas przemieszczania szybowca
A <sup>(4)</sup>	Przeciążenie układu ruchu wskutek unoszenia ogona szybowca
A <sup>(5)</sup>	Awaria układu sterowania
A <sup>(6)</sup>	Uderzenie przez zerwaną linię holowniczą podczas transportu szybowca
A <sup>(7)</sup>	Uderzenie w przeszkodę w drodze podczas startu lub dobiegu szybowca
A <sup>(8)</sup>	Urwanie liny przy wznoszeniu (za wyciągarką)
A <sup>(9)</sup>	Brak wyczepienia (start za wyciągarką)
A <sup>(10)</sup>	Przeciążenie organizmu podczas wykonywania akrobacji
A <sup>(11)</sup>	Uderzenie głową w owiewkę wskutek przyziemienia
A <sup>(12)</sup>	Twarde lądowanie w terenie przygodnym



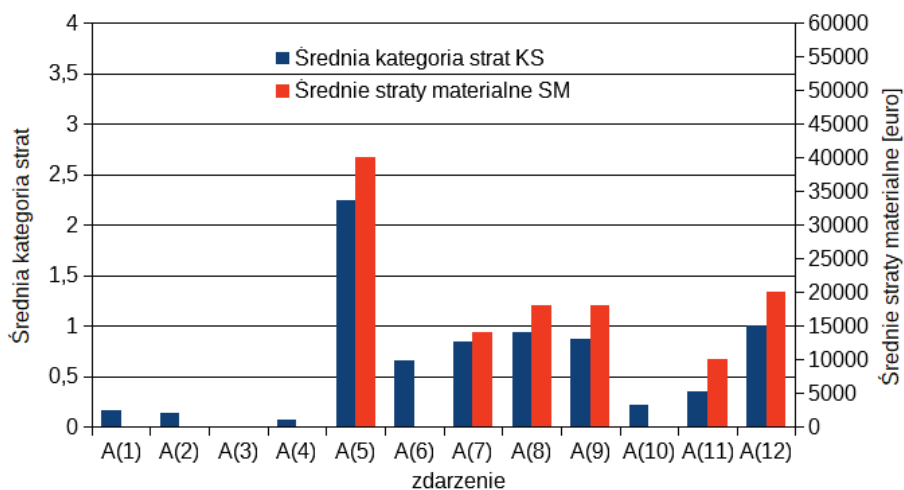
Pierwsza część ankiet [1] była pomocna do wyznaczenia prawdopodobieństw wystąpienia poszczególnych zdarzeń. Eksperti przypisywali dla każdego zdarzenia wartość od 1 do 12 (12 dla najbardziej, 1 w przypadku najmniej prawdopodobnego). Następnie wyznaczono średnią pozycję w rankingu dla każdego zdarzenia. Wykorzystując ponadto dane statystyczne [1] dla dwóch zdarzeń, oszacowano prawdopodobieństwo  $Q$  wystąpienia poszczególnych zdarzeń (rys. 2).



Rys. 2. Prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych zdarzeń

Przeprowadzone ankiety [1] dotyczyły także oceny możliwych skutków (strat) dla każdego ze zdarzeń. Ekspertów poproszono o przypisanie dla każdego zdarzenia, ile przypadków z założonej liczby 1000 zakończy się poniesieniem określonej kategorii strat:  $c_0$  – brak obrażeń;  $c_1$  – lekkie obrażenia;  $c_2$  – średnie obrażenia;  $c_3$  – ciężkie obrażenia;  $c_4$  – śmiertelne obrażenia.

Na podstawie wyników ankiet obliczono średnią (ważoną) kategorię strat  $KS$ . Ponadto oszacowano także metodą ekspercką straty materialne, wyniki przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Średnie kategorie strat i strat materialnych

#### 4. Analiza z wykorzystaniem logiki rozmytej

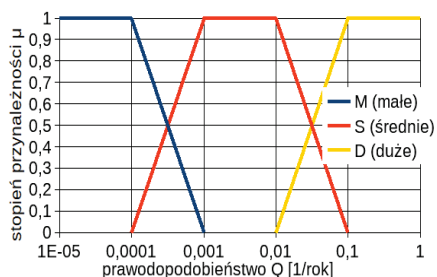
Wnioskowanie rozmyte odbywać się będzie zgodnie z zaproponowanym schematem postępowania przedstawionym na rys. 2. Dla analizowanego przypadku i zgromadzonych danych schemat ten będzie miał następującą formę (rys. 4).



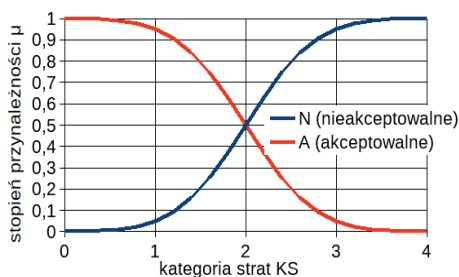
Rys. 4. Schemat blokowy regulatora rozmytego dla prowadzonych analiz

Przyjęto następujące wartości lingwistyczne i kształt funkcji przynależności (rys. 5) dla poszczególnych zmiennych:

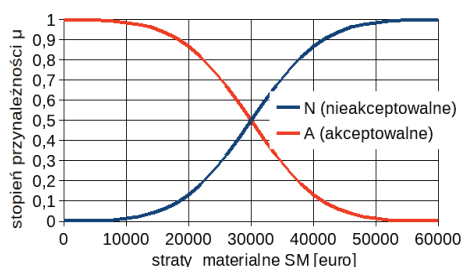
- $Q$  – *małe, duże, średnie*; funkcje trapezowe
- $KS$  oraz  $SM$  – *akceptowalne, nieakceptowalne*; funkcje Gaussa
- $R$  – *znikome, małe, średnie, duże, krytyczne*; funkcje trójkątne.



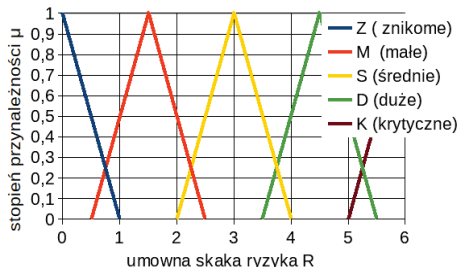
a) zbiory rozmyte dla zmiennej Q



b) zbiory rozmyte dla zmiennej KS



c) zbiory rozmyte dla zmiennej SM



d) zbiory rozmyte dla zmiennej R

Rys. 5. Przyjęte zbiory rozmyte dla zmiennych wejściowych i wyjściowej

Kolejnym istotnym elementem, oprócz danych wejściowych, wyjściowych i ich modeli rozmytych, potrzebnym do rozpoczęcia obliczeń za pomocą wnioskowania rozmytego, jest baza reguł. W tabeli 2 znajdują się reguły stworzone na potrzeby niniejszej analizy ryzyka.

Tabela 2

Baza reguł

Reguła		Q		KS		SM		R
1	<i>JĘŚLI</i>	M	<i>I</i>	A	<i>I</i>	A	<i>TO</i>	Z
2		M		A		N		Z
3		M		N		A		M
4		M		N		N		S
5		S		A		A		M
6		S		A		N		S
7		S		N		A		S
8		S		N		N		D
9		D		A		A		S

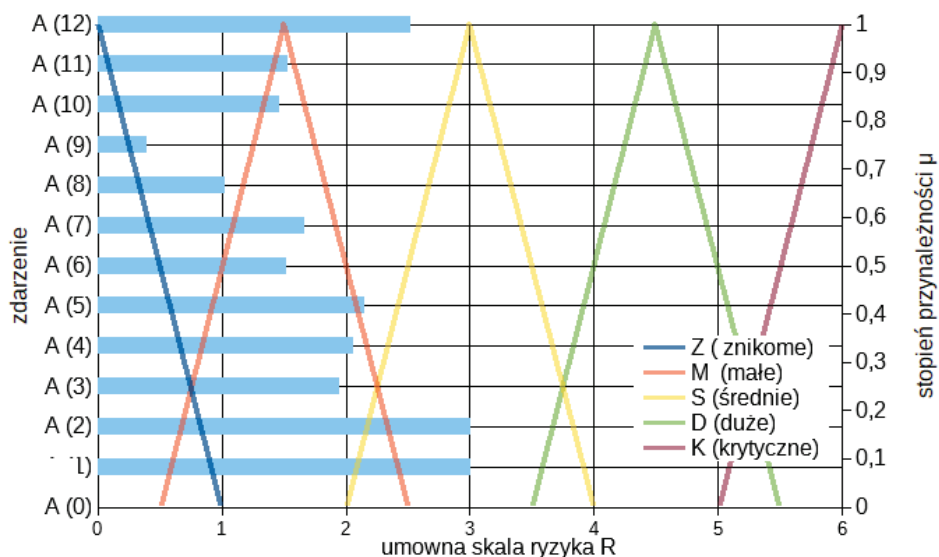
10		D		A		N		D
11		D		N		A		K
12		D		N		N		K
M – małe, S – średnie, D – duże, A – akceptowalne, N – nieakceptowalne, Z – znikome, K- krytyczne								

Podczas analizy dla poszczególnych zdarzeń z wykorzystaniem logiki rozmytej, dla etapu agregacji wykorzystano operator MIN, natomiast proces wnioskowania właściwego dla wyszczególnionych zdarzeń odbył się z wykorzystaniem operatora Mamdaniego (5), a akumulacja z użyciem operatora MAX.

W celu porównania współczynników ryzyka dla wszystkich zdarzeń zdefiniowano jeden współczynnik  $R$  będący średnią ważoną ze wskaźników wyliczonych za pomocą metod środka maksimum, środka ciężkości i wysokości:

$$R = 0,1 R_{MOM}^* + 0,45 R_{MOM}^* + 0,45 R_{HM}^* \quad (6)$$

Wyniki przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Wyniki współczynników ryzyka  $R$  dla wszystkich zdarzeń

Analizując wykres (rys. 6), można zauważyć, że największy wskaźnik ryzyka  $R$  mają zdarzenia 1, 2, 12 oraz 5. Zdarzenia niepożądane 1 i 2, czyli *Upadek podczas przemieszczania się po hangarze* oraz *Kontakt z ostrymi krawędziami*

podczas prac naprawczych w warsztacie są zdarzeniami, które występują najczęściej. Prawdopodobieństwo ich wystąpienia w ciągu roku oszacowano na ok. 12–15%. Przeciętne straty są niewielkie. Powodem wysokiego wskaźnika ryzyka dla tych zdarzeń było więc wysokie prawdopodobieństwo ich wystąpienia.

Kolejnym zdarzeniem, do którego przypisano wysoki wskaźnik, jest zdarzenie 12, a więc *Twarde lądowanie na terenie przygodnym*. Niosło ze sobą dość duże straty, choć dużo mniejsze niż np. zdarzenie 5. Prawdopodobieństwo jego wystąpienia było również dość wysokie, ale o rząd mniejsze niż zdarzeń 1, 2.

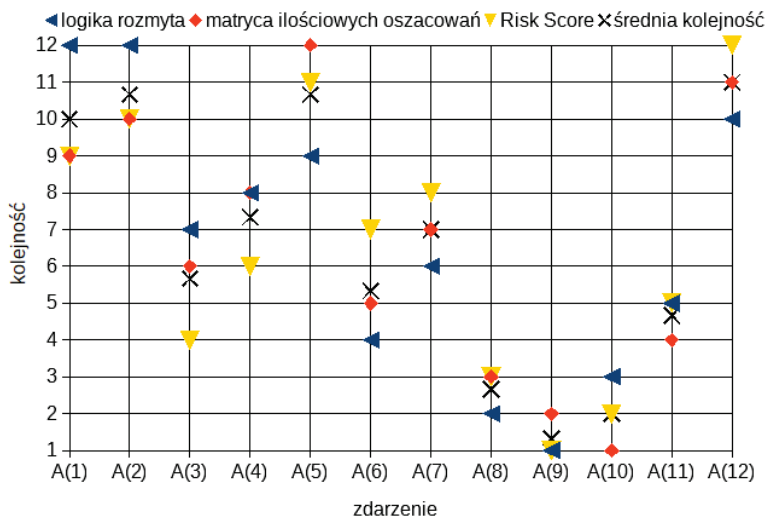
Następne to zdarzenie 5, związane z *awarią układu sterowania*. Tutaj sytuacja jest odwrotna niż dla zdarzeń 1 i 2. Prawdopodobieństwo zdarzenia było bardzo małe (najmniejsze ze wszystkich omawianych), natomiast przeciętne straty, zarówno ludzkie, jak i materialne były bardzo wysokie. To spowodowało, że wskaźnik ryzyka był stosunkowo wysoki.

Podsumowując, wydaje się, że zastosowanie metody logiki rozmytej do obliczenia współczynników ryzyka i porównywania tych parametrów dla poszczególnych zdarzeń przyniosło dobre rezultaty. Należy zwrócić uwagę, że dla wielu przypadków, gdzie straty były bardzo niewielkie i porównywalne do siebie, decydującą rolę w wyliczonym współczynniku miało prawdopodobieństwo ich wystąpienia. Jednak należy podkreślić, że jeśli zdarzenie było bardzo mało prawdopodobne, ale niosło ze sobą bardzo duże straty, współczynnik ryzyka w dużym stopniu to „uwzględnił”. Przykładami są zdarzenia 5 i 12.

## 5. Analiza ryzyka z wykorzystaniem innych metod

Ostatnim krokiem badań była weryfikacja otrzymanych wyników za pomocą standardowych metod *matrycy oszacowań ilościowych* oraz *Risk Score*.

Rys. 7 przedstawia zestawienie wyników (uszeregowanie zdarzeń od 1 – najmniej do 12 – najbardziej ryzykownego) uzyskanych za pomocą wszystkich metod. Można zauważyć, że wyniki są zbieżne – dla żadnego zdarzenia nie wystąpiła większa różnica w kolejności wśród wszystkich metod niż 3 pozycje.



Rys. 7. Zestawienie wyników

## 6. Podsumowanie

Niniejsza praca wykazała, że zastosowanie logiki rozmytej do analizy ryzyka w lotnictwie jest uzasadnione. Otrzymane wyniki są zgodne z oczekiwaniami. Najwyższy wskaźnik ryzyka przypisano do zdarzeń, które są najbardziej prawdopodobne lub powodują największe straty. W wynikach nie odnotowano zdarzeń, z którymi związane jest ryzyko duże oraz krytyczne, co jest konsekwencją tego, że nie było takich sytuacji, aby zdarzenie wysoce prawdopodobne niesło ze sobą wysokie średnie straty ludzkie i materialne.

Według analizy z zastosowaniem logiki rozmytej zdarzenia o największym ryzyku to: *Upadek podczas przemieszczania się po hangarze*, *Kontakt z ostrymi krawędziami podczas prac naprawczych w warsztacie*, *Twarde lądowanie na terenie przygodnym* oraz *Awaria układu sterowania*. Analizując te same zdarzenia innymi metodami, tj. za pomocą macrycy ilościowych oszacowań oraz *Risk Score*, otrzymano zbliżone wyniki. Wystąpiły pewne różnice, ale nie były one znaczące. Mogą one wynikać z różnego wpływu czynników na ostateczny wynik (reguły wnioskowania i funkcje przynależności w logice rozmytej, kąt pochylenia linii w macrycy ilościowych oszacowań ryzyka oraz przyjęte wielkości tablicowe w metodzie *Risk Score*) oraz innej w każdej metodzie interpretacji strat. Ponadto należy zaznaczyć, że w przypadku wykorzystania zbiorów rozmytych

uwzględniono także straty materialne, natomiast w *Risk Score* prawdopodobieństwo zdarzenia wyrażone jest iloczynem częstości ekspozycji oraz prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia na jedną czynność.

Mimo pewnych zaobserwowanych różnic w zasadzie nie można jednoznacznie stwierdzić, która metoda jest najbardziej efektywna. Ważne natomiast, że wykorzystanie logiki rozmytej do analizy ryzyka wydaje się właściwe. Metoda ta niesie ze sobą dużo możliwości, głównie bardzo wysoką elastyczność – można dowolnie dobierać reguły wnioskowania, funkcje przynależności, czy liczbę wejść do modelu. Powinna być więc rozwijana i wykorzystywana równoległe z innymi metodami do wstępnej, a nawet szczegółowej analizy ryzyka. W bardziej zaawansowanych aplikacjach można wykorzystywać zbiory rozmyte lub ogólniej – sztuczną inteligencję do zarządzania ryzykiem, systemów zarządzania kryzysowego czy wspomagania decyzji.

## 7. Literatura

1. Banaszewski K.: Ilościowa analiza ryzyka pilota szybowcowego. Politechnika Warszawska, 2010 (praca dyplomowa inżynierska).
2. Bielecki S., Wasilewski J.: Wnioskowanie rozmyte i programowanie w języku Prolog. W: Parol M., Piotrowski P. (red.), Sztuczna inteligencja w praktyce. Laboratorium. Oficyna Wydawnicza PW, 2008.
3. Ficoń K.: Zastosowanie rozmytych sterowników Mamdaniego do określania ryzyka wieloczynnikowego. Zeszyty Naukowe AMW, No. 3(194), 2013.
4. Kacprzyk J.: Wieloetapowe sterowanie rozmyte. WNT, 2001.
5. Klich E.: Bezpieczeństwo lotów. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2011.
6. Nowicki R. K.: Rozmyte systemy decyzyjne w zadaniach z ograniczoną wiedzą. AOW EXIT, Warszawa 2009.
7. Papis M., Matyjewski M.: Risk analysis in case of fire on PZL BRYZA using the event tree analysis. Journal of KONBiN, No. 2(38), 2016. DOI 10.1515/jok-2016-0026.
8. Rykaczewski K.: Systemy rozmyte i ich zastosowania. Toruń 2006, <http://fulmanski.pl/zajecia/ssn/materialy/duszek.pdf>, data dostępu: 29.11.2018.
9. Smolarkiewicz M.M.: Zastosowanie zmiennych lingwistycznych oraz logiki rozmytej w analizie ryzyka. Polski Przegląd Medycyny i Psychologii Lotniczej, No. 4 (17), 2011.
10. Szopa T., Niezawodność i bezpieczeństwo. Oficyna Wydawnicza PW, 2016.
11. Yagier R.R, Filev D.P: Podstawy modelowania i sterowania rozmytego, WNT, 1995.
12. Podstawy logiki rozmytej i operatorów rozmytych, <http://www.isep.pw.edu.pl/ZakladNapędu/Instrukcje/Logika%20rozmyta%20-%20podstawy.pdf>, data dostępu: 26.03.2015.

